

Rapport final

Projet d'agrandissement du lieu d'enfouissement sanitaire de Saint-Thomas

Écran périphérique d'étanchéité
Étude d'ingénierie détaillée



Août 2003

Rapport final - 05-01241

Projet d'agrandissement du lieu d'enfouissement sanitaire de Saint-Thomas

**Écran périphérique d'étanchéité
Étude d'ingénierie détaillée**

Août 2003

CE RAPPORT A ÉTÉ PRÉPARÉ PAR LE PERSONNEL DE
TECSULT INC. AVEC LA COLLABORATION PARTICULIÈRE
DES PROFESSIONNELS SUIVANTS :

RÉDACTION :



Claude Robitaille, ing., M. Ing.



Luc Demers, ing., M. Sc. A.



RÉVISION ET APPROBATION :



Ronald Anderson, ing., M. Sc.



Georges Forest, ing.



	page
1	INTRODUCTION 1-1
1.1	Mandat..... 1-1
1.2	Objet du rapport..... 1-1
1.3	Contexte réglementaire..... 1-2
1.4	Localisation et caractéristiques générales du site 1-4
1.5	Stratigraphie des sols au site 1-4
1.6	Conditions hydrogéologiques au site..... 1-6
2	DESCRIPTION ET APPLICATION DE LA TECHNOLOGIE..... 2-1
2.1	Description de la technologie sol-bentonite 2-1
2.1.1	Excavation de la tranchée et soutènement des parois 2-1
2.1.2	Préparation, mise en place et caractéristiques du remblai sol-bentonite..... 2-2
2.2	Utilisation de la technologie sol-bentonite 2-3
2.3	Application de la technologie sol-bentonite au site 2-4
2.4	Technologie alternative 2-5
3	CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉCRAN PÉRIPHÉRIQUE D'ÉTANCHÉITÉ 3-1
3.1	Localisation de l'écran périphérique d'étanchéité 3-1
3.2	Excavation de la tranchée 3-2
3.2.1	Plate-forme de travail..... 3-2
3.2.2	Largeur de l'écran..... 3-3
3.2.3	Profondeur de l'écran 3-3
3.2.4	Stabilité des parois de la tranchée 3-6
3.3	Remblai de sol-bentonite 3-7
3.3.1	Sols disponibles pour la préparation du remblai sol-bentonite 3-7
3.3.1.1	Sols à excaver..... 3-7
3.3.1.2	Matériaux d'emprunt disponibles 3-8
3.3.2	Propriétés du remblai sol-bentonite 3-9
3.3.2.1	Affaissement du remblai sol-bentonite..... 3-9
3.3.2.2	Conductivité hydraulique du remblai sol-bentonite..... 3-10
3.3.2.3	Compatibilité chimique du remblai sol-bentonite avec le lixiviat 3-12
3.3.2.4	Autres propriétés du remblai sol-bentonite 3-15
3.3.3	Composition du remblai sol-bentonite visée..... 3-16
3.3.4	Préparation et mise en place du remblai sol-bentonite..... 3-17
3.4	Protection de la partie supérieure de l'écran 3-18
4	PROGRAMME DE CONTRÔLE DE LA QUALITÉ 4-1
4.1	Excavation de la tranchée 4-1
4.1.1	Largeur et continuité de la tranchée..... 4-1
4.1.2	Profondeur de la tranchée 4-1
4.1.3	Stabilité des parois de la tranchée 4-2
4.2	Propriétés du remblai de sol-bentonite 4-3
4.3	Mise en place du remblai de sol-bentonite 4-5

	page
5 SUIVI ET CONTRÔLE	5-1
5.1 Instrumentation	5-1
5.2 Suivi des niveaux d'eaux.....	5-2
6 RÉFÉRENCES	6-1

ANNEXE A Dessins et figures

ANNEXE B Tableaux

ANNEXE C Résultats d'essais en laboratoire

1 INTRODUCTION

1.1 Mandat

Dépôt Rive-Nord Inc. (DRN), exploite un lieu d'enfouissement sanitaire (L.E.S.), dénommé L.E.S. de Saint-Thomas, à Saint-Thomas dans la région de Lanaudière. Le L.E.S. est exploité depuis près de 25 ans et est composé de quatre cellules complétées (cellules C-1, C-2A, C-2B et C-2C) et d'une cellule en exploitation (cellule C-3). Dépôt Rive-Nord Inc. souhaite procéder à l'agrandissement du site actuel et cet agrandissement diffèrera de la façon dont le site a été exploité jusqu'à maintenant. En effet, DRN vise une exploitation «en excavation» et «en surélévation» du site alors que ce dernier a jusqu'à présent été exploité essentiellement «en surélévation» selon le principe d'atténuation naturelle autorisé par le *Règlement sur les déchets solides*. Ce nouveau mode d'exploitation est justifié par la présence, en profondeur, d'une couche d'argile ayant d'excellentes propriétés d'imperméabilisation. La future cellule d'enfouissement nécessitera toutefois un écran périphérique d'étanchéité sur son périmètre compte tenu de la perméabilité relativement élevée du dépôt granulaire sus-jacent à l'argile.

Les services de TECSULT INC. ont donc été retenus par DRN pour effectuer une étude de faisabilité technique visant la sélection du type d'écran périphérique d'étanchéité, déterminer les conditions géotechniques, hydrogéologiques et environnementales du site et, finalement, réaliser l'étude d'ingénierie détaillée de l'écran et de la cellule du projet d'agrandissement du L.E.S. de Saint-Thomas.

1.2 Objet du rapport

Le présent document constitue le rapport d'ingénierie détaillée pour l'aménagement de l'écran périphérique d'étanchéité. Ce rapport fait suite au rapport de l'étude géotechnique, hydrogéologique et environnementale du site (TECSULT, août 2003). Il regroupe les informations pertinentes à la conception et à la réalisation de l'écran périphérique d'étanchéité en sol-bentonite (SB).

Ce rapport est divisé en six (6) chapitres dont le premier (chapitre 1) qui introduit le cadre et l'objet du rapport, le contexte réglementaire, la localisation et les caractéristiques générales du site, la stratigraphie ainsi que les conditions hydrogéologiques du site. Le chapitre 2 présente la description et l'application de la technologie de construction d'un écran d'étanchéité en sol-bentonite. Le chapitre 3 traite des caractéristiques de l'écran périphérique d'étanchéité alors que le chapitre 4 présente le programme de contrôle de la qualité qui sera appliqué durant les travaux de construction de l'écran. Les mesures prévues pour le suivi et le contrôle sont décrites au chapitre 5 alors que la liste complète des références consultées est incluse au sixième et dernier chapitre de ce rapport.

Un deuxième rapport d'ingénierie détaillée, concernant l'aménagement de la future cellule d'enfouissement, sera produit ultérieurement. Il traitera des aspects reliés à l'excavation, au contrôle des apports en eau, au système de recouvrement final de la cellule, au drainage de surface et au programme de surveillance de la cellule.

1.3 Contexte réglementaire

Les opérations actuelles du L.E.S. ont été approuvées en vertu du *Règlement sur les déchets solides* (Q-2, r.3.2). Le site est exploité essentiellement «en surélévation» à cause du niveau relativement élevé de la nappe d'eau souterraine qui limite le niveau d'excavation à proximité de la surface. Considérant la faible vitesse d'écoulement des eaux souterraines et le fait que les eaux de lixiviation sont atténuées de façon naturelle par leur passage dans les couches de sol naturel, aucun système de confinement n'est présentement requis pour le site. Cependant, la poursuite de l'exploitation du site par la technique actuelle limitera la durée de vie du L.E.S. à moins de deux années supplémentaires. De plus, le projet de *Règlement sur l'élimination des matières résiduelles* (Gazette officielle du Québec, 2000), ci-après appelé *Projet de Règlement*, est susceptible de remplacer prochainement le *Règlement sur les déchets solides*. Il est clair que le projet d'agrandissement du L.E.S. de Saint-Thomas doit respecter les futures exigences associées à ce *Projet de Règlement*. Dans le contexte de cette nouvelle réglementation environnementale, la notion de L.E.S. (lieu d'enfouissement sanitaire) est abandonnée au profit du concept de lieu d'enfouissement technique (L.E.T.). Cette modification est accompagnée de

nouvelles exigences d'étanchéité pour les horizons sous-jacents aux déchets, soit la présence d'une couche de dépôts meubles imperméables. L'épaisseur de cette couche imperméable, dont la conductivité hydraulique est égale ou inférieure à 1×10^{-6} cm/s, doit être d'au moins 6,0 m. L'article 19 du Projet de Règlement permet cependant l'aménagement d'un écran périphérique d'étanchéité pour compléter l'imperméabilisation d'un L.E.T. lorsque la couche imperméable n'est présente qu'en profondeur. Les caractéristiques principales requises pour cet écran périphérique d'étanchéité sont les suivantes :

- conductivité hydraulique égale ou inférieure à 1×10^{-6} cm/s;
- sommet à la surface du sol;
- largeur minimale d'un mètre;
- ancrage d'au moins un mètre dans la couche imperméable.

L'article 19 permet aussi au promoteur de proposer tout autre système comportant un écran périphérique assurant une efficacité au moins équivalente au système prévu ci-haut. Pour sa part, l'article 20 définit les conditions dans lesquelles l'imperméabilisation d'un L.E.T. peut être assurée par un système d'imperméabilisation à double niveau de protection (couche d'argile compactée ou géomembrane). Pour un tel système d'imperméabilisation installé dans des dépôts meubles ayant une conductivité hydraulique supérieure à 5×10^{-5} cm/s, tels que ceux présents à la surface du site de DRN, le fond du L.E.T. doit être au-dessus du niveau des eaux souterraines ce qui diminue radicalement la capacité de l'agrandissement du L.E.S. de St-Thomas par rapport à la variante avec écran périphérique d'étanchéité étant donné la perte du volume d'enfouissement situé sous ce niveau.

À part ces articles qui traitent de l'étanchéité des L.E.T., il y a un autre article qui est important pour la conception de ces lieux, il s'agit de l'article 24 sur le captage et traitement des lixiviats. En effet, l'article 24 prescrit, dans le cas d'un L.E.T. constitué à l'aide d'un écran périphérique d'étanchéité, que la hauteur du liquide (lixiviat) susceptible de s'accumuler au fond du lieu ne puisse atteindre le niveau des matières résiduelles enfouies. Ceci impose des conditions très strictes en matière de système de captage et pompage du lixiviat du L.E.T.

Les exigences reliées au recouvrement final du L.E.T. sont, quant à elles, définies aux articles 42 et 43 du Projet de Règlement.

Enfin, l'article 78 accorde au promoteur une certaine latitude dans la conception de l'aménagement au niveau des matériaux ou des éléments prescrits. Des matériaux ou éléments équivalents peuvent être proposés si la demande est accompagnée d'une attestation démontrant (rapport, étude, analyse, résultat d'analyse) sans équivoque l'efficacité du matériau ou de l'élément proposé. Cette attestation doit être signée par un professionnel qualifié.

1.4 Localisation et caractéristiques générales du site

Le site de l'agrandissement projeté (aire délimitée par le futur écran périphérique d'étanchéité) est situé sur le lot 389 ainsi que sur une partie des lots 376, 388, 390 et 391 à la limite nord du cadastre de la paroisse Saint-Thomas au nord du rang Saint-Joseph. La localisation et l'état du site de l'agrandissement sont montrés à la figure 1.1¹.

La partie est du site d'agrandissement est occupée par la cellule 3 actuellement en exploitation. La crête de la cellule 3 déjà remplie dans la partie sud atteint le niveau 34 m. La partie nord de la cellule 3 non remplie est au niveau 21 m, cette partie ayant déjà été excavée jusqu'à environ 1 m au-dessus de la nappe phréatique. Les parties centrale et nord du site sont partiellement exploitées comme sablière. Le centre de compostage est présent au nord-ouest du site d'agrandissement. Le reste du site est soit boisé, soit en friche.

1.5 Stratigraphie des sols au site

Les travaux réalisés dans le cadre de la campagne d'investigation géotechnique, hydrogéologique et environnementale (TECSULT, août 2003), de même que ceux réalisés lors

¹ Les dessins et figures sont regroupées à l'annexe A.

de campagnes antérieures, ont permis de préciser la nature et les propriétés géotechniques des différents matériaux rencontrés sur le site.

Selon les informations tirées de ces campagnes, quatre unités stratigraphiques de dépôts meubles sont présentes sur le site. La séquence stratigraphique à partir de la surface pour l'ensemble du site se présente comme suit :

- dépôts deltaïques constitués d'alluvions sableuses et silteuses en surface;
- dépôts de transition constitués d'une alternance de lits d'argile, de silt et de sable;
- dépôts marins constitués d'argile silteuse;
- dépôts glaciaires recouverts par endroit de dépôts fluvio-glaciaires;
- socle rocheux.

