

**MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT
ET DE LA LUTTE CONTRE
LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES**

Lignes directrices sur la gestion des matières résiduelles et des sols contaminés traités par stabilisation et solidification

Version révisée en mars 2021

Coordination et rédaction

L'édition 2012 de cette publication a été réalisée par la Direction des matières résiduelles et des lieux contaminés du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs. La mise à jour de 2021 a été réalisée par la Direction des matières dangereuses et des pesticides du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). Elle a été produite par la Direction des communications du MELCC.

Renseignements

Pour tout renseignement, vous pouvez communiquer avec le Centre d'information.

Téléphone : 418 521-3830
1 800 561-1616 (sans frais)

Télécopieur : 418 646-5974

Formulaire : www.environnement.gouv.qc.ca/formulaires/renseignements.asp

Internet : www.environnement.gouv.qc.ca

Pour obtenir un exemplaire du document

Visitez notre site Web au www.environnement.gouv.qc.ca.

Dépôt légal – 2021

Bibliothèque et Archives nationales du Québec

ISBN 978-2-550-88868-0 (PDF)

Tous droits réservés pour tous les pays.

© Gouvernement du Québec, 2021

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction.....	1
1.1 Les matières dangereuses résiduelles	1
1.2 Les matières non dangereuses résiduelles	2
1.3 Les sols contaminés	2
2. Description des procédés de stabilisation et solidification.....	4
2.1 Les étapes d'un traitement par stabilisation et solidification	4
2.1.1 Le principe de base	4
2.1.2 La stabilisation	4
2.1.3 La solidification	5
2.2 Les procédés de stabilisation et solidification	5
2.3 Les matières résiduelles ou les sols contaminés admissibles.....	7
3. Cadre légal et réglementaire.....	8
3.1 Matières dangereuses résiduelles	8
3.2 Matières résiduelles non dangereuses.....	8
3.3 Sols contaminés.....	8
4. Méthodes d'évaluation	12
4.1 Description du procédé.....	12
4.2 Les essais en laboratoire, à l'échelle pilote et l'application à grande échelle	12
4.3 Description des essais proposés.....	14
4.3.1 Groupe A (analyses physiques ou chimiques)	18
4.3.1.1 Variation de volume.....	18
4.3.1.2 Porosité et saturation	18
4.3.1.3 Granulométrie.....	19
4.3.1.4 pH.....	20
4.3.1.5 Teneur en carbone organique total	20
4.3.1.6 Analyse du contenu total	20
4.3.2 Groupe B (évaluation de la stabilisation principalement par la mesure de la mobilité des contaminants)	20
4.3.2.1 Capacité de neutralisation des acides	21
4.3.2.2 Concentration initiale des lixiviats (lixiviation à l'eau).....	22
4.3.2.3 Quantité de contaminants susceptible d'être lixiviée en milieu acide acétique	22
4.3.2.4 Quantité de contaminants susceptible d'être lixiviée par des pluies acides	22
4.3.2.5 Potentiel de génération d'acide	22
4.3.3 Groupe C (évaluation de la solidification par la mesure de la qualité de la matrice) ...	23

4.3.3.1	Mobilité des contaminants dans la matrice (diffusion)	23
4.3.3.2	Conductivité hydraulique	23
4.3.3.3	Résistance physique après immersion	24
4.3.3.4	Altération (cycles de mouillage/séchage).....	24
4.3.3.5	Biodégradabilité.....	25
5.	Cadre d'évaluation	27
5.1	Scénarios d'utilisation ou d'élimination	27
5.1.1	Utilisation limitée du monolithe de matières résiduelles traitées	27
5.1.2	Maintien des contaminants dans le terrain d'origine	27
5.1.3	Élimination dans un lieu visé par le REIMR.....	27
5.1.4	Élimination dans un lieu de dépôt définitif de matières dangereuses résiduelles.....	28
5.1.5	Élimination dans un lieu visé par le RESC	28
5.2	Critères de rendement	28
5.2.1	Prévention de la contamination ou réhabilitation.....	28
5.2.2	Les critères de rendement de la stabilisation	32
5.2.3	Les critères de rendement de la solidification	32
5.2.3.1	Mobilité des contaminants dans la matrice	33
5.2.3.2	Capacité de neutralisation des acides	33
5.2.3.3	Résistance physique après immersion	33
5.2.4	Critères de rendement complémentaires	34
6.	Gestion des risques et bonne pratique	35
7.	Conclusion	36
8.	Références bibliographiques	38

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Les procédés de stabilisation et solidification.....	6
Tableau 2 : Résumé des autorisations requises.....	10
Tableau 3 : Protocoles d’essais	15
Tableau 4 : Cadre d’évaluation et scénarios de gestion du monolithe.....	29
Tableau 5 : Critères de rendement.....	30
Tableau 6 : Critères de mobilité	32

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Schéma illustrant les options de gestion d'une matière dangereuse résiduelle.....	2
Figure 2 : Principe de base des procédés de stabilisation et solidification.....	4
Figure 3 : Solubilité des hydroxydes de métaux en fonction du pH	21
Figure 4 : Tests de biodégradabilité et contenu en matière organique	26

REMERCIEMENTS

L'édition 2012 de cette publication a été réalisée avec la collaboration de la Direction générale de l'analyse et de l'expertise régionales et du Centre de contrôle environnemental du Québec.

La mise à jour de 2021 a été réalisée en collaboration avec la Direction des matières résiduelles, la Direction du programme de réduction des rejets industriels et des lieux contaminés, la Direction des eaux usées et la Direction générale de l'évaluation environnementale et stratégique.

Nous remercions tous ces collaborateurs pour leur aide à la rédaction et à la mise à jour de cette publication.

AVANT-PROPOS

Les Lignes directrices sur la gestion des matières résiduelles et des sols contaminés traités par stabilisation et solidification remplacent le Guide sur la gestion des matières dangereuses traitées par stabilisation et solidification.

La présente publication encadre les projets de stabilisation et de solidification des matières résiduelles ou des sols contaminés. Il s'agit d'un document technique dont l'objectif est l'évaluation, d'un point de vue environnemental, de l'efficacité du traitement de stabilisation et de solidification en fonction de scénarios de maintien dans le terrain, d'utilisation limitée ou d'élimination.

Les lignes directrices sont destinées aux analystes et aux inspecteurs du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). Elles seront utiles à l'approbation et à la vérification de conformité des projets de traitement par stabilisation et solidification.

Cette publication a été mise à jour en 2021 uniquement pour tenir compte de la refonte de la Loi sur la qualité de l'environnement, de l'adoption du Règlement sur l'encadrement d'activités en fonction de leur impact sur l'environnement et de la parution du Guide d'intervention - Protection des sols et réhabilitation des terrains contaminés. Par rapport à la version de 2012, il n'y a aucun changement apporté aux protocoles d'essais et aux critères de rendement.

1. INTRODUCTION

Contrairement à d'autres techniques de traitement où les contaminants sont enlevés ou détruits, la stabilisation et la solidification consistent à utiliser un liant afin de transformer une matière résiduelle ou un sol contaminé en un solide monolithique. Les contaminants sont fixés (stabilisation) et encapsulés (solidification) dans le monolithe de façon à réduire leur mobilité et leur toxicité.

Il est nécessaire d'évaluer les performances de la stabilisation et de la solidification afin de s'assurer de l'efficacité du liant à immobiliser les contaminants. Les présentes lignes directrices fournissent un cadre d'évaluation permettant une gestion adéquate du risque en fonction de différents scénarios de gestion des matières résiduelles traitées ou des sols contaminés traités par stabilisation et solidification. Cet objectif peut être atteint en réalisant différents essais physiques ou chimiques dont les résultats sont comparés à des critères de rendement modulés en fonction des scénarios.

Au Québec, la stabilisation et la solidification sont utilisées depuis plusieurs années pour le traitement avant enfouissement des matières dangereuses résiduelles ou des sols excavés et contaminés par des métaux.

La stabilisation et la solidification peuvent également servir à réhabiliter, lors de la procédure d'évaluation des risques, certains terrains dont les sols sont contaminés par des métaux.

Après une brève description à la section 2 de différents procédés de stabilisation et solidification, le reste des présentes lignes directrices porte sur l'ajout de liants hydrauliques (principalement le ciment) pour le traitement des métaux ou métalloïdes.