Les matériaux d'origine deltaïque au sommet de la séquence stratigraphique sont constitués principalement de sable fin, puis de sable et de silt à partir de 5 à 10 m de profondeur. L'épaisseur de cette couche, déterminée à partir des descriptions d'échantillons prélevés, varie entre 17,0 m et 29,0 m sur le site. L'ensemble des analyses granulométriques effectuées sur ces derniers révèlent que les matériaux situés dans la partie supérieure du dépôt correspondent à un sable fin uniforme contenant peu de particules inférieures à 0,08 mm (<12%) pouvant être classé « SP » à « SP-SM » selon le système de classification unifié (USCS). Dans la partie inférieure, le pourcentage plus important de matériaux fins (>12%) permet de classer les sols parmi les sables silteux « SM ».

La couche de transition située entre les dépôts marins en profondeur et les dépôts deltaïques en surface, est constituée d'une alternance de lits de sable, de silt et d'argile d'épaisseur variable. L'épaisseur de cette couche varie entre 6 m et 15 m sur l'ensemble du site. Les résultats des sondages au piézocône jumelés aux résultats d'essais d'identification en laboratoire et aux descriptions visuelles des échantillons prélevés, ont permis de constater que, malgré l'hétérogénéité verticale de cette zone, la partie supérieure de cette dernière pouvait être considérée globalement comme étant un silt sableux « ML » alors que la partie inférieure correspond plutôt à une argile inorganique de plasticité faible à moyenne « CL ».

Les dépôts marins sont constitués d'argile silteuse typique de la mer de Champlain. Il s'agit d'une argile très homogène. Le sommet de cette couche a été localisé à partir des descriptions visuelles et des essais d'identification (limites d'Atterberg, teneurs en eau naturelle, analyses granulométriques) réalisés sur les échantillons prélevés de même qu'avec les résultats des sondages au piézocône réalisés sur le site. Selon ces données, le niveau supérieur de la couche d'argile se situe entre 26,74 m et 38,97 m de profondeur sur l'ensemble du site et présente une inclinaison générale du point haut situé au nord-ouest du site vers le point bas situé au sud-est. Le niveau inférieur de cette couche, localisé à partir des observations effectuées lors de la réalisation de forages profonds, varie de 65,70 m à 82,45 m de profondeur. Selon le système de classification unifié, la couche de dépôts marins est généralement constituée d'argile inorganique de plasticité élevée « CH ». Seule la partie supérieure de l'argile, en contact avec les dépôts de transition stratifiés, se classe par endroits comme une argile de plasticité moyenne « CL ».

Sous la couche d'argile silteuse, des matériaux d'origine glaciaire complètent la séquence stratigraphique jusqu'au roc. Quelques données tirées de forages profonds jumelées aux levés de sismique réfraction et de sismique réflexion effectués sur le site, indiquent que le toit du roc se situe entre 70,41 m et 94,49 m de profondeur pour l'ensemble du site. Son inclinaison est semblable à celle de la couche d'argile, c'est-à-dire orientée vers un point bas situé dans la partie sud-est du site.

Une représentation schématique de la stratigraphie des sols observée sur le site (coupe longitudinale dans l'axe de l'écran périphérique d'étanchéité) est incluse au dessin 1241-3080-102 de l'annexe A. Le dessin 1241-3080-100 montre la localisation des sondages réalisés sur le site. Notons également qu'une description détaillée des caractéristiques et des propriétés des sols présents sur le site est donnée dans le rapport de l'Étude géotechnique, hydrogéologique et environnementale (TECSULT, août 2003).

1.6 Conditions hydrogéologiques au site

Les nombreux sondages réalisés sur le site ont permis de confirmer la présence de trois unités hydrogéologiques distinctes dans les dépôts meubles : un aquifère supérieur à nappe libre (nappe phréatique), un aquitard et un aquifère profond sous-jacent (nappe captive).

L'aquifère supérieur correspond aux alluvions deltaïques de surface, composées de sable et de silt, et aux dépôts de transition composés de silt argileux, de silt et de sable silteux. Il s'agit d'un aquifère à nappe libre qui se prolonge en profondeur jusqu'aux dépôts marins et dont l'épaisseur d'environ 35 m varie en fonction des fluctuations saisonnières du niveau de la nappe, alimenté directement par l'infiltration venant de la surface. Le suivi piézométrique effectué de l'automne 2001 à l'été 2002 indique que le niveau de la nappe se situe près de la surface du sol et varie généralement entre 1,30 m et 4,77 m de profondeur selon les endroits. La direction générale d'écoulement des eaux dans l'aquifère supérieur est orientée de l'ouest vers l'est selon un gradient hydraulique horizontal de l'ordre 0,002 à 0,005. Dans la partie supérieure de cet aquifère, la conductivité hydraulique mesurée est de l'ordre de 7×10^{-3} cm/s alors que dans sa partie inférieure elle varie entre 2×10^{-6} et 1×10^{-4} cm/s.

En dessous, les dépôts marins composés d'argile silteuse représentent un horizon imperméable que l'on peut qualifier d'aquitard. La conductivité hydraulique de cet horizon, d'environ 40 m d'épaisseur, est inférieure à 4×10^{-7} cm/s.

Sous ces dépôts marins, les matériaux glaciaires et fluvio-glaciaires ainsi que la partie supérieure du roc, relativement fracturée, constituent un aquifère captif dont l'épaisseur peut être supérieure à 13 m à certains endroits. Les niveaux piézométriques observés dans cet aquifère durant l'été 2002 indiquent que ceux-ci se situent entre 5 m et 7 m de profondeur sous la surface du terrain.

Une description détaillée des conditions hydrogéologiques rencontrées sur le site est présentée dans le rapport de l'Étude géotechnique, hydrogéologique et environnementale (TECSULT, août 2003).

2 DESCRIPTION ET APPLICATION DE LA TECHNOLOGIE

Le rôle d'un écran périphérique d'étanchéité dans l'aménagement d'un L.E.T. consiste à confiner toute migration horizontale de lixiviat hors site et à contrôler les venues d'eau souterraines lors de l'excavation de la cellule d'enfouissement.

2.1 Description de la technologie sol-bentonite

L'imperméabilisation au moyen d'un écran d'étanchéité en SB est généralement assurée par la mise en place d'un remblai de sol-bentonite (SB) de faible perméabilité (conductivité hydraulique inférieure 1×10^{-6} cm/s) à l'intérieur d'une tranchée verticale pénétrant une couche sous-jacente de faible perméabilité et d'épaisseur suffisante. Les différentes étapes de réalisation sont décrites dans les sections suivantes et sont illustrées de façon schématique à la figure 2.1.

2.1.1 Excavation de la tranchée et soutènement des parois

Une tranchée (généralement de 1 m de large) est excavée en périphérie du site selon un tracé, déterminé à l'avance, permettant de ceinturer la future aire d'enfouissement. L'excavation est réalisée soit au moyen de pelles hydrauliques, soit au moyen de bennes preneuses.

Au fur et à mesure que le sol est enlevé de la tranchée, un mélange de boue composée d'eau et de bentonite (dans une proportion de 4 à 8 %) est mis en place à l'intérieur de la tranchée. La préparation de la boue de bentonite se fait au moyen d'un mélangeur à haute vitesse qui permet de bien mélanger l'eau et la bentonite et de la déverser à l'intérieur d'un bassin d'accumulation aménagé à même le terrain naturel. Celui-ci, construit au moyen de digues en sable, pourra soit être aménagé directement en bordure de l'excavation et être déplacé graduellement au rythme des travaux ou soit être implanté en retrait de la tranchée à un endroit qui sera maintenu tout au long des travaux. La boue de bentonite sera pompée à l'intérieur de la tranchée à partir du bassin d'accumulation. La pression hydrostatique exercée par ce mélange à l'intérieur de la tranchée ainsi que la formation d'une mince couche scellante,

appelée «gâteau-filtre», à la surface des parois, permettent de soutenir les parois de l'excavation jusqu'à la mise en place du remblai de SB. Le niveau de la boue dans la tranchée doit excéder suffisamment (environ 1 à 2 m) le niveau de l'eau souterraine. Le recours à cette technique permet d'atteindre des profondeurs importantes en fonction des méthodes d'excavation adoptées. Certaines pelles hydrauliques spéciales permettent d'atteindre des profondeurs de l'ordre de 30 m alors que l'utilisation de bennes preneuses permet d'excéder cette profondeur.

La tranchée est excavée verticalement jusqu'à une couche imperméable permettant un ancrage adéquat de l'écran. Une profondeur d'ancrage permettant d'assurer l'étanchéité du joint écran-couche imperméable doit être prévue.

2.1.2 Préparation, mise en place et caractéristiques du remblai sol-bentonite

Un matériau de remblayage (SB) est mis en place graduellement à l'intérieur de la tranchée au moyen de camions ou de bouteurs permettant un déchargement direct à l'intérieur de la tranchée. En raison de sa plus grande masse volumique, le matériau de remblayage (SB) remplace et repousse la boue de bentonite à l'intérieur de la tranchée. Le matériau de remblayage (SB) est constitué de sols (les déblais d'excavation sont utilisés de préférence) qui sont mélangés soit à de la boue de bentonite, soit à de la bentonite sèche dépendamment de la teneur en eau initiale des déblais. Si le sol est trop grossier, des particules fines (< 0,08 mm) doivent être ajoutées au mélange. Idéalement, le sol provenant de l'excavation de la tranchée doit être utilisé pour le remblayage, avec l'ajout de particules fines, si requis. Pour permettre d'obtenir de faibles valeurs de conductivité hydraulique, le matériau de remblayage doit contenir entre 20 et 50 % de particules fines (<0,08 mm) et au moins 1 % de bentonite.

La préparation du mélange se fait sur une aire de mélange qui peut soit être située directement en bordure de l'excavation et être déplacée graduellement au rythme des travaux ou soit être implantée en retrait de la tranchée à un endroit qui sera maintenu tout au long des travaux. Les opérations de préparation du mélange sont effectuées au moyen d'un buteur qui permet de bien mélanger les sols et la bentonite par le brassage successif de couches de sol. Une fois le

mélange bien homogénéisé, celui-ci est soit poussé directement par le boueur à l'intérieur de l'excavation dans le cas d'une aire de mélange situé en bordure de l'excavation, soit chargé dans des camions à benne qui acheminent et déversent le mélange dans la tranchée dans le cas d'une aire de mélange située en retrait de l'excavation. Un processus continu d'excavation, de préparation du matériau de remblayage et de mise en place de ce dernier dans l'excavation doit avoir lieu.

Un autre élément important qui conditionne l'avancement des travaux est l'angle de repos des matériaux de remblayage qui est principalement fonction de la teneur en eau des matériaux de remblai. Si les sols excavés sont trop humides et fins, un ajout de matériaux plus grossiers et peu humides peut être nécessaire afin de diminuer l'étalement du matériau de remblayage de l'écran. En effet, cet étalement est directement responsable de la longueur de tranchée qui doit être maintenue ouverte de sorte que le matériau de l'écran ne puisse atteindre le front d'excavation. Il est avantageux de minimiser la longueur de tranchée ouverte compte tenu du risque accru d'instabilité des parois de longues tranchées.

2.2 Utilisation de la technologie sol-bentonite

L'utilisation d'un écran d'étanchéité en sol-bentonite (SB) pour le contrôle des infiltrations d'eau à travers les sols, constitue l'une des plus anciennes technologies développées pour cet usage (depuis 1940 en Amérique du Nord) et est sans contredit la plus utilisée en Amérique du Nord. Aux États-Unis seulement, on compte près d'un millier d'écrans d'étanchéité qui ont été aménagés à diverses fins depuis les années 40. Les premières utilisations consistaient principalement en l'aménagement de coupures étanches pour les fondations d'ouvrages de retenue d'eau et pour la réalisation d'excavations à sec. Depuis le début des années 80, l'écran SB est utilisé couramment comme outil de confinement des matières résiduelles ou des sols et des eaux contaminés. Cette technologie est d'ailleurs utilisée régulièrement à cette fin aux États-Unis dans le cadre de projets réalisés sous la supervision de l'United States Environmental Protection Agency (USEPA) et a fait l'objet de plusieurs études de leur part et de la part d'autres organismes et spécialistes à travers le monde.

Il s'agit aujourd'hui d'une technologie éprouvée et bien documentée dont l'efficacité n'est plus à démontrer et qui, selon une évaluation réalisée par la USEPA à l'endroit de plusieurs écrans d'étanchéité aménagés à différents sites d'enfouissement aux États-Unis (USEPA, 1998), constitue un système de confinement efficace et durable.

Les nombreux avantages offerts par les écrans SB sur les autres technologies disponibles, rendent souvent des plus judicieux le choix de cette technologie, spécialement dans les cas où le site visé présente des conditions telles que celles rencontrées au site du L.E.S. de St-Thomas.

2.3 Application de la technologie sol-bentonite au site

Le site de DRN possède plusieurs caractéristiques propices à la construction d'un écran d'étanchéité en SB. En effet, la topographie du site est plutôt plane, aucun problème majeur d'espace requis pour le déploiement du chantier ne se pose et un aquitard très compétent pour assurer l'ancrage de l'écran et l'imperméabilisation verticale du site est présent sur une épaisseur d'environ 40 m. D'autre part, les sols dans lesquels l'excavation nécessaire à la construction de l'écran sera réalisée sont très fins, limitant ainsi grandement les risques de pertes de boue durant les travaux d'excavation et diminuant ainsi les risques d'instabilité des parois de la tranchée. Notons que la granulométrie des sols à excaver pour la construction de l'écran est telle que ceux-ci peuvent être réutilisés, du moins en partie, pour le remblai.

En raison de contraintes locales d'espace et de façon à favoriser un meilleur contrôle de la qualité, il est prévu que la préparation du remblai SB soit effectuée sur une aire de mélange spécialement aménagée à cette fin et située en retrait de la tranchée.

Compte tenu de la profondeur relativement importante de l'écran d'étanchéité, l'excavation ne pourra être réalisée en totalité à l'aide d'une pelle mécanique. L'utilisation d'une benne preneuse sera nécessaire, du moins pour certains tronçons de l'écran.

2.4 Technologie alternative

D'autres technologies ont été étudiées pour la construction de l'écran d'étanchéité au site de DRN. Parmi celles-ci, la technologie d'écran en ciment-bentonite (CB) s'avère la plus intéressante après la technologie d'écran en sol-bentonite.

L'écran d'étanchéité en CB est obtenu en creusant une tranchée dont les parois sont soutenues par un coulis ciment-bentonite. Ce coulis est autodurocissable, ce qui rend inutile toute substitution ultérieure par un autre matériau. Il est constitué d'eau, de ciment, de bentonite et d'un retardateur de prise. L'écran d'étanchéité est construit par panneaux et le raccordement entre ceux-ci se fait lorsque le coulis est encore mou. Il y a donc interpénétration parfaite des remplissages de tous les panneaux et absence de joints.

Il est à noter que le ciment Portland conventionnel ne permet généralement pas d'atteindre des valeurs de conductivité hydraulique inférieures à 1×10^{-6} cm/s. Des ciments spéciaux contenant du laitier de haut-fourneau, des cendres volantes et/ou de la fumée de silice sont habituellement utilisés pour construire des écrans d'étanchéité en CB dont la conductivité hydraulique doit être inférieure à 1×10^{-6} cm/s.

Des essais de perméabilité réalisées au laboratoire QUÉFORMAT ont montré qu'il est possible d'atteindre des valeurs de conductivité hydraulique respectant le critère d'imperméabilisation exigé dans le Projet de Règlement pour un coulis ciment-bentonite constitué d'un ciment spécial. En effet, des conductivités hydrauliques inférieures à 3×10^{-8} cm/s ont été obtenues pour un mélange constitué de 5,5 % de bentonite (Barakade 90), de 0,15 % de retardateur de prise (Aquafix) et de 15 % de ciment composé de 20 % de ciment Portland type 10 et de 80 % de laitier de haut-fourneau. Ce ciment composé est produit en Ontario par Lafarge Canada et est surtout utilisé dans le domaine minier à titre de matériau de remplissage mélangé avec des résidus. Tous les détails des résultats obtenus pour ce coulis ciment-bentonite ainsi que les conditions d'essais sont inclus à l'annexe C.

Pour des raisons de coûts, la technologie d'écran en SB est privilégiée pour la construction de l'écran périphérique d'étanchéité au site de DRN. La technologie d'écran en CB pourrait toutefois être applicable. Étant donné son mode de construction par panneaux, la technologie CB pourrait avantageusement être utilisée comme mesure corrective dans l'éventualité où des défauts seraient détectés dans une section d'écran périphérique d'étanchéité lors de l'application du programme de suivi et de contrôle (voir chapitre 5). Il est à noter que des essais sont présentement en cours afin de vérifier la compatibilité chimique du coulis ciment-bentonite avec le lixiviat.

3 CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉCRAN PÉRIPHÉRIQUE D'ÉTANCHÉITÉ

3.1 Localisation de l'écran périphérique d'étanchéité

La localisation initiale théorique de l'écran a d'abord été établie par DRN en prenant en compte les limites de propriétés et de municipalités, la zone tampon d'au moins 50 m exigée à l'article 18 du Projet de Règlement et les aménagements existants et projetés de DRN. À partir de cette localisation initiale et pour chaque segment de l'écran périphérique d'étanchéité identifié au dessin 1241-3080-101, le positionnement de l'axe a été établi comme suit selon les critères fixés par DRN :

- segments IJLAB et EFG : à 1,5 m de la position théorique initialement établie par DRN;
- segments BC et GH : à 0,5 m de la position théorique initialement établie par DRN;
- segment CDE : a été optimisé de façon à maximiser le volume d'enfouissement disponible tout en permettant de préserver les installations du centre de compostage adjacentes;
- segment HI : a été optimisé selon les exigences de dégagements des équipements prescrites par Hydro-Québec pour la ligne électrique 120 kV située à proximité en considérant la machinerie qui pourrait être utilisée pour la construction de ce tronçon de l'écran périphérique d'étanchéité.

Toute l'information requise pour l'implantation de l'axe de l'écran périphérique d'étanchéité est présentée au dessin 1241-3080-101. Les raccordements de chaque tronçon rectiligne de l'axe de l'écran ont été faits au moyen de courbe ayant des rayons d'au moins 45 m afin de permettre la construction de ces sections de l'écran avec l'équipement susceptible d'être utilisé. La longueur totale de l'écran périphérique d'étanchéité est de 3 312 m.

3.2 Excavation de la tranchée

3.2.1 Plate-forme de travail

Pour la construction de l'écran périphérique d'étanchéité, une plate-forme de travail doit être aménagée à un niveau constant sur toute la longueur de son tracé afin de permettre de confiner adéquatement la boue de bentonite durant les travaux. Sur la base des informations topographique disponibles et des niveaux de la nappe phréatique observés, le niveau de la plate-forme a été établi à 23,5 m de façon à limiter le volume de remblai nécessaire à sa construction et à s'assurer que le niveau de la plate-forme excède d'au moins 2,0 m le niveau de la nappe phréatique sur toute la longueur de l'écran.

L'aménagement de la plate-forme de travail et des chemins de circulation sera laissé à la discrétion de l'entrepreneur retenu pour la réalisation des travaux. Celui-ci pourra donc ajuster la largeur de la plate-forme selon les équipements utilisés et les méthodes de travail choisies. Des plans d'aménagement de cette plate-forme devront toutefois être fournis par l'entrepreneur avant le début des travaux. Cette plate-forme de travail devra tenir compte de certaines contraintes d'espace reliées aux aménagements existants (cellule d'enfouissement C-3, ligne électrique de 120 kV et centre de compostage).

Au sud de la cellule d'enfouissement C-3, il est prévu que la benne preneuse et les camions qui transporteront les matériaux d'excavation ainsi que le remblai SB circuleront du côté extérieur de l'enceinte formée par la construction de l'écran périphérique d'étanchéité. Par conséquent, il est prévu que la largeur de la plate-forme de travail soit plus importante du côté intérieur de l'écran sauf entre les chaînages 2+980 et 3+200 où les travaux seront davantage réalisés à partir du côté extérieur de l'écran en raison de la présence de déchets enfouis à proximité. Typiquement, la largeur totale de la plate-forme de travail pourrait être comprise entre 15 et 25 m selon l'espace disponible, l'équipement utilisé et les méthodes de travail choisies.

3.2.2 Largeur de l'écran

Selon les exigences du Projet de Règlement, l'écran périphérique doit avoir une largeur minimale de 1,0 m. Bien que l'écran d'étanchéité devra supporter une charge hydraulique élevée à la suite du rabattement du niveau de la nappe phréatique à l'intérieur de celui-ci (de l'ordre de 25 m), aucun problème de claquage hydraulique de l'écran n'est susceptible de se produire dans le cas présent. En effet, l'écran d'étanchéité ne sera pas soumis à un rehaussement du niveau de l'eau retenu mais bien à un rabattement de la nappe phréatique du côté intérieur de l'écran, augmentant ainsi les contraintes effectives prévalant dans le remblai SB constituant l'écran. Par conséquent, les critères de gradient hydraulique maximal admissible, développés pour les coupures étanches construites sous des barrages pour éviter les problèmes de claquage hydraulique, ne sont pas applicables dans ce cas. Mentionnons finalement que la pratique courante est de construire des écrans d'étanchéité en SB dont la largeur typique est de 0,9 m (Fang, H.-Y., 1991, USEPA, 1998, Evans, J.C., 1994a). Conséquemment, la largeur prévue de l'écran périphérique d'étanchéité est de 1,0 m, en accord avec le critère du Projet de Règlement et les règles de l'art.

3.2.3 Profondeur de l'écran

Afin de respecter les exigences du Projet de Règlement, l'écran périphérique d'étanchéité doit s'ancrer sur une profondeur d'au moins 1,0 m dans une couche de sols naturels ayant une conductivité hydraulique égale ou inférieure à 1×10^{-6} cm/s sur une épaisseur minimale de 6,0 m.

Les données nécessaires à l'établissement du niveau à partir duquel ce critère d'imperméabilité est atteint ont été recueillies dans le cadre des travaux de reconnaissance dont les résultats ont été présentés dans le rapport d'étude géotechnique, hydrogéologique et environnemental du site (TECSULT, août 2003).

Une analyse approfondie des résultats des essais de perméabilité *in situ* et en laboratoire, des sondages au piézocône, de la description des échantillons non remaniés prélevés au moyen de tubes à parois minces et des essais d'identification réalisés a permis de déterminer le niveau

d'ancrage requis. Les variations des niveaux du contact stratigraphique entre la couche de transition et le dépôt argileux homogène observées d'un sondage à l'autre, de même que la stratification marquée d'horizons de perméabilité variable dans les dépôts de transition, ont mis en évidence le besoin d'étudier avec soin l'ensemble des informations disponibles.

La coupe longitudinale dans l'axe de l'écran présentée au dessin 1241-3080-102 indique le niveau d'ancrage projeté de l'écran. De façon spécifique, ce profil a été déterminé en considérant les éléments suivants :

- Les sondages au piézocône, généralement réalisés très près de l'axe de l'écran périphérique d'étanchéité, sont des sondages effectués en continu (à partir de 20 m de profondeur jusqu'à environ 5 m sous le niveau du toit du dépôt argileux homogène) pour lesquels des mesures sont effectuées à tous les centimètres et dont l'interprétation des mesures effectuées (pression interstitielle, résistance en pointe et en friction) reflètent la conductivité hydraulique et la résistance des sols rencontrés. Conséquemment, les résultats de ces sondages sont considérés comme adéquats pour détecter des horizons perméables et pour déterminer le niveau à partir duquel la conductivité hydraulique des sols est égale ou inférieure 1×10^{-6} cm/s de façon continue sur une épaisseur d'au moins 6 m et ceux-ci sont prioritairement considérés. Notons également que selon le système de classification des sols utilisé pour l'interprétation des résultats des sondages au piézocône CPTU-101 à -140 (Robertson P.K., 1990), la conductivité hydraulique de l'unité #3 (argile à argile silteuse), soit l'unité considérée pour établir le niveau à partir duquel la conductivité hydraulique des sols est égale ou inférieure à 1×10^{-6} cm/s, est comprise entre 1×10^{-8} à 1×10^{-7} cm/s.
- Les distances séparant les différents sondages de l'axe de l'écran périphérique d'étanchéité doivent certainement être considérées. À ce sujet, notons que les distances relativement importantes entre les sites des forages F-3, F-4, F-7 et E-100 et l'axe de l'écran périphérique d'étanchéité prévu permettent d'expliquer les différences de niveaux interprétés pour l'établissement du niveau d'ancrage.

- Les niveaux à partir desquels la conductivité hydraulique des sols est égale ou inférieure à 1×10^{-6} cm/s de façon continue sur une épaisseur d'au moins 6 m établis aux sites de forage sont généralement le résultat d'une interpolation d'un niveau entre deux échantillons prélevés ou entre deux lanternes de piézomètres où la conductivité hydraulique passe d'une valeur supérieure à une valeur inférieure à 1×10^{-6} cm/s.
- Les niveaux à partir desquels la conductivité hydraulique des sols est égale ou inférieure à 1×10^{-6} cm/s selon les informations obtenues aux sites de forages F-1, F-5 et F-6 correspondent assez bien aux niveaux où est atteint le critère d'imperméabilité selon l'interprétation des résultats des sondages au piézocône adjacents.
- Au site du forage F-2, la lanterne du piézomètre O-101 pour lequel l'essai de perméabilité réalisé a donné une conductivité hydraulique de 2×10^{-6} cm/s, a été installé entre les niveaux -4,66 et -6,26 m. Or, au sondage au piézocône CPTU-110, soit celui qui a été réalisé le plus près de F-2, des horizons dont la conductivité hydraulique est supérieure (unités de classification 4 et 5 : silt argileux à argile silteuse et sable silteux à silt sableux) ont été rencontrés jusqu'au niveau -5,2 m. Il est donc fort probable que la conductivité hydraulique globale mesurée au piézomètre O-101 soit influencée par des horizons plus perméables interceptés dans la partie supérieure de la lanterne de ce piézomètre. Ainsi, l'interprétation des sondages au piézocône adjacents peut être utilisée pour établir de façon plus fiable le niveau à partir duquel la conductivité hydraulique des sols est égale ou inférieure à 1×10^{-6} cm/s de façon continue sur une épaisseur d'au moins 6 m.
- Le profil du niveau d'ancrage de l'écran périphérique d'étanchéité a été établi à 1,0 m sous le niveau à partir duquel la conductivité hydraulique des sols est égale ou inférieure 1×10^{-6} cm/s de façon continue sur une épaisseur d'au moins 6 m selon les résultats des sondages au piézocône CPTU-101 à -140. De façon à limiter le nombre de changements de pente dans ce profil et à éliminer des points hauts, le niveau d'ancrage au droit des sondages au piézocône CPTU-106 et -120 a été placé à plus de 1,0 m sous le niveau où le critère d'imperméabilité est atteint selon l'interprétation des résultats à ces sondages. Le niveau

d'ancrage au droit de ces sondages correspond au niveau interpolé à partir du niveau d'ancrage établi au droit des sondages adjacents.