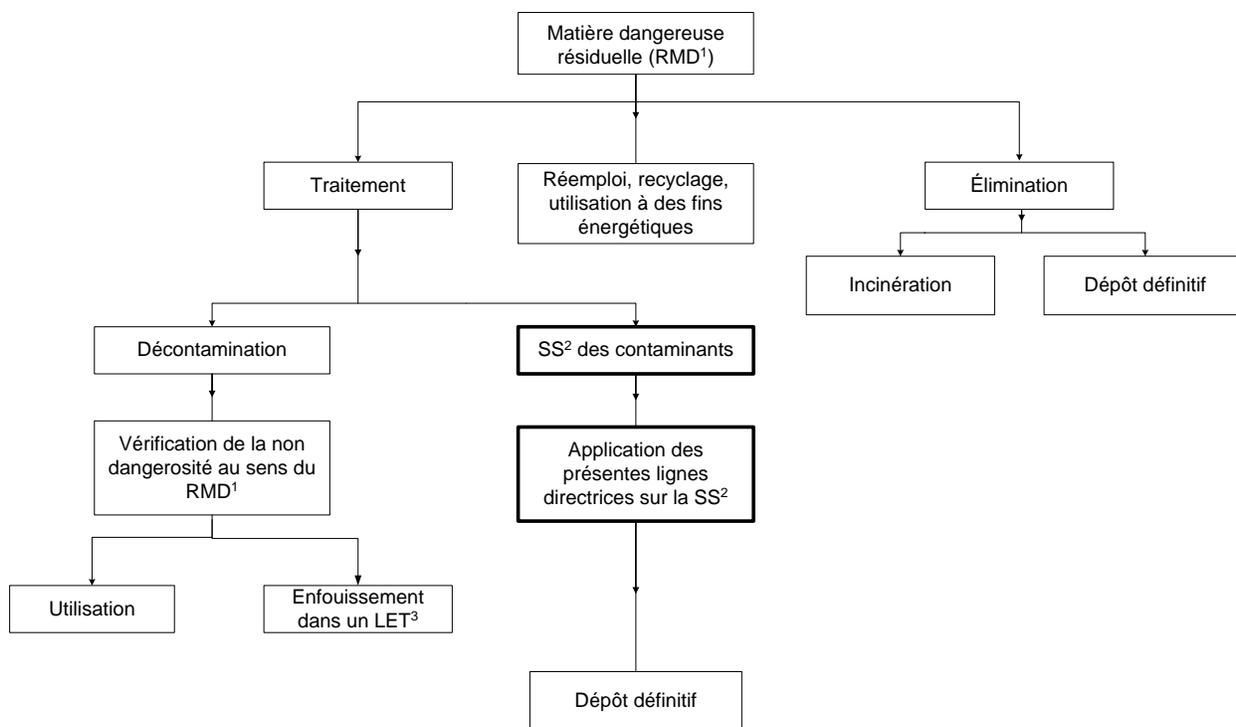
1.1 Les matières dangereuses résiduelles

La réduction à la source (réduire la quantité de matières dangereuses résiduelles générée) est d'abord favorisée.

La figure 1 présente un aperçu des options de gestion d'une matière dangereuse résiduelle. La figure permet de visualiser où se situent les présentes lignes directrices dans le cadre général de la gestion des matières dangereuses résiduelles. Parmi les options de gestion, celles concernant la stabilisation et la solidification sont encadrées en gras.

Les autres options (traitement par décontamination, réemploi, recyclage, utilisation à des fins énergétiques ou élimination des matières dangereuses résiduelles non traitées...) ne seront pas abordées dans les présentes lignes directrices.

Si d'autres options ne sont pas possibles, la matière dangereuse résiduelle doit être éliminée. Parmi les méthodes de traitement possibles, les procédés de stabilisation et solidification des contaminants représentent une solution intéressante en vue d'immobiliser des métaux. L'immobilisation accroît à long terme la sécurité environnementale de l'élimination par enfouissement.



- 1: Règlement sur les matières dangereuses
 2: Stabilisation et solidification
 3: Lieu d'enfouissement technique

Figure 1 : Schéma illustrant les options de gestion d'une matière dangereuse résiduelle

1.2 Les matières non dangereuses résiduelles

La réduction à la source, le réemploi, le recyclage et la valorisation sont à privilégier.

Le [Guide de valorisation des matières résiduelles inorganiques non dangereuses de source industrielle comme matériau de construction](#) prévoit notamment, à certaines conditions, la valorisation de telles matières pour des usages enrobés comme la fabrication de béton. Pour ce créneau de valorisation, les présentes lignes directrices complètent les exigences du guide mentionné ci-dessus. Puisque la valorisation pourrait se dérouler hors du terrain d'origine, les exigences ont été élaborées dans un contexte de prévention de la contamination des terrains (voir la section 5.2.1).

La notion d'élimination ne doit s'appliquer qu'en dernier lieu. Elle est encadrée par le Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles (REIMR) (c. Q-2, r.19).

1.3 Les sols contaminés

Le scénario est le traitement, sur le terrain d'origine, des sols contaminés par des métaux en excès des normes réglementaires en application des articles 31.45 à 31.48, 31.55 et 31.57 de la section IV de la Loi sur la qualité de l'environnement (LQE) (LRQ, c. Q-2). Il s'agit d'un scénario où l'on vise à réhabiliter un terrain dont la contamination est reliée à des activités du passé (voir la section 5.2.1).

Dans cette situation, le traitement par stabilisation et solidification aura pour effet de réduire la mobilité des métaux ou métalloïdes et, de ce fait, de réduire les risques d'impact sur l'eau souterraine au sens du Guide d'intervention - Protection des sols et réhabilitation des terrains contaminés.

De plus, la stabilisation et la solidification peuvent améliorer des caractéristiques physiques d'un sol et ainsi permettre leur valorisation en place comme matériau d'ingénierie pour un projet utile (sous un stationnement, par exemple) dans le terrain contaminé d'origine.

Le traitement par stabilisation et solidification de sols contaminés et la valorisation subséquente hors du terrain d'origine n'est pas un scénario privilégié par le MELCC compte tenu notamment de la difficulté à conserver une traçabilité des sols contaminés traités par stabilisation et solidification.

L'élimination dans un lieu d'enfouissement visé par le REIMR de tout produit résultant du traitement des sols par un procédé de stabilisation ou de solidification est prohibée (article 4 du REIMR).

Le broyage du monolithe contenant les sols contaminés traités par stabilisation et solidification et l'utilisation subséquente de ces granulats avec ou sans contact avec l'eau ne sont pas techniquement acceptables selon le MELCC car cette gestion réduit vraisemblablement l'efficacité à long terme de l'immobilisation des métaux par stabilisation et solidification. Pour les mêmes raisons, ces matériaux ne peuvent pas être utilisés comme matériel de recouvrement journalier.

Lorsqu'une technique d'enlèvement sera disponible, les métaux ou métalloïdes enlevés pourront être enfouis dans un lieu visé par le Règlement sur l'enfouissement des sols contaminés (c. Q-2, r.18) (RESC) seulement s'ils ont été stabilisés et solidifiés par un traitement autorisé (article 4, 1 b du RESC).

2. DESCRIPTION DES PROCÉDÉS DE STABILISATION ET SOLIDIFICATION

Un procédé de stabilisation et solidification consiste en une série d'étapes de traitement visant à modifier les caractéristiques d'une matière résiduelle ou d'un sol contaminé afin de le rendre sous une forme stable, moins mobile et plus sécuritaire pour l'environnement. Le plus souvent, l'immobilisation des contaminants aura pour objectif de réduire le risque de contamination de l'eau souterraine ou de surface. En s'appuyant sur les définitions précisées dans la littérature, ce chapitre présente chacune des étapes d'un traitement par stabilisation et solidification.

2.1 Les étapes d'un traitement par stabilisation et solidification

2.1.1 Le principe de base

Il s'agit de faire en sorte que les contaminants d'une matière résiduelle ou d'un sol se retrouvent sous une forme où ils seront immobiles. La figure 2 illustre bien ce phénomène.

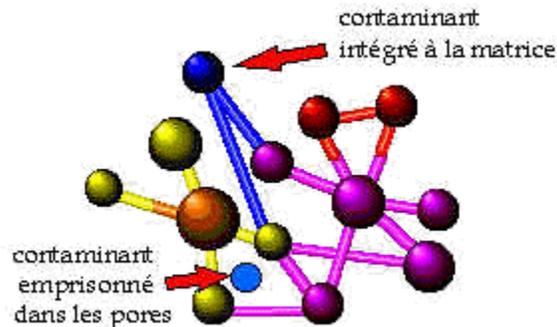


Figure 2 : Principe de base des procédés de stabilisation et solidification

Selon la nature du matériau traité et le type de procédé, les contaminants peuvent s'intégrer directement dans la matrice par formation de liens chimiques ou y être emprisonnés. Dans ce dernier cas, les contaminants peuvent être inclus dans un solide amorphe constituant la matrice. Les contaminants peuvent aussi être emprisonnés dans les pores discontinus que l'on y retrouve.

2.1.2 La stabilisation

La stabilisation (fixation) d'une matière résiduelle ou d'un sol consiste à effectuer des réactions chimiques afin de réduire le niveau de risque associé à chacun des contaminants en limitant leur mobilité. Elle a pour but d'amener les contaminants sous une forme moins soluble ou moins toxique.

Parmi les exemples de traitement de stabilisation, on retrouve la précipitation des métaux lourds en phosphates.

Le chaulage d'une matière résiduelle ou d'un sol n'est pas considéré comme de la stabilisation par le MELCC car la fixation des métaux à cause de l'augmentation du pH n'est que temporaire.

2.1.3 La solidification

La solidification est l'étape du procédé où la matière résiduelle ou le sol est mélangé avec des réactifs afin d'obtenir une matrice inerte habituellement formée de silicates. À la fin de la période de mûrissement, la matière résiduelle ou le sol traité se retrouve sous la forme d'une matrice solide (monolithe) ayant une intégrité structurelle. À cause de sa faible perméabilité, le monolithe emprisonne les contaminants et limite leur mobilité tout en réduisant les surfaces exposées.

2.2 Les procédés de stabilisation et solidification

Il existe de nombreuses façons d'immobiliser des espèces chimiques à l'intérieur d'une matrice solide. Le tableau 1 résume les principaux procédés, leur principe de base et les matières pour lesquelles ils peuvent être utilisés.

La United States Environmental Protection Agency (USEPA) a publié un guide référant à différentes sources d'information sur les procédés de stabilisation et solidification (USEPA, 1999).

Le présent document porte sur la stabilisation et la solidification avec des liants hydrauliques car c'est le procédé le plus souvent utilisé.