- À noter que de minces lits (épaisseur inférieure à 5 cm) silteux (unités de classification 4 et 5) rencontrés aux sondages au piézocône CPTU-104, -107, -111, -116, -118, -135 et -136 ont été négligés dans l'interprétation du niveau à partir duquel la conductivité hydraulique des sols est égale ou inférieure 1×10^{-6} cm/s de façon continue sur une épaisseur d'au moins 6 m. Ces minces horizons dont la conductivité hydraulique est estimée comme étant inférieure à 1×10^{-5} cm/s ne sont pas susceptibles d'augmenter la conductivité hydraulique globale des sols environnants au-delà de la valeur prescrite. De plus, selon les résultats obtenus pour les sondages au piézocône adjacents, l'étendue latérale de ces horizons est limitée et ils n'apparaissent pas s'interconnecter avec des horizons plus perméables et plus épais.

En considérant le niveau de la plate-forme de travail (23,5 m) et le profil d'ancrage, la profondeur de l'écran périphérique d'étanchéité varie entre 28,6 et 38,2 m et est en moyenne 33,2 m. La surface totale de l'écran périphérique d'étanchéité est de près de 110 000 m².

3.2.4 Stabilité des parois de la tranchée

Durant les travaux d'excavation nécessaires à la construction de l'écran d'étanchéité, les parois de la tranchée seront soutenues par la boue de bentonite jusqu'au moment où le remblai SB sera mis en place.

Afin d'assurer la stabilité des parois de la tranchée, le poids volumique de la boue de bentonite en place dans la tranchée devra être suffisamment élevé. En raison de la profondeur relativement importante de l'écran périphérique d'étanchéité et de la nature des sols dans lesquels la tranchée sera excavée, des quantités relativement importantes de particules de sable fin et de silt seront mises en suspension dans la boue de bentonite. Cet apport de particules augmentera la densité de la boue de bentonite dans la tranchée et permettra ainsi d'assurer la stabilité des parois de la tranchée. Toutefois, la densité et la viscosité de la boue de

bentonite ne devront pas être trop élevées de façon à ne pas rendre plus difficile les conditions de mise en place du remblai SB. Le programme de contrôle de la qualité relatif aux propriétés de la boue de bentonite est présenté à la section 4.1.3.

3.3 Remblai de sol-bentonite

Les sections suivantes traitent de la composition, des propriétés, de la préparation et de la mise en place du remblai SB qui sera utilisé pour former l'écran périphérique d'étanchéité. Différents mélanges SB ont été étudiés selon la disponibilité des matériaux. Les propriétés pertinentes de ces mélanges ont été déterminées à partir d'essais en laboratoire dont il sera question aux sections suivantes. Tous les détails des résultats obtenus ainsi que les conditions d'essais sont inclus à l'annexe C. Les essais de laboratoire ont été réalisés par le laboratoire QUÉFORMAT.

3.3.1 Sols disponibles pour la préparation du remblai sol-bentonite

3.3.1.1 Sols à excaver

Des analyses granulométriques et des essais de teneur en eau ont été effectués dans le cadre de l'étude géotechnique, hydrogéologique et environnementale réalisée par TECSULT. La synthèse de ces essais en laboratoire pour les sols qui seront excavés pour la construction de l'écran périphérique d'étanchéité est présentée au tableau 3.1² et à la figure 3.1. Compte tenu de la plus grande représentativité des analyses granulométriques effectués aux sondages F-15 et F-16, où un échantillonnage en continu des sols a été effectué, du nombre d'analyses effectuées par sondage et de la méthode d'échantillonnage utilisée aux forages O-100, E-100, N-100 et S-100 (méthode qui est susceptible d'avoir remanié les sols avant leur échantillonnage et de conduire à une sous-évaluation du pourcentage de particules fines des sols en place), il est estimé que les sols à excaver sur toute la profondeur de l'écran contiennent dans

² Tous les tableaux sont regroupés à l'annexe B.

l'ensemble environ 40 à 45% de particules fines (<0,08 mm). La teneur en eau naturelle moyenne de ces sols est estimée à 27 %.

Compte tenu qu'il est avantageux de réutiliser les sols excavés pour le matériau de remblai, des essais ont d'abord été réalisés sur un mélange entièrement constitué de sols du site. Un échantillon composite de sols (#1) a été constitué à partir des échantillons résiduels prélevés lors des travaux de reconnaissance effectués à l'automne 2001. Il s'agit des échantillons F-4-CF-1 à CF-9, F-5A-CF-1 à CF-9, F-6A-CF-1 à CF-7, F-7-CF-1, F-7-CF-4A, F-7-CF-5A et F-7-CF-6A qui ont été choisis afin de constituer un mélange représentatif de l'ensemble des sols qui seront excavés pour la construction de l'écran périphérique d'étanchéité. La courbe granulométrique de cet échantillon composite est montrée à la figure 3.1. Un deuxième échantillon composite de sols (SB-4) provenant du site a été préparé à partir des échantillons F-16-CR-1 à CR-13 prélevés lors des travaux de reconnaissance effectués au printemps 2002. La courbe granulométrique théorique estimée à partir des analyses granulométriques de chacun des sous-échantillons utilisés pour la constitution de ce deuxième échantillon composite est montrée à la figure 3.1.

Ces échantillons composites de sols ont été utilisés pour les essais décrits dans les sections suivantes. Soulignons que le premier échantillon composite contenait 40 % de particules fines et que sa teneur en eau a été amenée à 28,7 %, soit à la teneur en eau naturelle du mélange des échantillons dont il était composé. Le deuxième échantillon composite contenait près de 45 % de particules fines et sa teneur a été amenée à 28 %, soit approximativement à la teneur en eau naturelle estimée de l'ensemble des sols qui seront excavés pour la construction de l'écran.

3.3.1.2 Matériaux d'emprunt disponibles

Tel qu'il sera discuté à la section 3.3.2.1, les valeurs d'affaissement obtenues pour des mélanges SB constitués à partir des deux échantillons de sol composite représentatifs de l'ensemble des sols qui seront excavés pour la construction de l'écran sont plutôt élevées. Dans ce contexte, des matériaux d'emprunt qui pourraient être utilisés pour améliorer spécifiquement

cette propriété du mélange SB ont été identifiés. Il s'agit de sols naturels ou traités par concassage et tamisage dont la teneur en eau est faible et dont la granulométrie est plus grossière et étendue que celles des sols présents sur le site de DRN. Six (6) matériaux d'emprunt provenant de trois (3) sites différents situés à proximité du site de DRN ont été étudiés. La localisation de ces trois sites est indiquée à la figure 3.2.

Afin de caractériser adéquatement ces matériaux d'emprunt, une visite de chaque site d'exploitation a été effectuée le 4 juillet 2002 par un géologue senior de TECSULT. Ces visites ont permis de constater le mode d'exploitation, les quantités disponibles, la nature des matériaux et de procéder à un échantillonnage. Le tableau 3.2 présente la synthèse des informations relatives aux sites d'exploitation et aux matériaux d'emprunt étudiés. La figure 3.3 présente les courbes granulométriques obtenues pour les échantillons prélevés par TECSULT ainsi que les teneurs en eau de ces échantillons. Des résultats d'analyses granulométriques ont également été fournis par les exploitants de certaines sources d'emprunt étudiées. Les résultats de ces analyses sont présentés à la figure 3.4.

Sur la base de la granulométrie, de la teneur en eau, de la disponibilité et du prix unitaire estimé des matériaux, la criblure de pierre provenant de la Sablière Lafarge (échantillon # 3 portant le code de produit 810) et le 0-25 mm fabriqué sur le site de la Carrière Martial et Pelland (échantillon #2) apparaissent être les matériaux les plus intéressants pour être utilisés dans le mélange SB. Des essais en laboratoire ont d'ailleurs été réalisés pour des mélanges SB constitués en partie à partir de ces matériaux.

3.3.2 Propriétés du remblai sol-bentonite

3.3.2.1 Affaissement du remblai sol-bentonite

L'affaissement du remblai SB, déterminé selon la méthode couramment utilisée pour mesurer cette propriété pour le béton frais, permet d'évaluer indirectement la pente avec laquelle le remblai SB est susceptible de se placer dans la tranchée d'excavation. Compte tenu des valeurs d'affaissement relativement élevées obtenues pour le premier échantillon composite

constitué des sols qui seront excavés pour la réalisation de l'écran (échantillon #1 (sans bentonite) : 160 mm et échantillon #3 (échantillon #1 avec ajout de 1 % de bentonite) : 110 mm), des essais additionnels d'affaissement ont été réalisés pour différents mélanges. Pour ces mélanges, les deux matériaux d'emprunt les plus appropriés identifiés à la section précédente ont été utilisés avec les sols qui seront excavés dans la partie inférieure de la tranchée requise pour la construction de l'écran. Des essais d'affaissement ont par ailleurs été réalisés sur le deuxième échantillon composite (SB-4) constitué des sols qui seront excavés pour la construction de l'écran.

Le tableau 3.3 présente l'ensemble des résultats des essais d'affaissement. La bentonite BARAKADE 90 produite par la compagnie «Bentonite Performance Minerals» et couramment utilisée au Québec, a été employée pour la constitution des mélanges contenant de la bentonite.

Il est à noter que l'ajout de bentonite sèche et l'utilisation de matériaux d'emprunt plus grossiers et ayant une teneur en eau plus faible que celle des sols du site permettent de réduire l'affaissement des mélanges SB.

3.3.2.2 Conductivité hydraulique du remblai sol-bentonite

La conductivité hydraulique du mélange de SB, propriété fondamentale de l'écran périphérique d'étanchéité, a été déterminée en laboratoire pour diverses conditions d'essais. Elle a d'abord été déterminée en cellule triaxiale à des niveaux de contraintes effectives verticales de 50 et 100 kPa (à mi-hauteur de l'échantillon). Ces contraintes ont été choisies afin d'évaluer la sensibilité de la conductivité hydraulique par rapport à ce paramètre et de considérer adéquatement la plage de contrainte dans laquelle le remblai sol-bentonite est susceptible de se trouver. Le gradient hydraulique utilisé pour ces essais est environ 20, soit approximativement équivalent au gradient auquel sera soumis l'écran périphérique d'étanchéité. À noter que les dimensions des échantillons, soit un diamètre de près de 10 cm et une hauteur initiale de l'ordre de 11 cm, étaient suffisamment grandes pour permettre la réalisation des essais sur la totalité des mélanges.

Afin de déterminer le pourcentage de bentonite requis dans le mélange et de s'assurer que la conductivité hydraulique de l'écran périphérique d'étanchéité est égale ou inférieure à 1×10^{-6} cm/s, des essais de perméabilité ont été effectués pour différents pourcentages de bentonite (0, 1, 2 et 3 %). Rappelons que les pourcentages de bentonite (de marque «BARAKADE 90») considérés pour les mélanges de SB sont exprimés en terme de masse sèche par rapport à la masse de sol. Les résultats de ces essais de perméabilité sont résumés au tableau 3.3.

Tel que décrit à la section 3.3.2.4, des essais oedométriques ont été réalisés sur deux échantillons de SB. Deux essais de perméabilité ont alors été réalisés en cours d'essais à des niveaux de chargement correspondant à des contraintes effectives de 48 et 95 kPa. Les résultats de ces essais sont également présentés au tableau 3.4

Lors de la réalisation des essais de compatibilité chimique dont il sera question à la section 3.3.2.3, la conductivité hydraulique du premier échantillon composite constitué des sols qui seront excavés pour la réalisation de l'écran auquel 1% de bentonite a été ajouté (échantillon #3) a été déterminée préalablement à la circulation de lixiviat à travers le mélange SB. Il s'agit d'essais réalisés dans un moule à parois rigides à une température de 8°C. Les valeurs de conductivité hydraulique à l'eau obtenues pour cette température sont de $1,75 \times 10^{-7}$ et $1,79 \times 10^{-7}$ cm/s sous une contrainte effective de 50 kPa et un gradient hydraulique d'environ 16.

Pour l'ensemble des mélanges SB soumis à des essais de perméabilité, la conductivité hydraulique mesurée en laboratoire est d'au plus 4×10^{-7} cm/s. Les valeurs de conductivité hydraulique obtenues pour les échantillons de sol sans bentonite sont également inférieures ou égales à 4×10^{-7} cm/s, indiquant que dans le cas où il y aurait un mauvais mélange du remblai SB durant la construction de façon à ce qu'une portion du remblai ne contienne aucune bentonite, le critère réglementaire d'imperméabilisation de l'écran serait tout de même respecté. Le remplacement de la partie supérieure des sols à excaver pour la construction de l'écran par des matériaux d'emprunt diminue légèrement le pourcentage de particules fines du remblai par rapport au mélange constitué de la totalité des sols à excaver mais permet d'obtenir un mélange dont la granulométrie est plus étalée résultant en une conductivité hydraulique encore plus faible.

3.3.2.3 Compatibilité chimique du remblai sol-bentonite avec le lixiviat

La conductivité hydraulique du mélange SB est reliée aux caractéristiques des constituants minéraux du mélange mais peut être affectée à plus ou moins long terme par la présence de contaminants dans l'eau interstitielle.

Ainsi, même si le mélange SB rencontre à priori les critères de conductivité hydraulique, il est nécessaire de s'assurer de la pérennité du niveau d'étanchéité, en particulier pour le confinement de matières résiduelles dont le lixiviat peut affecter de façon défavorable la conductivité hydraulique de l'écran périphérique d'étanchéité. Il s'agit de vérifier la compatibilité chimique de l'écran avec le lixiviat du site.

Notons que des problèmes de compatibilité chimique cités dans la littérature concernent principalement des écrans d'étanchéité construits sur des lieux fortement contaminés ou encore pour des lieux d'enfouissement de déchets dangereux. Dans ce contexte, une incompatibilité chimique de l'écran avec un lixiviat relativement peu agressif généré par des déchets domestiques, tel que celui du site de St-Thomas, est peu probable. Afin de le vérifier, des essais de compatibilité chimique ont été réalisés avec deux échantillons de lixiviat prélevés au site de DRN.

Les essais de compatibilité chimique réalisés consistent à faire circuler le lixiviat à travers l'échantillon de SB et de suivre l'évolution de la conductivité hydraulique avec le temps. Si la conductivité hydraulique n'augmente pas significativement, il n'y a pas de problème de compatibilité chimique.

Les essais de compatibilité chimique ont été réalisés à l'Université de Sherbrooke, sous la supervision de Dr Guy Lefebvre, professeur titulaire en génie civil, sur deux échantillons d'un mélange SB montés à l'intérieur de cellules à parois rigides. Le mélange SB choisi pour ces essais correspond au premier échantillon composite constitué des sols qui seront excavés pour la construction de l'écran périphérique d'étanchéité auquel 1% de bentonite a été ajouté (échantillon #3). Une charge a été appliquée sur ces échantillons de façon à maintenir une

contrainte effective de 50 kPa à la mi-hauteur des échantillons. Les échantillons ont d'abord été soumis à un régime d'écoulement avec de l'eau potable sous des gradients hydrauliques de près de 16. Cette procédure a permis d'assurer la saturation des échantillons malgré l'absence de contre-pression et de déterminer la conductivité hydraulique à l'eau des échantillons à l'intérieur de moules à parois rigides. À noter que les cellules d'essais fabriqués en acier inoxydable et en plexiglas, soit en matériau inerte, ont été utilisées dans le but d'éviter toute réaction chimique avec le lixiviat. Afin d'éviter un colmatage biologique rapide de l'échantillon et non représentatif des conditions de terrain et qui aurait pu masquer une éventuelle augmentation de la conductivité hydraulique attribuable à l'incompatibilité chimique, les essais ont été réalisés dans une chambre froide où la température a été maintenue à 8°C. Cette température permet de limiter l'activité biologique et est représentative des conditions de terrain. En effet, cette température se situe à l'intérieur de la plage des températures de l'eau souterraine observée sur le terrain laquelle concorde avec les valeurs typiques citées dans la littérature. Des températures de 8,2°C au puits d'observation N-102 entre 30,4 et 31,9 m de profondeur, 7,4°C au puits d'observation P-28 entre 26,6 et 29,6 m de profondeur et de 7,9°C au puits d'observation F-304A entre 7,2 et 8,7 m de profondeur mesurée le 30 avril 2002 par le technicien de TECSULT. Des températures variant entre 9,1 et 9,3°C à 4 m de profondeur ont également été observée par HGE lors d'un essai de pompage réalisé entre le 17 et le 20 décembre 2001 au puits de pompage PE-300 installé près du puits d'observation F-308.

Tel que mentionné dans la littérature (Fang, H. Y., 1991, D'Appolonia, D. J., 1980), les essais de compatibilité chimique doivent être d'une durée suffisante pour permettre la circulation du lixiviat équivalente à au moins deux volumes des pores à travers l'échantillon de SB. De plus, si la conductivité hydraulique semble toujours augmenter après la circulation de ce volume, l'essai doit être prolongé jusqu'à une stabilisation de la conductivité hydraulique.

À l'examen des résultats analytiques pour les échantillons de lixiviat prélevés par HGE en 2001 sur l'ensemble du site d'enfouissement de DRN (Caractérisation des eaux de lixiviation - LES de Sainte-Geneviève-de-Berthier, HGE, octobre 2001), on observe des variations des concentrations d'une campagne d'échantillonnage à l'autre et d'une station d'échantillonnage à l'autre. De plus, un lixiviat dit «chargé» ne présente pas des concentrations élevées pour tous

les paramètres de façon simultanée. Devant toutes ces variations, typiques du caractère évolutif d'un lixiviat de déchets domestiques, il peut être difficile de sélectionner un échantillon de lixiviat représentatif de l'ensemble du lixiviat qui sera généré dans la nouvelle cellule et qui pourrait être en contact avec l'écran ou un échantillon de lixiviat le plus susceptible d'affecter sa conductivité hydraulique. Ainsi, des essais de compatibilité chimique ont été réalisés avec deux échantillons de lixiviat différents afin de comparer l'effet de ces lixiviats sur la conductivité hydraulique du mélange SB. Ces deux échantillons de lixiviat ont été prélevés le 4 juillet 2002 par HGE aux stations d'échantillonnage L-102 et L-104 installées à l'endroit de la cellule d'enfouissement C-1. Ces deux stations d'échantillonnage ont été sélectionnées parce que les résultats analytiques pour les échantillons de lixiviat prélevés par HGE en 2001 indiquent que c'est à ces deux stations d'échantillonnage que les concentrations maximales ont le plus souvent été observées pour les paramètres analysés.

Les deux échantillons de lixiviat prélevés pour la réalisation des essais de compatibilité chimique ont été soumis à une série d'analyses physico-chimiques et bactériologiques afin de les caractériser adéquatement. Le tableau 3.5 présente les résultats de ces analyses ainsi que les résultats d'analyses effectuées sur un échantillon de lixiviat prélevé le 16 avril 2002 à la station d'échantillonnage L-303 et sur un échantillon d'eau souterraine prélevé au puits d'observation F-304A le 17 avril 2002.

Le rapport complet des essais de compatibilité chimique est inclus à l'annexe C. La figure 3.6 montre l'évolution de la conductivité hydraulique selon le volume de liquide circulé pour les deux échantillons de lixiviat utilisés. Les résultats indiquent que le passage de lixiviat à travers l'échantillon de SB n'entraîne aucune augmentation de la conductivité hydraulique. Au contraire, une diminution est observée. Dans le cas de l'essai pour lequel l'échantillon de lixiviat L-104 a été utilisé, une faible réduction graduelle de la conductivité hydraulique a été observée jusqu'à la percolation d'environ 1,5 fois le volume équivalent des pores de l'échantillon. La conductivité hydraulique s'est par la suite stabilisée autour de $1,4 \times 10^{-7}$ cm/s. Dans le cas de l'essai pour lequel l'échantillon de lixiviat L-102 a été utilisé, une diminution nettement plus marquée de la conductivité hydraulique à des valeurs voisines de 6×10^{-9} cm/s a été observée après le passage d'un peu plus d'un volume équivalent des pores de l'échantillon. Ce dernier résultat,

obtenu dans le cas du lixiviat le plus chargé en solides totaux, serait associé à un colmatage de l'échantillon SB par le lixiviat.

En résumé, les résultats d'essais de percolation de lixiviat à travers un mélange SB indiquent qu'aucun problème de compatibilité chimique ne se pose pour l'écran d'étanchéité SB.

Il est important de mentionner que dans des conditions normales d'opération d'enfouissement dans la zone d'agrandissement du L.E.S., le lixiviat n'est pas susceptible d'entrer en contact avec l'écran périphérique d'étanchéité. En effet, en raison du captage du lixiviat en fond de cellule et du rabattement de la nappe phréatique à l'intérieur de l'enceinte formée par l'écran périphérique d'étanchéité, une situation de piège hydraulique prévaut et l'écoulement de l'eau souterraine est dirigé vers le fond de l'excavation de la cellule.

3.3.2.4 Autres propriétés du remblai sol-bentonite

En plus des essais cités précédemment, des essais visant à déterminer les principales propriétés physiques des mélanges SB ont été réalisées.

Un essai visant à déterminer les limites d'Atterberg a été réalisé sur la fraction fine du premier échantillon composite (#1) constitué des sols qui seront excavés pour la réalisation de l'écran. Un deuxième essai visant à déterminer les limites d'Atterberg a été réalisé sur la fraction fine du premier échantillon composite auquel 2 % de bentonite a été ajouté (#2). Les valeurs de limite de liquidité obtenues sont de 22 et 24 % pour les échantillons #1 et #2 respectivement. Ces essais ont également permis de constater qu'à la suite de l'ajout de 2 % de bentonite, le mélange, initialement qualifié de non plastique, peut être qualifié de faiblement plastique. La densité relative des grains a également été déterminée en laboratoire pour le premier échantillon composite (#1) constitué des sols qui seront excavés pour la construction de l'écran. La valeur obtenue correspond à 2,72.

Deux essais de compression oedométrique ont été réalisés. Le premier échantillon composite constitué des sols qui seront excavés pour la réalisation de l'écran auquel 1 % de bentonite a

été ajouté (échantillon #3) et l'échantillon constitué de 40 % de la partie inférieure des sols qui seront excavés pour la construction de l'écran et de 60 % de criblure de pierre provenant de la Sablière Lafarge auquel 1 % de bentonite a été ajouté (échantillon SB-9) ont été soumis à ces essais. Le diamètre de la cellule oedométrique utilisée est de 10 cm et la hauteur initiale de l'échantillon était de 2,4 cm. À noter que pour l'échantillon SB-9, la fraction du mélange dont la dimension des particules est supérieure à 5 mm a dû être rejetée par tamisage afin d'obtenir des résultats valides compte tenu de la hauteur de l'échantillon monté dans la cellule oedométrique. Les coefficients de compressibilité mesurés se comparent bien aux valeurs publiées dans la littérature (D'Appolonia, 1980) pour des sols similaires. Tel que mentionné précédemment à la section 3.3.2.1, la conductivité hydraulique des ces deux mélanges SB a été déterminée à des contraintes de 48 et 95 kPa lors de la réalisation de ces essais de compression oedométrique.

3.3.3 Composition du remblai sol-bentonite visée

La pente de mise en place du remblai SB dans la tranchée varie généralement entre 5H : 1V et 10H : 1V pour un affaissement compris entre 50 et 150 mm. Compte tenu de la profondeur relativement importante de l'écran périphérique d'étanchéité au site de DRN, il est préférable que la pente de mise en place du remblai SB soit plutôt raide (une pente de près de 5H : 1V est visée). En effet, une pente plutôt raide permettra, entre autres, de réduire la longueur d'ouverture de la tranchée requise et de favoriser par le fait même la stabilité des parois de la tranchée et les conditions générales de mise en oeuvre (taux de production, quantité de boue de bentonite requise, contrôle de la qualité, etc.). À prime abord, il est difficile d'évaluer précisément la pente de mise en place du mélange SB. Les essais d'affaissement réalisés dont il a été question précédemment permettent tout de même de l'apprécier. Compte tenu qu'une pente plutôt raide est préconisée pour la mise en place du remblai SB, un mélange dont l'affaissement se situe entre 50 et 100 mm devrait être visé à priori.

Afin de limiter autant que possible l'infiltration d'eau souterraine à travers l'écran périphérique d'étanchéité, il s'avère avantageux de réduire au minimum sa conductivité hydraulique. Compte

tenu des résultats d'essais de perméabilité obtenus, une conductivité hydraulique de 4×10^{-8} cm/s peut être visée pour le remblai SB.