Tableau 1 : Les procédés de stabilisation et solidification

Type de procédés	Température	Description	Limites d'utilisation
Ajout de liants hydrauliques (stabilisation et solidification)	À froid Température ambiante de 20 °C	À la suite de la stabilisation préalable ou non, la matière résiduelle ou le sol contaminé est mélangé avec divers liants hydrauliques tels que le ciment Portland, les cendres volantes, les poussières de cimenteries ou les fumées de silice. Dans le cas des liants cimentaires, les métaux sont vraisemblablement précipités sous forme d'hydroxydes et emprisonnés physiquement dans un gel de silicates amorphes.	Ces procédés ont été testés principalement pour les matières résiduelles inorganiques. Les métaux lourds peuvent être immobilisés efficacement dans la matrice solide. Pour les contaminants organiques, les résultats sont moins bien documentés actuellement. Une trop grande concentration de matière organique peut avoir des effets nuisibles sur l'ensemble de la matrice. En conséquence, le MELCC ne s'attend pas à recevoir des projets de traitement de contaminants organiques par stabilisation et solidification avec des liants hydrauliques lors de scénarios d'utilisation limitée ou de maintien dans le terrain de contaminants.
Ajout d'agents de polymérisation (stabilisation ou solidification)	À froid Température ambiante de 20 °C	La matière résiduelle est polymérisée ou incorporée dans une matrice de polymère. L'incorporation est aussi possible pour les sols contaminés.	Ces méthodes s'appliquent généralement aux composés organiques. Cette avenue est intéressante afin de traiter certaines résines et catalyseurs usés.
Incorporation dans du bitume (solidification)	Procédé tiède (50 °C)	La matière résiduelle ou le sol contaminé est incorporé à du béton bitumineux.	Cette méthode est pertinente pour la valorisation de matières résiduelles non dangereuses ou de sols contaminés exclusivement par des hydrocarbures pétroliers ou par des contaminants que l'on retrouve normalement dans des hydrocarbures pétroliers.
Vitrification (stabilisation et solidification)	Procédé à chaud Température de plus de 1500°C	Il s'agit d'un procédé à très haute température (torche au plasma, haut fourneau...) qui permet de détruire les contaminants organiques et d'incorporer les contaminants inorganiques dans une matrice amorphe de verre. Ce procédé est aussi applicable <i>in situ</i> pour la vitrification de sols contaminés par des métaux. Pour ce faire, le sol est chauffé à l'aide d'électrodes.	Appliqué <i>ex situ</i> , le procédé permet le traitement des contaminants à la fois organiques et inorganiques. Il peut toutefois être nécessaire d'effectuer des mesures, des contrôles et même des traitements des émissions de contaminants à l'atmosphère provenant du procédé de vitrification.

2.3 Les matières résiduelles ou les sols contaminés admissibles

Étant donné que le procédé consistant à l'ajout de liants hydrauliques pour le traitement des métaux ou métalloïdes est le plus connu au Québec, il sera principalement discuté dans le reste de ce document.

Tel que le démontre le tableau 1, le choix d'un procédé de stabilisation et solidification dépend de la nature de la matrice et des contaminants à traiter. Ce ne sont cependant pas toutes les matières résiduelles ou tous les sols contaminés qui peuvent être traités efficacement par stabilisation et solidification. Certains contaminants ont des propriétés nuisibles à la prise cimentaire. Ainsi, il est important de bien caractériser tout sol ou matière résiduelle afin d'évaluer si un traitement par stabilisation et solidification peut représenter une solution efficace.

De façon générale, il est possible de regrouper les matières résiduelles ou les sols contaminés selon trois catégories établies à partir de leurs propriétés et de leur réactivité potentielle avec le ciment. Ces trois groupes sont:

- **les matières résiduelles qui possèdent des propriétés** cimentaires lorsqu'elles sont mélangées à de l'eau et à de la chaux. Par exemple, les poussières de four à ciment ou les fumées de silice présentent d'excellentes propriétés permettant leur incorporation comme matière première dans des formulations commerciales de certains types de béton en remplaçant une partie du ciment;
- **les matières résiduelles ou les sols contaminés pouvant être utilisés comme sable ou agrégat.** Des scories ou certains sables ne possèdent aucune propriété cimentaire, mais, en contrepartie, ne présentent aucune propriété pouvant nuire aux réactions cimentaires et pourraient être incorporés dans du ciment. De plus, l'ajout d'agrégats contribue positivement aux propriétés physiques du monolithe;
- **les matières résiduelles ou les sols contaminés possédant des propriétés non souhaitables.** Voici quelques exemples (tiré de Paria et Yuet, 2006) :
 - une trop grande proportion de particules fines provoquera une matrice solide (monolithe) ayant une durabilité médiocre;
 - les contaminants organiques comme les hydrocarbures pétroliers ont un effet négatif sur le développement des liens cimentaires en formant une couche protectrice autour des grains de ciment;
 - les sulfates réagissent pour former du sulfate de calcium, ce qui cause l'expansion et la fissuration de la matrice cimentaire;
 - les sels de zinc, d'étain ou de plomb retardent l'hydratation et la prise cimentaire.

Il peut être alors nécessaire de traiter ces contaminants avant l'incorporation à un mélange cimentaire.

Il faut toutefois noter que certaines matrices qui ne peuvent être traitées efficacement par des procédés à base de ciment pourraient être traitées par certains autres procédés utilisant d'autres liants. Par exemple, il est possible de polymériser certains contaminants organiques de sorte que la matrice soit inerte. Certaines autres techniques, comme la vitrification, permettent également d'immobiliser les contaminants inorganiques de façon efficace.

3. CADRE LÉGAL ET RÉGLEMENTAIRE

3.1 Matières dangereuses résiduelles

Au Québec, le Règlement sur les matières dangereuses (Q-2, r.32) (RMD) prévoit que toute matière issue du traitement de matières dangereuses résiduelles est une matière dangereuse résiduelle pourvu qu'elle en ait les caractéristiques et qu'elle ne soit pas un produit manufacturé (article 6, paragraphe 6°).

Bien que le RMD ne dicte aucune norme de traitement pour les matières dangereuses résiduelles, l'exploitation d'un procédé de traitement par stabilisation et solidification nécessite l'obtention d'une autorisation selon l'article 22, 1^{er} alinéa, paragraphe 5° de la LQE. S'il s'agit de traitement à des fins commerciales, l'article 70.9 est le déclencheur de l'autorisation selon l'article 22 de la LQE. Il s'agit alors d'une autorisation renouvelable dont la période de validité est d'au plus cinq ans selon l'article 70.14 de la LQE. Si ce traitement est effectué hors du lieu de production des matières, le projet est assujéti à la procédure d'évaluation et d'examen des impacts sur l'environnement et doit faire l'objet d'une décision du gouvernement à la suite de quoi, une autorisation est délivrée selon l'article 22, 1^{er} alinéa, paragraphe 5° de la LQE. L'article 25 de la LQE permet de fixer des conditions à la délivrance de l'autorisation; il est donc possible d'établir les normes d'opération du procédé et de fixer les normes d'efficacité de traitement.

Il est à noter que, pour les scénarios de dépôt définitif des matières issues d'un traitement de stabilisation et de solidification de matières dangereuses résiduelles, l'aménagement ou l'agrandissement d'un tel lieu de dépôt définitif est soumis à la procédure d'évaluation et d'examen des impacts sur l'environnement. Les articles 35 et 36 de la partie II de l'annexe I du Règlement relatif à l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement de certains projets (Q-2, r. 23.1) décrivent plus précisément les projets visés.

3.2 Matières résiduelles non dangereuses

La valorisation des matières non dangereuses résiduelles traitées par stabilisation et solidification nécessite la délivrance d'une autorisation en vertu de l'article 22, paragraphe 8° de la LQE. L'article 23 de la LQE et le Règlement sur l'encadrement d'activités en fonction de leur impact sur l'environnement (REAFIE) listent le contenu d'une demande d'autorisation.

3.3 Sols contaminés

La section IV de la LQE (articles 31.45 à 31.48, 31.55 et 31.57) prévoit le recours à la procédure d'évaluation des risques lorsqu'on désire maintenir dans le terrain des contaminants au-delà des normes prescrites. La migration des contaminants du sol vers l'eau souterraine est une voie d'exposition à considérer lors de l'évaluation des risques toxicologiques et écotoxicologiques. Dans ce contexte, le traitement par stabilisation et solidification des sols contaminés par des métaux peut être une option envisageable (voir la section 1.3). Les contaminants sont maintenus dans le terrain d'origine, mais ils sont rendus sous une forme moins soluble, moins mobile dans l'environnement.

Ces dossiers requièrent la rédaction d'un rapport à la suite des essais en laboratoire et de l'essai pilote (voir la section 4.2 du présent document). Le rapport contient les résultats et l'interprétation des essais réalisés (voir la section 4.3) ainsi que les conclusions et recommandations qui en découlent.

Le dossier contient également une description du procédé de traitement (voir la section 4.1 du présent document) et un programme complet de contrôle et d'assurance de la qualité du traitement à grande échelle (section 4.2).

Le plan de réhabilitation doit être approuvé par le MELCC, ce qui inclut le traitement des sols par stabilisation et solidification.