Ainsi, afin d'atteindre le degré d'imperméabilité et l'affaissement voulus, le remblai SB sera constitué d'environ 75 % des sols provenant de la partie inférieure de l'excavation de la tranchée requise pour la construction de l'écran mélangés avec près de 25 % de matériaux d'emprunt granulaire ayant une faible teneur en eau (soit un matériau identique ou similaire aux matériaux d'emprunt étudiés) et au moins 2 % de bentonite sèche. Le mélange SB devra par ailleurs respecter le fuseau granulométrique montré à la figure 3.5.

Si requis, l'affaissement du mélange SB sera ajusté par l'ajout de bentonite sèche si le mélange est trop humide (affaissement trop élevé) ou par l'ajout de boue de bentonite si le mélange est trop sec (affaissement trop faible). Cet éventuel ajout de bentonite aura également pour effet de réduire la conductivité hydraulique du remblai SB.

3.3.4 Préparation et mise en place du remblai sol-bentonite

Afin de faciliter le contrôle du mélange du remblai SB, il est recommandé d'utiliser une aire de mélange centrale spécifiquement aménagée à cet effet et qui sera utilisée tout au long de la construction de l'écran. Cette méthode de travail contribue à augmenter sensiblement les coûts de construction mais facilite le contrôle du mélange du remblai SB. La surface de mélange aura pour première utilité d'accepter l'arrivage continu des matériaux d'emprunt et des sols excavés réutilisés dans le remblai SB et de permettre de mélanger uniformément le tout avec la quantité de bentonite requise. L'aire de mélange aura pour deuxième utilité de permettre l'entreposage temporaire des gâchées de mélange SB prêtes à être transportées graduellement à la tranchée pour remblayage. Typiquement, la surface de mélange pourrait faire environ $2\,500 \text{ m}^2$ (près de $35 \text{ m} \times 70 \text{ m}$). Elle sera constituée de deux parties afin de séparer les gâchées de mélange SB en cours de préparation de celles prêtes à être acheminées à la tranchée pour remblayage. Cette aire de mélange devra être aménagée sur une surface dure (cailloux et gravier, béton ou asphalte) de façon à éviter toute contamination du mélange par les particules des sols sous-jacents. Par ailleurs, des murets, de type «New Jersey» par exemple, seront installés au

périmètre de la zone de mélange de façon à faciliter les opérations de mélange, chargement et déchargement des matériaux. Il est à noter que l'aire de mélange sera aménagée par l'entrepreneur selon ses besoins spécifiques et en fonction des équipements utilisés. Notons que les sols et la bentonite utilisés dans le remblai sont habituellement mélangés à l'aide d'un bélier mécanique qui circule à plusieurs reprises sur les matériaux tout en les déplaçant continuellement.

Chaque gâchée de mélange SB sera soumise au programme de contrôle de la qualité présenté à la section 4.2. Après approbation du surveillant des travaux, le remblai SB sera chargé dans des camions pour son transport à l'emplacement de la tranchée. Au début du remblayage, le remblai sera déposé au fond de la tranchée au moyen d'une benne preneuse. Lorsque le remblai émergera à la surface de la tranchée, le mélange SB sera déversé en surface sur le remblai. Tel que décrit à la section 4.3, la mise en place du remblai SB sera également soumise au programme de contrôle de la qualité.

3.4 Protection de la partie supérieure de l'écran

Une digue temporaire de protection d'au moins 1,0 m de hauteur constituée du sable de surface disponible sur le site devra être mise en place graduellement moins d'une semaine après la construction de l'écran périphérique d'étanchéité. Ce remblai devra être mis en place sur un géotextile de type «TEXEL 7612» (ou équivalent approuvé) ayant une largeur d'au moins 4,0 m afin d'assurer la séparation adéquate des matériaux. Cette digue temporaire de protection permettra d'éliminer les risques de dessiccation de la partie supérieure de l'écran périphérique d'étanchéité et la protégera également contre le gel. Le recouvrement final des déchets qui seront enfouis à l'intérieur de l'enceinte formée par l'écran périphérique d'étanchéité prévu³ devra être mis en place de façon à protéger l'écran contre le gel et à acheminer les eaux de ruissellement à l'extérieur de l'enceinte formée par l'écran.

³ Les détails concernant le recouvrement final de la cellule d'enfouissement sont présentés dans le rapport d'étude d'ingénierie détaillée relatif à l'aménagement de la cellule d'enfouissement.

L'aménagement de chemins d'accès au-dessus de l'écran périphérique d'étanchéité devra également être réalisé de façon à assurer la protection de la partie supérieure de l'écran contre le gel et la dessiccation.

4 PROGRAMME DE CONTRÔLE DE LA QUALITÉ

Les travaux de construction de l'écran périphérique d'étanchéité seront soumis à un programme complet de contrôle de la qualité afin d'assurer que celui-ci remplisse adéquatement son rôle d'imperméabilisation latérale du site. Ce programme de contrôle de la qualité touche chacune des étapes de construction de l'écran. Il reprend les éléments clés des programmes de contrôle de la qualité préconisés par l'USACE et l'USEPA (US Army Corps of Engineers, 1997 et 1998 et US Environmental Protection Agency, 1998) et suggérés par des entrepreneurs américains spécialisés dans le domaine (Geo-Con et Geo-Solutions Inc.).

4.1 Excavation de la tranchée

4.1.1 Largeur et continuité de la tranchée

La largeur de la tranchée et de l'écran périphérique d'étanchéité est simplement contrôlée par la largeur des outils d'excavation. Ces derniers doivent être au moins aussi larges que l'écran périphérique d'étanchéité, soit 1,0 m.

Afin d'assurer la continuité de l'écran au(x) point(s) de raccordement entre deux sections distinctes, une ré-excavation du remblai SB sur une distance d'au moins 3,0 m (chevauchement) devra être effectuée.

4.1.2 Profondeur de la tranchée

Afin d'assurer l'atteinte du niveau d'ancrage de l'écran, la profondeur de la tranchée sera vérifiée au moyen de sondages au fil à plomb espacés d'au plus 6 m. De plus, les matériaux excavés en fond de tranchée seront inspectés visuellement par le technicien assurant le suivi des travaux afin de s'assurer que l'écran pénètre d'un moins un mètre la couche d'argile homogène. En cas de doute sur la nature des matériaux excavés provenant du fond de la tranchée, ceux-ci feront l'objet d'analyses granulométriques. Sur la base de ces résultats et des observations, la profondeur de la tranchée pourra être augmentée localement par rapport au

niveau théorique établi. Toutefois, en aucun cas le niveau d'ancrage de l'écran ne sera rehaussé par rapport au niveau théorique présenté au dessin.

Avant la mise en place du remblai, le niveau du fond de la tranchée devra être vérifié au moyen de sondages au fil à plomb espacés de 6 m. Tout matériau ayant pu s'accumuler au fond de la tranchée au-dessus du niveau d'ancrage prévu devra être excavé avant le remblayage.

4.1.3 Stabilité des parois de la tranchée

Tel que discuté à la section 3.2.4, les parois de la tranchée d'excavation seront retenues au moyen de la boue de bentonite jusqu'au moment où le remblai SB sera mis en place. Les propriétés de cette boue devront être étroitement vérifiées afin de s'assurer qu'elle remplisse bien son rôle. Ces propriétés seront contrôlées par des mesures de densité, de viscosité et de pourcentage de sable contenu dans la boue obtenues selon les méthodes d'essais prescrites dans la dernière édition de la norme RP 13B-1 de l'American Petroleum Institute (API) «Recommended Practice Standard Procedure for Field Testing Water-Based Drilling Fluids». Un minimum de 5 % de bentonite devra être utilisé pour la préparation de la boue. La bentonite utilisée devra être conforme aux exigences de la dernière édition de la norme 13A de l'American Petroleum Institute (API) «Specification for Oil-Well Drilling – Fluid Materials».

La densité et la viscosité de la boue de bentonite devront être vérifiées au moins deux fois par poste de travail (un peu après le début et un peu avant la fin de la période de travail) autant au niveau de la boue fraîchement préparée qu'au niveau de la boue en place dans la tranchée. Le pourcentage de sable contenu dans la boue de bentonite sera vérifié pour la boue en place et à la sortie du système de désablage dans le cas où des opérations visant à enlever des particules de sable s'avèreraient nécessaires. La boue de bentonite en place soumise au contrôle de la qualité sera prélevée en deux points d'échantillonnage différents, soit à environ 1,0 m sous la surface de la boue et à près de 1,0 m du fond de la tranchée.

La viscosité de la boue de bentonite mesurée au cône Marsh devra être d'au moins 40 secondes. Afin de limiter la décantation de particules grossières au bas de la colonne de

boue, le pourcentage de sable contenu dans la boue de bentonite en place dans la tranchée devra être inférieur à 10 %. Le poids volumique de la boue de bentonite en place dans la tranchée devra être inférieur à 13,4 kN/m³. Le poids volumique initial de la boue fraîchement préparée devra être d'au moins 10,03 kN/m³. Afin d'assurer un déplacement efficace de la boue de bentonite par le remblai SB, le poids volumique de la boue devra être inférieur à celui du remblai d'au moins 2,4 kN/m³.

Soulignons qu'un temps d'hydratation de la bentonite d'au moins 12 heures devra être alloué lors de la préparation de la boue. De l'eau propre, douce, neutre et ne contenant aucune substance susceptible d'affecter de façon défavorable les propriétés de la boue devra être utilisée. D'autre part, le niveau de la boue de bentonite devra être maintenu à 0,3 m ou moins de la surface de la plate-forme de travail en tout temps. Afin de permettre la formation du «gâteau-filtre» sur les parois d'excavation, la boue de bentonite devra par ailleurs être en contact avec les parois pendant au moins 24 h avant la mise en place du remblai SB.

4.2 Propriétés du remblai de sol-bentonite

Afin d'assurer le respect du critère d'imperméabilité de l'écran périphérique d'étanchéité, toutes les gâchées de remblai SB devront contenir au minimum 2 % de bentonite sèche et être constitués de matériaux dont la granulométrie respecte les exigences du fuseau granulométrique prescrit indiqué à la figure 3.5. Le pourcentage de bentonite ajoutée aux gâchées sera déterminé par calcul à partir du poids des sols utilisés et des teneurs en eaux de chacun des constituants. Des analyses granulométriques (Norme NQ 2501-025 – Sols- Analyse granulométrique des sols inorganiques) seront réalisées sur des échantillons représentatifs pour contrôler la granulométrie du remblai SB.

La qualité du mélange des gâchées de SB devra également être vérifiée afin d'assurer leur homogénéité. Une inspection visuelle des mélanges sera effectuée. Aucune motte d'argile, dont la présence peut être un signe d'hétérogénéité, ne sera tolérée. Au début des travaux, la méthode de mélange choisie par l'entrepreneur sera validée au moyen de plusieurs essais de lavage au tamis 0,08 mm (Norme BNQ 2560-350 – Granulats – Détermination par lavage de la

quantité de particules passant au tamis 0,08 mm) (au moins 1 par 100 m³) dont les résultats indiqueront l'atteinte d'un degré d'homogénéité satisfaisant par le pourcentage de particules fines. Afin de faciliter le contrôle de la qualité des gâchées de remblai SB et de favoriser l'homogénéité des mélanges, des gâchées représentant un volume d'au moins 1 000 m³ devront être préparées.

De façon générale, un échantillon représentatif de chaque gâchée sera soumis à une analyse granulométrique. À chaque changement de méthode de mélange utilisée et à tout changement dans la composition des mélanges de remblai SB, l'homogénéité des gâchées sera vérifiée au moyen de plusieurs essais de lavage au tamis 0,08 mm (au moins 1 par 100 m³).

L'affaissement du remblai SB sera vérifié pour chaque gâchée préparée à l'aide d'un échantillon représentatif. L'affaissement obtenu selon la méthode prescrite pour le béton frais dans la norme A23.2-5C devra être compris entre 50 et 100 mm. Celui-ci pourra être ajusté à la baisse en ajoutant davantage de bentonite sèche. À l'opposé, l'affaissement du remblai SB pourrait être augmenté si nécessaire par l'ajout de bentonite sous forme de boue. En aucun cas, la teneur en eau des sols ne pourra être augmentée par l'ajout d'eau, seule l'utilisation de boue de bentonite sera permise. En raison de la teneur en eau naturelle élevée des sols, aucun ajout de boue de bentonite significatif n'est toutefois prévu.

Notons que la teneur en eau sera déterminée pour chaque gâchée étant donné que celle-ci est requise pour chaque analyse granulométrique. Le poids volumique du remblai SB sera également déterminé pour chaque gâchée préparée à partir d'un échantillon représentatif.

Au début des travaux de même que pour tout changement significatif dans la composition du remblai SB, un essai de perméabilité devra être réalisé afin de vérifier l'atteinte du niveau d'imperméabilité voulue. La conductivité hydraulique visée est de 4×10^{-8} cm/s, telle que déterminée en laboratoire sur un échantillon représentatif du remblai SB placé dans la tranchée. Cette valeur est 25 fois plus faible que la valeur exigée au Projet de Règlement. Une si faible valeur de conductivité hydraulique est visée d'une part pour limiter à un strict minimum les quantités d'eau à pomper et à traiter et d'autre part pour tenir compte que la conductivité

hydraulique *in situ* de l'écran d'étanchéité construit peut être de 1 à 5 fois plus élevée que celle du remblai SB déterminée en laboratoire.

4.3 Mise en place du remblai de sol-bentonite

Au début du remblayage de la tranchée, le remblai SB devra être mis en place à partir du fond de l'excavation au moyen d'une benne preneuse. À partir du moment où il y aura émergence du remblai à la surface de la tranchée, le déversement du mélange SB en surface sur le remblai sera autorisé. De façon à éliminer tout risque de ségrégation, en aucun cas le remblai SB ne pourra être déversé en chute libre dans la boue de bentonite.

La pente de mise en place du remblai SB devra être vérifiée à chaque poste de travail au moyen de sondages au fil à plomb espacés de 6 m. Les travaux de remblayage et d'excavation devront progresser de manière à assurer une distance de dégagement horizontale d'au moins 15 m et d'au plus 35 m entre le pied de la pente du remblai SB et le pied de la face d'excavation de la tranchée.

5 SUIVI ET CONTRÔLE

Les travaux d'assèchement⁴ nécessaires à la réalisation à sec des excavations auront pour effet de soumettre l'écran périphérique d'étanchéité à une charge hydraulique importante. Le suivi des niveaux d'eau de part et d'autre de l'écran dans plusieurs puits d'observation permettra de déceler toute anomalie dans l'écran périphérique d'étanchéité. L'instrumentation et le programme de suivi sont décrits ci-après.

5.1 Instrumentation

Un réseau de puits d'observation (piézomètres) sera mis en place le long du côté intérieur de l'écran périphérique d'étanchéité de manière à permettre la prise de mesures de niveau d'eau en aval hydraulique de celui-ci (section 5.2).

Les puits seront localisés à 7,5 m de celui-ci de façon à pouvoir vérifier toute variation de niveau d'eau à proximité de l'écran tout en respectant une distance suffisamment grande pour éviter d'affecter son intégrité structurale lors des opérations de forage et d'installation des puits d'observation⁵ (Figure 5.1).

Chacun de ces puits, constitué d'un tubage de CPV de 50 mm de diamètre, sera installé à l'intérieur de trous de forage de 150 mm de diamètre dont l'extrémité inférieure sera positionnée à l'interface avec le sommet de la couche d'argile. Les tubages de CPV comporteront une crépine à partir de la base du puits jusqu'à 2 m de la surface. Seule la partie supérieure des puits (de 2 m de profondeur à l'extrémité supérieure) sera constituée de tubage de CPV plein.

⁴ Tous les détails concernant les travaux d'assèchement qui seront réalisés à l'intérieur de l'enceinte formée par l'écran périphérique d'étanchéité sont présentés dans le rapport de l'Étude d'ingénierie détaillée pour l'aménagement de la cellule d'enfouissement.

⁵ Cette distance latérale par rapport à l'écran périphérique d'étanchéité correspond à la distance proposée à cette fin par la USEPA (USEPA, 1998).

L'espace annulaire entre la crépine et les parois du trou de forage sera comblé au moyen de sable filtrant. Ce dernier ainsi que les crépines seront sélectionnés de façon à empêcher toute infiltration de particules à l'intérieur des puits. L'espace annulaire de la partie située entre 2 m de profondeur et la surface sera comblée au moyen d'un mélange de ciment-bentonite. Un tubage de protection en acier de 150 mm de diamètre muni d'un couvercle complètera la portion supérieure du puits, de 1,5 m de profondeur à 1 m au-dessus de la surface du terrain naturel.

Ce réseau de puits servira également à vérifier l'efficacité du système d'assèchement à l'intérieur de l'écran périphérique. L'espacement latéral entre chacun des puits d'observation sera dicté par l'étendue et la position des rayons d'influence des éléments du système d'assèchement. Selon la USEPA, l'espacement latéral entre chacun de ces puits d'observation le long de l'axe de l'écran devrait toutefois se limiter à 120 m. Le positionnement des puits d'observations est discuté en détail dans le rapport de l'Étude d'ingénierie détaillée relatif à l'aménagement de la cellule d'enfouissement (TECSULT, 2002).

5.2 Suivi des niveaux d'eaux

Un programme de suivi des niveaux d'eau dans les puits sera réalisé pendant les travaux d'excavation de la cellule d'enfouissement. Des mesures de niveau d'eau souterraine seront réalisées de façon hebdomadaire en amont et en aval de l'écran périphérique d'étanchéité. En amont, c'est-à-dire à l'extérieur de l'écran d'étanchéité, les mesures de niveau d'eau seront effectuées au moyen du réseau de puits d'observation existant sur le site ainsi que des puits qui devront être mis en place en périphérie de l'écran⁶. En aval, les niveaux d'eau seront relevés au moyen du réseau de puits d'observation mis en place le long du côté intérieur de l'écran

⁶ Les détails concernant le réseau de puits d'observation périphériques sont présentés dans le rapport de l'Étude d'ingénierie détaillée pour la cellule d'enfouissement.

d'étanchéité (section 5.1). En cas d'anomalie, un programme d'investigation complémentaire sera proposé le cas échéant.

6 RÉFÉRENCES

ACAR, Y.B. The Effect of Organic Fluids on Hydraulic Conductivity of Compacted Kaolinite, *Hydraulic barriers in soil and rock*, Ed. ASTM (STP 874), 1985, p. 171-187.

ADASKA, W.S., BRUIN, W.T., and DAY, S.R. Remediation of oil refinery sludge basin, *Cement industries solution to waste management*, Calgary, October 7-9, 1992, 16 p.

ALTHER, G., EVANS, J.C., FANG, H.-Y., and WITMER, K. Influence of Inorganic Permeants upon the Permeability of Bentonite, *Hydraulic barriers in soil and rock*, Ed. ASTM (STP 874), 1985, p. 64-74.

ALTHER, G.R. The effet of the exchangeable cations on the physico-chemical properties of Wyoming bentonites, *Applied clay science*, 1 (1986), 1986, p. 273-284.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended Practice Standard Procedure for Field Testing Water-Based Drilling Fluids, Norme API, 13B-1, 2nd ed., 1997.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Recommended Practice Standard Procedure for Field Testing Oil-Based Drilling Fluids, Norme API, 13B-2, 3rd ed., 1998.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Specification for Drilling Fluids Materials, Norme API, 13A, 5th ed., 1993.

ANDERSON, D.C., CRAWLEY, W., and CHRISTOPHER, B.R. Effects of Various Liquids on Clay Soil : Bentonite Slurry Mixture, *Hydraulic barriers in soil and rock*, Ed. ASTM (STP 874), 1985, p. 93-102.

ASANTE-DUAH, D.K. *Managing Contaminated Sites, Problem Diagnostics and Development of Site Restoration*, John Wiley & Sons, 1996.

BAGCHI, A. *Design, construction, and monitoring of sanitary landfill*, Wiley, 1990.

BARVENIK, M.O.J. Design Options Using Vertical Barrier Systems, Presented at the American Society of Civil Engineers 1992 International Convention & Symposium, Environmental Geotech Symposium, 1992.

BAXTER, D.Y. Mechanical behavior of soil-bentonite cutoff walls, Ph. D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.

BELL, R.A., SISLEY, J.L. Quality Control of Slurry Cutoff Wall Installations, Slurry walls, design construction and quality control. ASTP STP1129, 1992, p. 225-234.

BOYES, R.G.H. Structural and cut-off diaphragm walls, London : Applied Science, 1975.

CABRAL, A. Expertise sur l'efficacité d'un mur de bentonite comme écran périphérique pour l'isolation d'une cellule d'enfouissement au site de Saint Thomas, Université de Sherbrooke, 2001, p. 1-14.

CALABRESE, E.J., KOSTECKI, P.T. Petroleum Contaminated Soils Vol. 2, Lewis Publishers.

CAREY, M.J., FISHER, M.J., DAY, S.R. Installation of a soil-bentonite cutoff wall through a abandoned coal mine – Case study #47, International Containment Technology Conference and Exhibit, St-Peterburg, Florida, February, 1997, 6 p.

CARSON, D.A., and al. Quality assurance and quality control for waste containment facilities, Chap. 7 Vertical Cutoff Wall, EPA/600/R-93/182, 1993.

CAVALLI, N.J. Composite Barrier Slurry Wall, Slurry walls, design construction and quality control. ASTP STP1129, 1992, p. 78-85.

CHAPUIS, R.P., et al. Laboratory Test Results on Self-Hardening Grouts for Flexible Cutoffs, Canadian Geotechnical Journal, 1984, Vol. 21 No 1, p.185-191.

CHAPUIS, R.P., et al. Laboratory Test Results on Water-Bentonite-Cement Mixes for Impervious Flexible Cut-Offs, The 35th Canadian Geotechnical conference, 1982, p. 166-181.

CHEVRIER, A., SINCLAIR, R., DUNDAS, D. Hydraulic testing of a cement bentonite and diaphragm wall, Canadian Geotechnical society, 1997, Vol. 2, p. 665-672.

CHRISTOPHER, C.R., RYAN, P.E. Vertical Barriers in Soil for Pollution Containment, Geotechnical practice for waste disposal. ASCE, 1987, No 13, p. 182-204.

CIVIL ENGINEERING-ASCE. Japanese firms test new slurry wall technique, 1993, Vol. 63 No 8, p. 21.

CIVIL ENGINEERING-ASCE. Slurry walls help cut off contaminants, 1993, Vol. 63 No 1, p. 19-20.

CONSEIL NATIONAL DE RECHERCHE CANADA. Séminaire sur les barrières géologiques pour le contrôle de la contamination des eaux aux sites d'enfouissement, 1987.

D'APPOLONIA, D.J. Slurry Trench Cut off Walls for Hazardous Waste Isolation, Geotechnics of waste management proceedings thirteenth annual geotechnical series, 1982.

D'APPOLONIA, D.J. Soil-Bentonite Slurry Trench Cutoff, Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1980, Vol. 106, p. 399-1583.

DANIEL, D.E., KOERNER, R.M. Quality assurance and quality control for waste containment facilities, EPA/600/F-93/182, 1993.

DANIEL, D.E., KOERNER, R.M. Waste containment facilities, Chap. 8 Vertical Cutoff Walls, ASCE, 1995.

DAY, S. The compatibility of Slurry Cutoff Wall Materials with Contaminated Groundwater, ASTM STP 1142, 1994.

DAYAL, U., GOEL, A.K. Recent Trends in Design and Construction of Slurry Trench Cut-Off Walls, Indian geotechnical journal, 1983, p. 288-300.

DESCHÊNES, J.H., MASSIÉRA, M. Testing of a Cement-Bentonite Mix for a Low-Permeability, Plastic Barrier, ASTM STP1293, 1995, p. 252-270.

DIETRICH, P., FECHNER, Th., BRADL, H.B. A New Technology for Quality Assessment of Slurry Walls, Field screening Europe: Proceeding of the first international conference on strategies and techniques for the investigation and monitoring of contaminated sites. Ed. Kluwer, 1997, p. 61-64.

DINNEEN, E.A., SHESKIER, M. Design of soil-bentonite cutoff wall for Twin Buttes dam, Non-soil water barriers for embankment dams : seventeenth annual USCOLD lecture series, San Diego, 1997, p. 197-212.

ENGEMOEN, W.O., HENSLEY, P.J. ECPT Investigation of a Slurry Trench Cutoff Wall, Use of in situ tests in geotechnical engineering, 1986, p. 514-528.

EVANS, J.C. Hydraulic Conductivity of Vertical Cutoff Walls, Hydraulic Conductivity and Waste Contaminant Transport in Soil. ASTM STP 1142, 1994a.

EVANS, J.C. Vertical Cutoff Walls, American Society of Civil Engineers, 1994b.

EVANS, J.C., DAWSON, A.R. Slurry Walls for Control of Contaminant. Migration: A Comparison of UK and US Practices, *Geoengineering for Underground Facilities*, 1999, p. 105-120.

EVANS, J.C., FANG, H.Y., and KUGELMAN, I.J. Containment of Hazardous Materials With Soil-Bentonite Slurry Walls, *The 6th National Conference on Management of Uncontrolled Hazardous Waste Sites*, 1985, p. 369-373.

EVANS, J.C., LENNON, G.P., and WITNER, K.A. Analysis of Soil-Bentonite Backfill Placement in Slurry Walls, *The 6th National Conference on Management of Uncontrolled Hazardous Waste Site*, 1985, p. 357-361.

EVANS, J.C., MANUEL, E.N. Geotechnical Property of Hazardous Materials and Contaminated Soils, *The 6th National Conference on Management of Uncontrolled Hazardous Waste Sites*, 1985, p. 249-252.

FANG, H.-Y. *Foundation engineering handbook*, Chap. 20 Geotechnics of Hazardous waste Control Systems, Van Nostrand Reinhold, 1991.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. *Symposium on design and construction of Slurry walls as part of permanent structures*, Washington, D.C., 1980.

FENOUX, G.Y. *Matériaux de remplissage pour coupures étanches*, Paris : International commission on large dams, 1985.