L'étude de caractérisation du terrain est attestée par un expert au sens de la section IV de la LQE. L'expert atteste aussi que les travaux ont été faits conformément au plan approuvé, notamment en ce qui concerne les mesures de gestion du risque (confinement, contrôle, suivi, voir la section 6 du présent document). La grille d'attestation (élément 11.2 de la grille) permet au besoin d'ajouter des commentaires sur le confinement des sols par solidification dans un monolithe.

Ces dossiers impliquent l'inscription au Registre foncier d'un avis de contamination et d'un avis restriction d'utilisation du terrain. Cependant, un avis de décontamination ne pourra être inscrit, car les contaminants ont été immobilisés et non pas enlevés ou détruits.

En ce qui concerne le Règlement sur l'enfouissement des sols contaminés (RESC), lorsqu'une technique d'enlèvement sera disponible, les métaux ou métalloïdes enlevés pourront être enfouis dans un lieu visé par le RESC seulement s'ils ont été stabilisés et solidifiés par un traitement autorisé (article 4, 1 b du RESC). L'enfouissement en cellules de sols traités par stabilisation et solidification nécessite l'obtention d'une autorisation en vertu de l'article 22 de la LQE.

Le tableau 2 résume les autorisations requises en fonction des situations rencontrées.

Tableau 2 : Résumé des autorisations requises

Ce tableau est fourni qu'à titre d'information. Veuillez consulter la loi et les règlements applicables.

Ce tableau n'est pas applicable à la région de la Baie James et à celle du Nord québécois, car elles sont visées par le titre II de la LQE.

	Traitement par stabilisation et solidification		Maintien dans le terrain de sols traités ou utilisation limitée (valorisation) des matières non dangereuses résiduelles traitées		Enfouissement après stabilisation et solidification	
	Sur le lieu de production des matières résiduelles	Hors du lieu de production des matières résiduelles	Sur le lieu de production des matières résiduelles ou sur le terrain d'origine du sol contaminé	Hors du lieu de production des matières résiduelles ou hors du terrain d'origine du sol contaminé	Sur le lieu de production des matières résiduelles ou sur le terrain d'origine du sol contaminé	Hors du lieu de production des matières résiduelles ou hors du terrain d'origine du sol contaminé
Matières dangereuses résiduelles	Art. 22, par. 5° (voir art. 70.9, 2 ^e al.) Art. 22, par. 5° (voir art. 70.9, 1 ^{er} al., par. 2°) *	Art. 31.5, art. 22, par. 5° (voir art. 70.9, 2 ^e al.) Art. 31.5, art. 22, par. 5° (voir art. 70.9, 1 ^{er} al., par. 2°) *	Sans objet	Sans objet	Art. 31.5**, art. 22, par. 5° (voir art. 70.9, 1 ^{er} al., par. 1°)	Art. 31.5, art.22, par. 5° (voir art. 70.9, 1 ^{er} al., par. 1°)
Matières résiduelles non dangereuses	Art. 22 Art. 22, par. 8 ^{o#}	Art. 22 Art. 22, par. 8 ^{o#}	Art. 22, par. 8°	Art. 22, par. 8°	Art. 31.5*** Art. 22, par. 7°	
Résidus miniers	Art. 22, par. 10° (Voir art. 78, par. 4° du REAFIE)	Art. 22, par. 8 ^{o#} ou 10° selon le cas	Art. 22, par. 10° (Voir art. 78, par. 4° du REAFIE)	Art. 22, par. 8 ^{o#} ou 10° selon le cas	Art. 22, par. 10° (Voir art. 78, par. 4° du REAFIE)	Art. 22, par. 10° pour l'aménagement d'une aire d'accumulation de résidus miniers (voir art. 78, par. 4° du REAFIE)
Sols contaminés	Sans objet	Sans objet	Approbation d'un plan de réhabilitation (art. 31.45 à 31.48, 31.55 et 31.57 de la LQE)	Non applicable	Art. 22 (en application de l'art. 4 du RESC) ##	Prohibé dans les lieux visés par le REIMR Art. 22 (en application de l'art. 4 du RESC) ##

* À des fins commerciales.

- ** Voir l'exception à l'annexe I, partie II, article 35, troisième alinéa du Règlement relatif à l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement de certains projets.
- *** Voir l'exception à l'annexe I, partie II, article 34, premier alinéa du Règlement relatif à l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement de certains projets.
- # À des fins de valorisation
- ## Lorsqu'une technique d'enlèvement sera disponible, les métaux ou métalloïdes enlevés pourront être enfouis dans un lieu visé par le RESC seulement s'ils ont été stabilisés et solidifiés par un traitement autorisé (article 4, 1 b du RESC).
- Art. 22 Autorisation délivrée en vertu de l'article 22, premier alinéa, de la Loi sur la qualité de l'environnement (LQE).
- Art. 31.5 Autorisation délivrée en vertu de l'article 31.5 de la LQE à la suite de la procédure d'évaluation et d'examen des impacts sur l'environnement.

4. MÉTHODES D'ÉVALUATION

Afin d'évaluer l'efficacité d'un procédé de traitement par stabilisation et solidification et de déterminer le mode de gestion approprié, un ensemble d'essais sont nécessaires. Ces essais se regroupent en trois catégories : les analyses physiques et chimiques, la mobilité des contaminants et l'évaluation de la qualité de la matrice.

Les données de validation sur le terrain des performances à long terme des procédés de stabilisation et solidification sont encore limitées. C'est pourquoi, afin d'estimer le comportement à long terme, des tests simulant un vieillissement accéléré sont utilisés.

L'échantillonnage des sols ou matières résiduelles devra être fait selon les règles de l'art en suivant le *Guide d'échantillonnage à des fins environnementales*, cahier 5, *Échantillonnage des sols*, cahier 8, *Échantillonnage des matières dangereuses*, rédigé par le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec.

4.1 Description du procédé

La description du procédé doit comprendre la méthode détaillée de traitement, ce qui inclut notamment la liste des additifs, leur contenu et leur dosage, l'équipement utilisé, la vitesse et le temps de mélange. Pour faciliter la compréhension, un procédé peut être illustré par des schémas. À titre d'exemple, l'armée américaine a publié un guide sur les informations requises pour bien décrire un procédé de stabilisation et solidification (U.S. Army Corps of Engineers et collaborateurs, 2006).

4.2 Les essais en laboratoire, à l'échelle pilote et l'application à grande échelle

Les types de béton utilisés pour des travaux de génie civil sont fabriqués à partir d'intrants qui répondent à des caractéristiques précises de façon à atteindre les performances attendues.

La situation est bien différente pour le traitement par stabilisation et solidification de matières résiduelles ou de sols contaminés. Ces intrants ne possèdent pas nécessairement toutes les propriétés recherchées et possèdent même parfois des propriétés qui ne sont pas souhaitables (consultez la section 2.3 du présent document).

Pour ces raisons, avant d'entreprendre un traitement par stabilisation et solidification d'un grand volume de matières résiduelles ou de sols contaminés, il est requis de bien les caractériser et de tester les formulations lors d'essais en laboratoire et d'essais pilotes.

Les essais en laboratoire sont effectués à échelle réduite afin de vérifier l'applicabilité d'un traitement par stabilisation et solidification. Ils visent à établir des formulations qui permettent d'atteindre les critères de rendement listés à la section 5.2 du présent document.

Une évaluation du volume d'échantillon requis pour les essais devra être faite. Les volumes généralement prélevés pour les caractérisations environnementales seront insuffisants. Il faudrait prévoir au minimum une quarantaine de litres par échantillon pour chaque formulation testée.

Au départ, toutes les formulations testées en laboratoire n'ont pas à subir tous les essais listés à la section 4.3. Certains essais peuvent être choisis comme indicateurs de façon à repérer les formulations ayant le plus de potentiel. Les mélanges les plus prometteurs, les réactifs choisis et leurs proportions pourront ensuite être testés de façon exhaustive en laboratoire et à l'échelle pilote.

Il est prévu que les critères de rendement post-traitement soient mesurés après un mûrissement de 56 jours. Cette durée a été choisie car elle est parfois incluse dans des protocoles d'essais physiques sur des monolithes fabriqués avec des liants hydrauliques.

Le temps de mûrissement requis après le traitement par stabilisation et solidification peut créer des difficultés par rapport à la vérification de conformité et au respect de l'échéancier d'un projet. En pratique, les propriétés du monolithe devraient s'améliorer avec la durée du mûrissement. Pour cette raison, lorsqu'un critère de rendement est respecté avant 56 jours de mûrissement, il est considéré conforme à 56 jours.

Les essais à l'échelle pilote sont ceux qui sont effectués sur un volume restreint (10 % du volume total à traiter) de matières résiduelles ou de sols contaminés. La période des essais est limitée dans le temps. Les essais pilotes n'ont pas pour objectif d'obtenir des revenus en commercialisant les monolithes générés par ces essais. Les essais à l'échelle pilote permettent notamment de déterminer la technique de mélange qui sera utilisée, les équipements requis, le taux d'alimentation et le temps de mélange. Ces essais sont réalisés le plus possible de façon à être représentatifs de l'éventail des conditions qui seront rencontrées à grande échelle. Ils permettent par exemple d'anticiper les nuisances possibles (bruit, poussière), les problèmes liés à la santé et à la sécurité du public ou des travailleurs, les difficultés de manipulation ou des problèmes d'homogénéité des intrants ou des mélanges obtenus.

La technique de mélange est particulièrement importante afin d'obtenir un bon contact entre les réactifs et les matières résiduelles ou les sols à traiter. En ce sens, lorsque les conditions le permettent, les techniques de mélange hors terre sont à privilégier par rapport aux techniques *in situ*.

La ou les formulations permettant l'atteinte des critères fixés à la section 5.2 seront celles qui seront retenues pour le traitement à grande échelle des matières résiduelles ou des sols à stabiliser et à solidifier.

Pour chaque matière résiduelle ou sol à traiter, il est recommandé que ces essais en laboratoire ou à l'échelle pilote soient réalisés sur au moins deux échantillons parmi ceux qui sont prélevés. D'une part, l'échantillon le plus contaminé ou ayant les caractéristiques les plus limitantes en rapport avec les performances de la stabilisation et solidification. D'autre part, un échantillon représentatif de la contamination ou des caractéristiques moyennes. En testant un échantillon fortement contaminé, on simule un scénario « pire cas »; on s'assure ainsi que tout le matériel puisse être adéquatement traité par stabilisation et solidification. Les essais sur un échantillon de contamination moyenne permettent une estimation plus réaliste des conditions qui seront le plus souvent rencontrées à grande échelle.

S'il y a divergence entre les résultats des essais en laboratoire et à l'échelle pilote, ce sont ces derniers qui sont retenus, car ils sont plus représentatifs des conditions qui seront rencontrées à grande échelle.

À la suite des essais en laboratoire et à l'échelle pilote, il faut mettre en place un programme complet de contrôle et d'assurance de la qualité du traitement à grande échelle. Le but de ce programme est, d'une part, de s'assurer que les conditions d'opération choisies à l'échelle pilote sont respectées. D'autre part, il s'agit de démontrer que le procédé est toujours en mesure, lors de l'opération journalière à grande échelle, de produire un résultat respectant les critères fixés à la section 5.2. Un monolithe qui ne respecte pas les critères fixés peut être broyé et servir d'intrant dans la fabrication d'un autre monolithe.

À grande échelle, la fréquence d'échantillonnage pour la réalisation des essais varie d'un projet à l'autre en fonction notamment de l'hétérogénéité du sol ou de la matière résiduelle à traiter et du nombre de formulations choisies. Une série d'essais est généralement réalisée par 400 m³ à 800 m³ de matériau stabilisé et solidifié (U.S. Army Corps of Engineers, 1995). Au moins 10 % des échantillons sont prélevés et testés en double à des fins de contrôle de qualité.

Les détails de ce programme ainsi que les résultats d'essais en laboratoire et à l'échelle pilote devront nécessairement faire partie de la demande d'autorisation ou d'approbation du plan de réhabilitation (consultez le tableau 2 du présent document).

4.3 Description des essais proposés

Le tableau 3 résume l'ensemble des essais devant être réalisés lors d'un projet visant à évaluer l'efficacité d'un procédé de stabilisation et solidification (Environnement Canada, 1992).

Les essais sont divisés en trois groupes : les analyses physiques ou chimiques (groupe A), l'évaluation de la stabilisation (groupe B) et l'évaluation de la solidification (groupe C).

En fonction du scénario choisi et des critères de rendement applicables (voir la section 5), les essais listés au tableau 3 ne sont pas tous requis.

Tableau 3 : Protocoles d'essais

Groupe	Matière résiduelle ou sol testé	Indicateur de rendement	Expression	Protocoles d'essais (choisir l'édition courante) ¹
A	Brut (avant traitement) et traité	Variation de volume	Rapport (V/V)	Brut et excavé Détermination de la masse volumique, méthode d'essai LC 21-060 de Transports Québec ² Traité: Des protocoles de mesure de la conductivité hydraulique ou de la résistance physique prévoient aussi la mesure de la masse volumique.
	Traité	Porosité/saturation	(%)	Détermination de la teneur en eau par séchage à 60 °C dans une étuve. L'échantillon est broyé à moins de 56 mm de diamètre. Adaptez la norme CAN/BNQ ³ 2501-170.
				Densité relative des grains solides – méthode sèche (specific gravity – dry method) ⁴ . L'échantillon est broyé à moins de 2 mm. Des protocoles de mesure de la conductivité hydraulique prévoient aussi la mesure de la porosité et de la saturation.
	Brut	Granulométrie		Analyse granulométrique Méthode MA. 100 - Gran. 1.0 du CEAEQ ⁵ ou Méthode d'essai LC 21-040 de Transports Québec
	Brut	pH		Méthode MA. 100 – pH 1.1 du CEAEQ
	Brut	Teneur en carbone organique total	(%)	Carbone organique total Méthode MA. 405 – C 1.0 du CEAEQ
	Brut	Analyse du contenu total	(mg/kg, base sèche),	Digestion/extraction et analyse Méthode MA. 200-mét. 1.2 du CEAEQ (pour les métaux totaux extractibles)
B	Traité	Capacité de neutralisation des acides	(eq/kg de monolithe)	Méthode MA. 110 – C. neu 1.0 du CEAEQ
	Brut et traité	Quantité de contaminants lixiviables à l'eau	(mg\L), dans le lixiviat	Méthode MA.100-Lix.com.1.0 du CEAEQ
	Matière résiduelle brute	Quantité de contaminants susceptible d'être lixiviée en milieu acide acétique	(mg\L), dans le lixiviat	Méthode MA.100-Lix.com.1.0 du CEAEQ

Groupe	Matière résiduelle ou sol testé	Indicateur de rendement	Expression	Protocoles d'essais (choisir l'édition courante) ¹
	Matière résiduelle ou sol traité	Quantité de contaminants susceptible d'être lixiviée en milieu acide acétique	(mg\L), dans le lixiviat	Méthode MA.100-Lix.com.1.0 du CEAEQ Utilisez la méthode modifiée si la capacité de neutralisation est supérieure à 3 eq/kg à pH 9.
	Brut et traité	Quantité de contaminants susceptible d'être lixiviée par des pluies acides	(mg\L), dans le lixiviat	Méthode MA.100-Lix.com.1.0 du CEAEQ
	Traité (si requis)	Potentiel de génération d'acide	(positif/négatif)	Méthode MA. 110-ACISOL 1.0 du CEAEQ
C	Traité	Mobilité des contaminants dans le monolithe Mesurer également le pH de l'eau	Indice de diffusivité	Essai de lixiviation dynamique (dynamic leach test) ⁴ ou American Nuclear Society, méthode ANSI/ANS-16.1-2003
	Traité	Conductivité hydraulique	(m/s)	Perméabilité à pression décroissante (falling-head hydraulic conductivity) ⁴ ou Méthode CRD-C 48-92 de l'USACE ⁶ (standard test method for water permeability of concrete)
	Traité	Résistance physique (après immersion). Quatre répétitions	(kPa)	Compressive strength of cylindrical concrete specimens, méthode ASTM ⁷ C39/C 39M (prévoit également la mesure de la masse volumique)
	Traité	Altération	(perte de poids, %)	Cycles de mouillage/séchage ⁴ ou Méthode ASTM D4843 (mouillage/séchage)
	Traité (si requis)	Biodégradabilité	(réussite/échec)	Développement de matières biologiques Adaptez les méthodes ASTM G 21 et G22

Groupe A : analyses physiques ou chimiques.

Groupe B : évaluation de la stabilisation.

Groupe C : évaluation de la solidification.

1. La documentation relative aux protocoles d'essais est listée dans les références à la fin du présent document. D'autres protocoles équivalents peuvent être acceptables avec l'accord du MELCC.

2. LC : Laboratoire des chaussées du ministère des Transports.

3. BNQ : Bureau de normalisation du Québec.
4. Protocoles reproduits dans Ministère de l'Environnement et de la Faune (1995), voir la référence à la fin du présent document.
5. CEAEQ : [Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec](#).
6. USACE: US Army Corps of Engineers.
7. ASTM: American Society for Testing and Material.

4.3.1 Groupe A (analyses physiques ou chimiques)

Les informations obtenues à l'aide des essais du groupe A permettent d'évaluer les propriétés physiques ou chimiques de la matière résiduelle ou du sol traité et de repérer, dans la matière résiduelle ou le sol brut (avant traitement), les contaminants à surveiller lors des essais de lixiviation.

4.3.1.1 Variation de volume

La variation de volume est causée par les additifs ajoutés à la matière résiduelle ou au sol à traiter par stabilisation et solidification.

Elle doit être tenue en compte si l'on prévoit, par exemple, remettre en place des sols excavés après leur traitement par stabilisation et solidification. La variation de volume peut aussi avoir une influence sur la durée de vie résiduelle d'un lieu d'enfouissement.

On utilise les équations suivantes : $\rho_b = \frac{M_{eb}}{V_{eb}}$ où

ρ_b : masse volumique de la matière résiduelle ou du sol avant traitement (brut). La méthode d'essai LC 21-060 de Transports Québec permet de déterminer la masse volumique tassée ou non tassée selon le cas.

M_{eb} : masse de l'échantillon de matière résiduelle ou de sol avant traitement (brut).

V_{eb} : volume de l'échantillon de matière résiduelle ou de sol avant traitement (brut).

$$\rho_m = \frac{M_{em}}{V_{em}} = \frac{M_{em}}{\pi \times r^2 \times L} \quad \text{où}$$

ρ_m : masse volumique du monolithe obtenue après traitement. Certains protocoles de mesure de la conductivité hydraulique ou de la résistance physique (sections 4.3.3.2 et 4.3.3.3) incluent également la détermination de la masse volumique.

M_{em} : masse de l'échantillon du monolithe obtenu après traitement.

V_{em} : volume de l'échantillon du monolithe obtenu après traitement (l'échantillon est le plus souvent cylindrique).

r : rayon de l'échantillon cylindrique du monolithe.