FERNANDEZ, F., QUIGLEY, R.M. Controlling the Destructive Effects of Clay – Organic Liquid Interactions by Application of Effective Stresses, *Canadian Geotechnical Journal*, 1990, No 28, p. 388-398.

FILTZ, G.M., BOYER, R.D., DAVIDSON, R.R. Bentonite-Water Slurry Rheology and Cutoff Wall Trench Stability, *In situ remediation of the geoenvironment*, ASCE, 1997, No 71, p. 139-153.

FREEMAN, H.M., HARRIS, E.F. *Hazardous waste remediation*, Chap. 1 Soil-Bentonite Slurry Walls, Chap. 2 Slurry Walls, Technomic, 1995.

GARVIN, R.G., BOWARD, J.F. Using Slurry Walls to Protect an Historic Building : A Case Study, *Slurry walls, design construction and quality control*. ASTP STP1129, 1992, p. 117-127.

GAZETTE OFFICIELLE DU QUÉBEC. *Projet de règlement sur l'élimination des matières résiduelles*, octobre 2000, 132e année, no 43.

GEOCON, Technical Specifications – Soil-Bentonite Slurry Trench Cutoff Wall, <http://www.geocon.net/pdf/sbswtech.pdf>

GEO-SOLUTIONS INC., Guide Technical Specifications – Soil-Bentonite Slurry Trench Cutoff Wall, <http://www.geo-solutions.com/Default2.htm>

GILG, B. L'écran d'injection de Mattmark, Dixième congrès des grands barrages, Montréal, 1970, p. 171-189.

GIBSON, A.H., Jr. Permeability Testing on Clay Soil and Silty Sand Bentonite, Hydraulic barriers in soil and rock. Ed. ASTM (STP 874), 1985, p. 140-154.

GORDON, B.B., FORREST, M. Permeability of soils using contaminated permeant, Permeability and groundwater contaminant transport, 1981, p. 101-120.

GRUBE, W.E., Jr. Slurry Trench Cut-Off Walls for Environmental Pollution Control, Slurry walls, design construction and quality control. ASTP STP1129, 1992, p. 69-77.

HUTCHINSON, M.T., and al. The Properties of Bentonite Slurries used in Diaphragm Walling and their Control, Diaphragm walls and anchorages. Institution of civil engineers, 1975, p. 33-39.

JEFFERIS, S.A. Bentonite-Cement Slurries for Hydraulic Cut-Offs, 10th ICSMFE, Stockholm, 1991, p. 435-440.

JOHNSON, A.I., and all. A laboratory Comparison of the Effects of Water and Waste Leachate on the Performance of Soil Liners, Hydraulic barriers in soil and rock. Ed. ASTM (STP 874), 1985, p. 188-202.

JOHNSON, A.I., and all. Laboratory Testing of Cement Bentonite Mix for proposed Plastic Diaphragm Wall for Complexe LaGrande Reservoir Canipiscau, James Bay, Canada, Hydraulic barriers in soil and rock. Ed. ASTM (STP 874), 1985, p. 75-92.

JOHNSON, A.I., FROBEL, R.K., CAVALLI, N.J., PETTERSON, C.B. Hydraulic Barriers in Soil and Rock, ASTM STP874, 1984.

KATHRYN, N. In-Situ clay formation : new technology for stable containment barriers, Colorado University. Dept. Geological sciences, 1998.

KHERA, R.P. Calcium Bentonite, Cement, Slag, and Fly Ash as Slurry Wall Materials, Geoenvironment 2000. ASCE, 1995, p. 1237-1249.

KHERA, R.P., TIRUMALA, R.K. Materials for Slurry Walls in Waste Chemicals, Slurry walls, design construction and quality control. ASTP STP1129, 1992, p. 172-180.

KHOURY, M.A., and al. Design, Construction and Performance of a Soil-Bentonite Cutoff Wall in two Stages, Slurry walls, design construction and quality control. ASTP STP1129, 1992, p. 289-308.

KODIKARA, J.D., RACHNMAN, F., and BARBOUR, S.L. Towards a more rational approach to chemical compatibility testing of clay, Canadian Geotechnical Journal, 2002, Vol. 39, p. 597-607.

LANDVA, A., KNOWLES, G.D. Geotechnics of Waste Fills, Theory and Practice, ASTM, 1992.

LASEN, W.R., and al. Yacyreta Cement-Bentonite Slurry Cutoff, Dix-septième congrès des grands barrages, Vienne, 1991, p. 1491-1518.

LENTZ, R.W., HORST, W.D., and UPPOT, J.O. The Permeability of Clay to Acid and Caustic Permeants, Hydraulic barriers in soil and rock. Ed. ASTM (STP 874), 1985, p. 127-139.

MANASSERO, M. Hydraulic Conductivity Assessment of Slurry Wall Using Piezocone Test, Journal of Geotechnical Engineering, 1994, Vol. 120 No 10, p. 1725-1746.

MASSIÉRA, M. Utilisation des parois moulées en béton comme rideaux d'étanchéité des fondations des barrages en terre et en enrochement, Revue Canadienne de Génie Civil, 1991, Vol. 18 No 4, p. 590-599.

MASSIÉRA, M., LEVAY, J. Construction de la paroi au coulis ciment-bentonite sous la digue nord de l'aménagement hydroélectrique la Grande1, Revue Canadienne de Génie Civil, 1999, Vol. 26 No 2, p. 145-155.

MASSIÉRA, M., PARÉ, J.P. La tranchée de boue lourde du barrage OA-11, Revue Canadienne de Génie Civil, 1987, Vol. 14 No 6, p. 844-856.

McCANDLESS, R.M., BODOSCI, A. Investigation of Slurry Cutoff Wall Design and Construction Methods for Containing Hazardous Wastes, EPA/600/2-87/063, 1987.

MILLET, R.A, PEREZ, J.Y., DAVIDSON, R.R. USA Practice Slurry Wall Specifications 10 Years Later, Slurry walls, design construction and quality control. ASTP STP1129, 1992, p. 42-66.

MILLET, R.A., PEREZ, J.Y., and DAVIDSON, R.R. Current USA Practice: Slurry Wall Specifications, American Society of Civil Engineers, 1980, Vol. 107 No GT8.

MOTT, H.V., WEBER, W.J., Jr. Factors influencing organic contaminant diffusivities in soil-bentonite cutoff barriers, *Environ. Sci. Technol.*, 1991, Vol. 25 No 10, p. 1708-1715.

O'BRIEN & GERE ENGINEERS INC., BELLANDI, Robert. Hazardous waste site remediation, *The Engineer's Perspective*, Van Nostrand Reinhold, 1988.

PAUL, D.B., DAVIDSON, R.R., CAVALI, N.J. Slurry Walls. Design, construction, and quality control, ASTM STP1129, 1992.

PAVILONSKY, V.M. Varying Permeability of Clayey Soils Linings, Proceedings of the eleventh international conference on soil mechanics and foundation engineering, 1985, Vol. 3, p. 1213-1216.

PEARLMAN, L. Subsurface containment and monitoring systems : Barriers and Beyond, U.S. Environmental Protection Agency, 1999.

PETERSON, S.R., and GEE, G.W. Interaction between Acid Solutions and Clay Liners : Permeability and Neutralization, Hydraulic barriers in soil and rock. Ed. ASTM (STP 874), 1985, p. 229-244.

PEYTON, R.L., SCHRODER, P.R. Evaluation of Landfill Liner Designs, *J. ENV. ENG.*, 1990, Vol. 116 No 3, p. 421-437.

RABIDEAU, A., KHANDELWAL, A. Non Equilibrium Sorption in Soil/Bentonite Barriers, *Journal of environmental engineering*, 1998, Vol. 124 No 4, p. 329-335.

RAMACHANDRA, K., SWAN, C.H. Design and Construction of Cement-Bentonite Cutoff Wall for S.A. Murray JR. Hydroelectric Station, Slurry walls, design construction and quality control. ASTP STP1129, 1992, p. 140-152.

RATAY, R. T. Handbook of temporary structures in construction: engineering standards, designs, practices, and procedures, Chap. 9. Diaphragm/Slurry Walls, McGraw-Hill, 1996.

RECUEIL DU SYMPOSIUM INTERNATIONAL, PARIS. Exemples majeurs et récents en géotechnique de l'environnement, Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, 1996.

RESSI, A., DI CERVIA, L. History of Slurry Wall Construction, Slurry walls, design construction and quality control. ASTP STP1129, 1992, p. 3-15.

RRQ Q-2, r.3.2. Règlement sur les déchets solides, à jour au 20 mai 2003.

ROBERTSON, P.K., Soil classification using the cone penetration test, *Canadian Geotechnical Journal*, 27 (1), 1990, p. 151-8.

RUMER, Ralph R., and MITCHELL, James K. *Assessment of Barrier Containment Technologies*, National Technical Information Service. PB96-180583, 1996.

RUMER, Ralph R., and RYAN, Michael E. *Barrier Containment Technologies for Environmental Remediation Applications*, John Wiley & Sons, 1995.

SHARMA, H.D. *Waste containment systems, waste stabilization, and landfills; Design and evaluation*, Wiley, 1994.

SPOONER, P.A., et al. *Slurry Trench Construction for Pollution Migration Control*, EPA/540/2-84/001, 1984.

STARR, R.C., CHERRY, J.A. *In Situ Barriers for Groundwater Pollution Control*, Waterloo Centre for Groundwater Research, University of Waterloo.

TALLARD, G. *Slurry Trenches for Containing Hazardous Wastes*, Civil engineering-ASCE, 1984, p. 41-45.

TALLARD, G. *Slurry Walls and Slurry Trenches (Course #8463)*, University of Wisconsin, 1999.

TAMARO, G.J., POLETTI, R.J. *Slurry Walls - Construction Quality Control*, Slurry walls, design construction and quality control. ASTP STP1129, 1992, p. 26-41.

TECSULT, *Étude géotechnique, hydrogéologique et environnementale, Projet d'agrandissement du lieu d'enfouissement sanitaire de Saint-Thomas – Écran périphérique d'étanchéité, rapport final, août 2003.*

TEETER, R.M., CLEMENCE, S.P. *In Place Permeability Measurement of Slurry Trench Cutoff Walls, Use of in situ tests in geotechnical engineering*, 1986, p. 1049-1061.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE) *Guide specification for military construction section 02444, soil bentonite slurry trench for HTRW projects.*

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). EM 1110-1-4007, *Safety and Health Aspects of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Remediation Technologies*, 1999.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). EM 1110-2-1901, Engineering and Design – Seepage Analysis and Control for Dams with CH1, 1986.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). EP 415-1-261, Construction-Quality Assurance Representative's Guide Vol. 5, 1997.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). ETL, Checklist for Design of Vertical Barrier Walls for Hazardous Waste Sites, 1110-1-163. 1996.

U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). Soil-Bentonite Slurry Trench for HTRW Projects, 1998.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, USEPA 540-S-92-008. Engineering Bulletin Slurry Walls, 1992.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, EPA. Evaluation of subsurface engineered barriers at waste sites, 542-R-98-005, 1998.

WAGNER, K., et al. Remedial action technology for waste disposal sites, SAIC McLean, Virginia, 1986.

WATTS, R.J. Hazardous Wastes : Sources, Pathways, Receptors, John Wiley & Sons, 1996.

WAYNE, R., BERGSTROM, M., SWEATMAN, M.B., DODT, M.E. Slurry Trench Construction- Collier Road Landfill, Geotechnical practice for waste disposal. ASCE, 1987, No 13, p. 260-274.

WINTER, E., and al. Slurry Wall Performance Adjacent to Historic Church, Slurry walls, design construction and quality control. ASTP STP1129, 1992, p. 164-171.

WOODCOCK, J.C., WEINZIERL, R.J., MILLER, K.R. CERCLA Landfill Closure Utilizing Slurry Wall Construction in Deep Mined Area, 9th International Madison Waste Conference, September 25-26, University of Wisconsin-Madison, 1996, 9 p.

XANTHAKOS, P.P. Slurry walls as structural systems, Chap. 2 Construction Fundamentals, Chap. 3 Geotechnical Considerations, McGraw-Hill, 1994.

XANTHAKOS, P.P. Slurry Walls, McGraw-Hill, 1979.

ZAMOJSKI, L.D., REINKNELCHT, D. Design and Construction Evaluation of a Slurry Wall at FLR Landfill Superfund Site, Geoenvironment 2000. ASCE, 1995, p. 1192-1206.

ZAPPI, M.E., SHAFER, R., and ADRIAN, D.D. Compatibility of Ninth Avenue Superfund Site Groundwater with Two Soil-Bentonite Slurry Wall Backfill Mixtures, U.S. Army Corps of Engineers (USACE), 1990.

ZAPPI, M.E., SHAFER, R., and ADRIAN, D.D. Compatibility of soil-bentonite slurry wall backfill mixtures with contaminated groundwater, Proceedings of the 1989 superfund conference, Washington, 1989.

ZIMMIE, RIGGS. Permeability and groundwater contaminant transport, ASTM STP746, 1981.