L : longueur de l'échantillon cylindrique du monolithe.

La variation de volume est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$\Delta V = \frac{V_m}{V_b} = \frac{\frac{M_m}{\rho_m}}{\frac{M_b}{\rho_b}} \quad \text{où}$$

M_m : masse du monolithe obtenu après traitement.
 M_b : masse de la matière résiduelle ou du sol avant traitement (brut).
 V_m : volume du monolithe obtenu après traitement.
 V_b : volume de la matière résiduelle ou du sol avant traitement (brut).
 ΔV : variation de volume.

4.3.1.2 Porosité et saturation

La porosité est le rapport du volume vide au volume total. La porosité est l'un des paramètres qui influencent la vitesse et la quantité de solution lixiviante qui peut passer à travers le monolithe. Lorsque la porosité est élevée, les pores peuvent être interconnectés, ce qui favorise la mobilité des contaminants. Il n'y a pas de critère de rendement pour la porosité (voir le tableau 5), mais c'est un paramètre pertinent

car il est indicateur de l'efficacité du confinement physique (solidification) du procédé. Les mesures de porosité peuvent être interprétées en les comparant les unes relativement aux autres pour différentes formulations ou différents sols ou matières résiduelles traités.

Le degré de saturation est le rapport du volume de vide rempli d'eau au volume total de vide. Il n'y a pas de critère de rendement pour le degré de saturation (voir le tableau 5), mais c'est un facteur influençant la résistance d'un matériau. Un degré de saturation trop élevé ou trop faible aura un effet négatif sur la qualité du monolithe.

Certains protocoles de mesure de la conductivité hydraulique (voir la section 4.3.3.2) incluent également la détermination de la porosité et de la saturation.

Alternativement, pour évaluer la porosité totale du monolithe et son degré de saturation, on mesure son contenu en eau, sa masse volumique et la densité relative des solides. On note que ces essais sont réalisés après stabilisation et solidification.

La teneur en eau est déterminée par séchage à 60 °C afin d'éviter la perte de l'eau d'hydratation.

La densité relative d'un solide est le rapport, à une température donnée, entre la masse des grains solides et la masse d'un volume d'eau égal au volume des grains. On emploie un gaz inerte (méthode sèche) pour évaluer la densité relative des solides.

Avec ces données en main, la porosité est calculée avec les équations suivantes :

$$v = \frac{Dr\rho_e(1+e)}{\rho_m} - 1 \qquad P = \frac{v}{1+v}$$

où

v : indice des vides.

Dr : densité relative des matières solides.

pe : masse volumique de l'eau.

P : porosité.

e : teneur en eau.

ρ_m : masse volumique du monolithe.

Quant au calcul du degré de saturation, il se fait comme suit :

$$Sr = e \frac{Dr}{v} \qquad \text{où} \qquad Sr : \text{degré de saturation.}$$

4.3.1.3 Granulométrie

La granulométrie consiste à déterminer la proportion des diverses classes de grosseur des particules. L'évaluation de la distribution des tailles des particules des matières résiduelles ou des sols contaminés donne des indices de certaines difficultés qui peuvent être rencontrées lors du traitement par stabilisation et solidification. Il n'y a pas de critère pour la granulométrie (voir le tableau 5), mais une trop grande proportion de particules fines aboutira à un matériau stabilisé et solidifié ayant une durabilité médiocre. En revanche, les particules de très grande taille devront être broyées ou enlevées avant le traitement.

4.3.1.4 pH

Il s'agit d'une mesure de l'acidité ou de la basicité d'une matière résiduelle ou d'un sol à traiter. Un sol ou une matière résiduelle acide sera plus difficile à traiter avec un liant cimentaire.

4.3.1.5 Teneur en carbone organique total

Cet essai est requis car les matières organiques peuvent gêner le processus de cimentation et mener potentiellement à la biodégradation du monolithe. Cet essai est réalisé sur la matière résiduelle ou le sol brut (avant le traitement).

Le carbone organique total (COT) permet d'évaluer la quantité de matière organique présente dans un échantillon solide. À titre indicatif, la teneur en matière organique d'un sol est approximativement le double de celle en COT.

Le COT est mesuré à l'aide d'une titration avec du bichromate de potassium. La mesure de la quantité de bichromate n'ayant pas réagi avec l'échantillon permet d'obtenir la concentration de COT.

On ne recommande pas de mesurer la matière organique par la perte de dioxyde de carbone à haute température car le résultat peut être surestimé pour des matières résiduelles ou des sols carbonatés.

4.3.1.6 Analyse du contenu total

L'analyse du contenu total extractible en métaux a pour but de déterminer les contaminants qui sont présents dans la matière résiduelle ou le sol brut (avant le traitement). Seuls les contaminants présents dans la matière résiduelle en quantités telles qu'ils pourront avoir un résultat de lixiviation au-delà des critères du tableau 5 devront par la suite être analysés lors des autres essais.

Il est aussi nécessaire de repérer les composés qui pourraient être nuisibles pour le procédé ou qui devraient faire l'objet d'un traitement supplémentaire de stabilisation (voir la section 2.3). Normalement, les paramètres à analyser devraient comprendre les métaux ainsi que les contaminants organiques d'intérêt en fonction de la nature de la matière résiduelle ou du sol à traiter.

Pour les métaux, le contenu total extractible correspond généralement à ceux qui sont présents, sauf les métaux emprisonnés dans des mailles de silicates ou ceux qui sont associés à des oxydes réfractaires.

Dans les modèles d'exposition à des métaux totaux extractibles, les voies principalement considérées sont l'ingestion, l'inhalation et le contact cutané avec la fraction fine du sol ou de la matière résiduelle. Ces voies d'exposition ne sont pas pertinentes pour un monolithe comme ceux que l'on obtient après un traitement par stabilisation et solidification, dans la mesure où le monolithe conserve son intégrité physique. C'est pour cette raison que les analyses totales extractibles ne sont réalisées que sur l'échantillon brut (avant traitement).

Par ailleurs, il est requis de mesurer le soufre total dans la matière résiduelle ou le sol à traiter afin de vérifier si le test de potentiel de génération d'acide (voir la section 4.3.2.5) est pertinent.

4.3.2 Groupe B (évaluation de la stabilisation principalement par la mesure de la mobilité des contaminants)

Les essais proposés pour le groupe B visent principalement à évaluer l'efficacité du procédé de stabilisation.

Pour faciliter l'application, les tests de lixiviation choisis aux sections 4.3.2.2 à 4.3.2.4 sont standardisés (ratio liquide/solide, solution de lixiviation, temps de contact...). Il ne faut pas s'attendre à ce que les

concentrations mesurées soient nécessairement représentatives des concentrations dans l'eau à un endroit donné du terrain à l'étude. Dans une approche conservatrice d'un point de vue environnemental, l'objectif est d'estimer la rétention des contaminants indépendamment du confinement physique dans la matrice solide.

4.3.2.1 Capacité de neutralisation des acides

Ce test évalue la capacité du monolithe à maintenir un pH élevé (basique) durant une période prolongée.

La précipitation des hydroxydes est un mécanisme important de rétention des métaux dans les matrices cimentaires.

La figure 3 illustre la solubilité de différents hydroxydes de métaux en fonction du pH. La partie inférieure de chaque courbe permet de connaître le pH auquel la précipitation de l'hydroxyde de métal sera maximale.

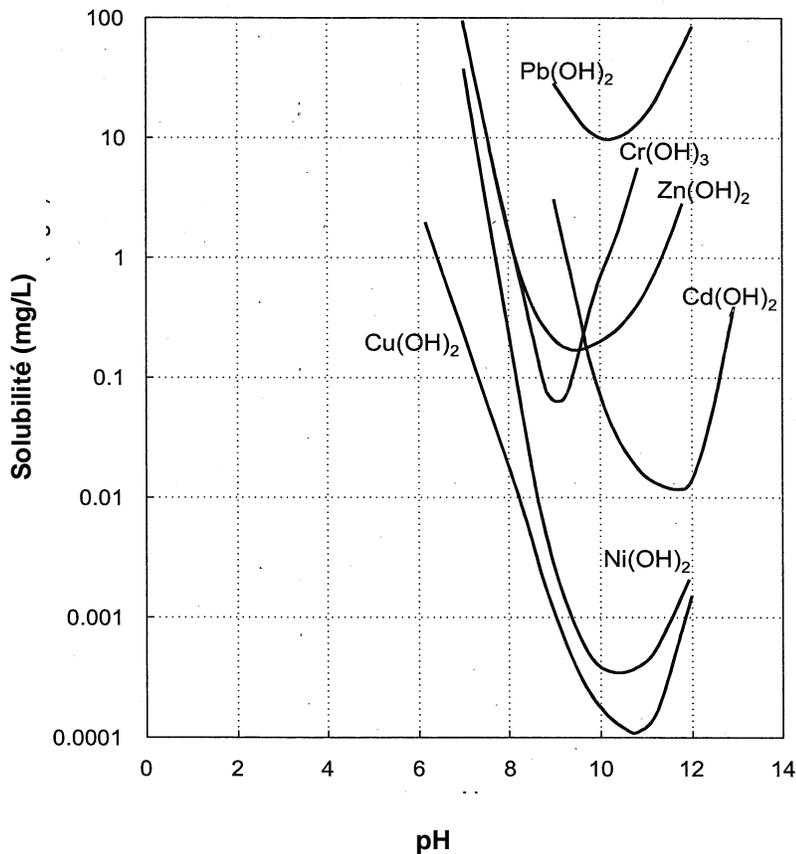


Figure 3 : Solubilité des hydroxydes de métaux en fonction du pH

(Tirée de Paria et Yuet, 2006, reproduite avec permission)

Au départ, les matrices cimentaires auront généralement un pH supérieur à 11. Cependant, le pH peut diminuer avec le temps à cause des attaques de monolithe par des précipitations acides par exemple. Il peut aussi y avoir une réaction de carbonation (transformation des hydroxydes en carbonates) à la suite de la réaction de la chaux avec le dioxyde de carbone dans l'air. Cette réaction en surface du monolithe provoquera une diminution de pH et un changement de volume du monolithe, ce qui peut causer de la fissuration.

La capacité de neutralisation des acides mesure donc indirectement la rétention des métaux dans le monolithe et la résistance de ce dernier à des mécanismes de dégradation.

La méthode consiste à mélanger les échantillons à des quantités croissantes d'acide minéral et à rapporter la capacité de neutralisation de la première solution dont le pH est inférieur à 9. Il est à noter que le protocole ne prévoit pas de rapporter le pH mesuré. Si l'on désire connaître exactement ce pH, il faudrait le préciser à l'avance dans la demande d'analyse soumise au laboratoire.

4.3.2.2 Concentration initiale des lixiviats (lixiviation à l'eau)

Il s'agit d'un test de lixiviation où tout l'échantillon est finement broyé (100 mesh) et mélangé avec quatre parties d'eau distillée et déminéralisée.

En broyant finement l'échantillon, on cherche à atteindre des conditions d'équilibre dans le lixiviat après une extraction.

Les résultats obtenus sont une indication de la concentration des contaminants qui sont facilement disponibles (lixiviation à court terme). Le test est réalisé avant et après le traitement par stabilisation et solidification.

4.3.2.3 Quantité de contaminants susceptible d'être lixiviée en milieu acide acétique

Ce test est réalisé sur la matière résiduelle brute (avant traitement) afin de vérifier s'il s'agit d'une matière lixiviable dangereuse au sens du RMD. Lorsque c'est requis pour que tout le solide passe à travers un tamis de 9,5 mm, le protocole prévoit que l'échantillon soit broyé. Le ratio solide/liquide est de 1 : 20.

Pour les matières résiduelles ou les sols traités, il s'agit d'un essai relativement agressif visant à déterminer la quantité de contaminants susceptible d'être lixiviée à long terme. La solution de lixiviation acide vise à accélérer le phénomène de neutralisation qui se produira avec le vieillissement de la matrice.

Pour les matrices dont la capacité de neutralisation est supérieure à 3 eq/kg à pH 9 (voir la section 4.3.2.1), le test a été adapté en modifiant la solution de lixiviation afin de maintenir un pH constant à 5. De plus, le test modifié prévoit un broyage fin (100 mesh) de l'échantillon afin d'atteindre les conditions d'équilibre des contaminants entre la phase solide et le lixiviat et afin de maximiser les concentrations obtenues après une extraction.

4.3.2.4 Quantité de contaminants susceptible d'être lixiviée par des pluies acides

Il s'agit d'un test de lixiviation où le liquide utilisé pour l'extraction est constitué d'un mélange d'acide nitrique et d'acide sulfurique afin de simuler les précipitations acides. Lorsque c'est requis pour que tout le solide passe à travers un tamis de 9,5 mm, le protocole prévoit que l'échantillon soit broyé. Le ratio solide/liquide est de 1 : 20. Le test est réalisé avant et après traitement.

4.3.2.5 Potentiel de génération d'acide

Dans certaines conditions, les composés sulfurés présents dans une matière résiduelle ou un sol peuvent réagir et former de l'acide, ce qui peut entraîner une détérioration du monolithe.

La réalisation du test de potentiel de génération d'acide dépend de la teneur en soufre total dans les matières résiduelles ou les sols à traiter (voir la section 4.3.1.6). Dans un contexte de traitement par stabilisation et solidification dans des matrices cimentaires, la réalisation du test dépend également de la capacité de neutralisation des acides du monolithe (voir la section 4.3.2.1).

Lorsqu'un liant cimentaire est utilisé en quantité suffisante pour que la capacité de neutralisation des acides soit de 3 eq/kg, il est probable que le potentiel de génération d'acide sera négatif, à moins que la

teneur en soufre total des matières résiduelles ou du sol à traiter ne soit de l'ordre de quelques points de pourcentage. Par calcul, il faudrait une concentration de soufre total de l'ordre de 5 % pour obtenir un potentiel d'acidification d'environ 3 eq/kg.

En appliquant un facteur de sécurité, lorsque la capacité de neutralisation des acides est supérieure à 3 eq/kg à pH 9, le potentiel de génération d'acide ne sera vérifié que si la teneur en soufre total est supérieure à 2 %.

Lorsqu'il est requis en fonction des informations données ci-dessus, le potentiel de génération d'acide sera mesuré dans le monolithe après traitement par stabilisation et solidification.

4.3.3 Groupe C (évaluation de la solidification par la mesure de la qualité de la matrice)

Les essais du groupe C s'effectuent sur un échantillon solide monolithique obtenu après le traitement par stabilisation et solidification. Ces essais ont pour but de déterminer la durabilité de la matrice solide et d'évaluer son efficacité à emprisonner les contaminants.

La qualité du monolithe peut se dégrader avec le temps sous l'effet d'un stress mécanique ou des intempéries par exemple. C'est pourquoi il faut faire des essais de durabilité physique.

4.3.3.1 Mobilité des contaminants dans la matrice (diffusion)

La diffusion est le transport lent des contaminants causé par une différence de concentration entre l'eau de porosité du monolithe et la solution lixiviante.

L'essai est réalisé en plaçant dans un contenant d'eau déminéralisée un échantillon cylindrique obtenu après stabilisation et solidification. L'essai est utilisé pour évaluer un écoulement autour du monolithe. L'écoulement intermittent retenu dans la méthode d'analyse permet de simplifier l'opération par rapport à un écoulement continu. Le taux de renouvellement de la solution lixiviante est suffisamment élevé pour maintenir de très faibles concentrations dans le lixiviat, maximisant ainsi les vitesses de diffusion.

L'objectif est de mesurer le potentiel de libération lente (diffusion) des contaminants à partir d'échantillons du monolithe. Les résultats obtenus servent à calculer des indices de diffusivité qui sont d'excellents indicateurs de l'efficacité du traitement de solidification. Un indice élevé indique une faible mobilité du contaminant.

Les concentrations mesurées dans l'eau après leur diffusion à partir du monolithe devraient être plus faibles que celles qui sont obtenues avec les tests de lixiviation à l'eau, à l'acide acétique ou aux pluies acides (sections 4.3.2.2 à 4.3.2.4). De plus, le pH de l'eau doit être mesuré.

Si le transport des contaminants dans le monolithe est contrôlé par la diffusion, leur concentration dans l'eau peut être très faible. Il faut donc que la méthode analytique choisie ait une limite de quantification suffisamment basse pour permettre la mesure des contaminants présents.

4.3.3.2 Conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique est déterminée après traitement par stabilisation et solidification à partir d'échantillons du monolithe.

La conductivité hydraulique mesure la capacité d'un matériau à laisser passer l'eau. On cherche à obtenir une conductivité hydraulique équivalente à celle d'une argile (10^{-8} à 10^{-9} m/s) afin d'empêcher l'eau de traverser rapidement le monolithe. On limite ainsi le transport des contaminants par advection en réponse à une pression causée par un gradient hydraulique par exemple.

Lorsque la conductivité hydraulique du monolithe est suffisamment faible par rapport à celle du matériau environnant, si de l'eau vient en contact avec le monolithe, elle le contournera. Le contact se produira en surface, de sorte que le transport des contaminants soit principalement contrôlé par leur diffusion (voir la section 4.3.3.1).

4.3.3.3 Résistance physique après immersion

L'objectif est de mesurer la résistance du monolithe à un stress physique, ce qui est un indice de durabilité de la solidification. La résistance à la compression sans étreinte latérale doit être mesurée après immersion afin de s'assurer que la résistance est attribuable au liant et non au séchage.

Si la résistance à la compression est plus faible que ce qui est anticipé, il est pertinent d'examiner l'échantillon fracturé afin d'y rechercher de grands espaces vides ou des indices de ségrégation dans le mélange.

Des résultats variables (coefficient de variation supérieur à 33 %) peuvent également être un indice d'une mauvaise homogénéisation des intrants (ADEME, 2006). Pour cette raison, il est pertinent de réaliser des mesures de résistance à la compression sur quatre échantillons provenant du même monolithe.

4.3.3.4 Altération (cycles de mouillage/séchage)

Comme son nom l'indique, ce test mesure la capacité du monolithe à résister aux agressions du climat. Par exemple, l'absorption d'eau à la suite du mouillage du monolithe peut causer des fissures. Le monolithe résistera bien à ces agressions si sa conductivité hydraulique (voir la section 4.3.3.2) est faible.

Les essais de cycles de mouillage/séchage permettent la mesure de la perte de poids de l'échantillon relativement à un témoin. On utilise 12 répétitions du cycle de mouillage/séchage pour chacun des essais.

Il existait également un protocole pour évaluer la capacité d'un monolithe à résister aux cycles de gel/dégel (ASTM D4842, Standard test method for determining the resistance of solid wastes to freezing and thawing). Cependant, ce protocole a été retiré par l'ASTM à cause de problèmes liés à la préparation des échantillons. De plus, le test de mouillage/séchage est plus sensible, plus facile à exécuter et donne une meilleure reproductibilité que le test de gel/dégel.

4.3.3.5 Biodégradabilité

Cet essai permet d'évaluer le potentiel de biodégradation des matières résiduelles ou des sols stabilisés et solidifiés. La dégradation de la matière organique peut réduire l'intégrité physique d'un monolithe.

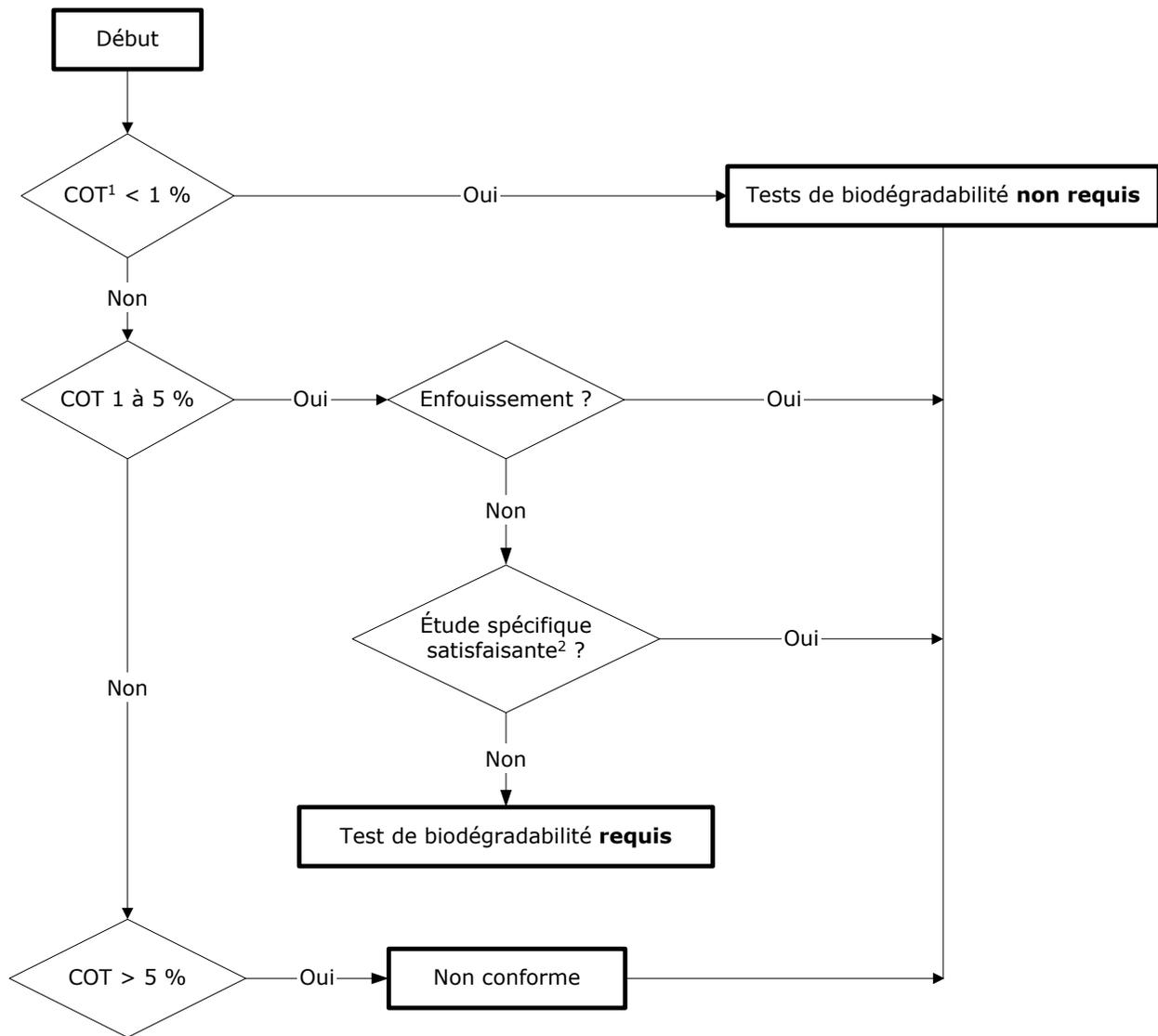
La figure 4 illustre un schéma décisionnel qui montre les situations où les essais de biodégradabilité sont requis en fonction des résultats de carbone organique total (COT, voir la section 4.3.1.5). Les essais de biodégradabilité ne sont pas requis quand la teneur est inférieure à une limite préétablie de 1 % en COT.

Si le monolithe est destiné à être éliminé par enfouissement, la teneur en COT peut atteindre 5 % sans que les essais de biodégradabilité soient requis.

La teneur en COT peut être supérieure à la limite préétablie de 1 %, mais sans dépasser 5 % si une étude démontre de façon satisfaisante que cette teneur est acceptable pour l'usage prévu. À défaut d'une telle étude, les essais de biodégradabilité doivent être réalisés.

Lorsque la teneur en COT excède 5 %, la matière résiduelle ou le sol n'est pas jugé conforme pour un traitement par stabilisation et solidification.

Lorsque les essais de biodégradabilité sont requis, on doit mesurer la capacité de la matrice à résister au développement de matières biologiques à l'aide des deux méthodes recommandées (voir le tableau 3).



1: COT, teneur en carbone organique total

2: Étude démontrant que la teneur est acceptable pour l'usage prévu

Figure 4 : Tests de biodégradabilité et contenu en matière organique

5. CADRE D'ÉVALUATION

Le cadre d'évaluation varie en fonction du scénario applicable aux sols ou aux matières résiduelles à traiter par stabilisation et solidification.

5.1 Scénarios d'utilisation ou d'élimination

5.1.1 Utilisation limitée du monolithe de matières résiduelles traitées

L'utilisation limitée s'applique aux matières non dangereuses résiduelles traitées par stabilisation et solidification. Les utilisations permises sont limitées et le monolithe doit avoir une valeur pour l'usage auquel il est destiné. Les matériaux respectant les critères de l'utilisation limitée pourraient servir dans certains ouvrages de génie civil, à la condition que ceux-ci présentent des propriétés égales ou supérieures au matériau normalement utilisé. Un suivi très bien encadré devrait aussi être fait.

5.1.2 Maintien des contaminants dans le terrain d'origine

Le maintien à long terme dans le terrain contaminé d'origine des contaminants au-delà des normes prescrites est possible dans le cadre de la procédure d'évaluation des risques. Ces dossiers sont étudiés par le Groupe technique d'évaluation (GTE) en suivant les prescriptions des lignes de conduite pour le traitement des dossiers de terrains contaminés ayant recours à l'analyse de risque (lignes de conduite). Selon le MELCC, ce scénario est à retenir pour la gestion d'un monolithe résultant du traitement de sols contaminés par des contaminants inorganiques. Ce scénario est peu plausible pour le traitement de contaminants organiques à cause de leur effet néfaste sur l'intégrité du monolithe. Il existe d'autres technologies de traitement efficace pour dégrader ou détruire les contaminants organiques. Lors d'une contamination mixte (organique et inorganique), une chaîne de traitements incluant ces technologies et la stabilisation et solidification est possible. En ce qui concerne les composés organiques volatils (COV), les lignes de conduite mentionnent que, lorsque les concentrations mesurées excèdent les valeurs limites réglementaires, il convient d'excaver et de gérer dans un lieu autorisé tous les sols contaminés par des COV. De plus, les lignes de conduite et le Guide d'intervention - Protection des sols et réhabilitation des terrains contaminés ne permettent pas le recours à la procédure d'évaluation des risques dans les cas de contamination par des produits pétroliers provenant du raffinage du pétrole.

Le traitement par stabilisation et solidification de sols contaminés et la valorisation subséquente hors du terrain d'origine ne constituent pas un scénario privilégié par le MELCC. Compte tenu de la difficulté à conserver une traçabilité à long terme des sols contaminés traités par stabilisation et solidification, par précaution, il convient d'éviter leur éparpillement sur des terrains non contaminés.

5.1.3 Élimination dans un lieu visé par le REIMR

Par définition, les matières non dangereuses résiduelles sont admissibles dans un lieu visé par le Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles (REIMR) (c. Q-2, r.19). En pratique, il n'y a donc pas d'intérêt à traiter par stabilisation et solidification une matière non dangereuse résiduelle en vue de l'éliminer dans un tel lieu.

Si la matière non dangereuse résiduelle traitée ne peut respecter les critères d'utilisation limitée (section 5.1.1), il est alors indispensable de revoir le procédé de traitement afin de l'améliorer si cela est possible.

À noter qu'il est prohibé d'enfouir dans un lieu visé par le REIMR des produits résultant du traitement des sols par un procédé de stabilisation et solidification.

5.1.4 Élimination dans un lieu de dépôt définitif de matières dangereuses résiduelles

La matière dangereuse résiduelle traitée qui possède toujours au moins une caractéristique de dangerosité doit être enfouie dans un lieu de dépôt définitif de matières dangereuses tel que décrit dans le Règlement sur les matières dangereuses (Q-2, r.32), nonobstant les matières visées par l'article 94 du RMD.

5.1.5 Élimination dans un lieu visé par le RESC

Lorsqu'une technique d'enlèvement sera disponible, les métaux ou les métalloïdes enlevés pourront être enfouis dans un lieu visé par le Règlement sur l'enfouissement des sols contaminés (c. Q-2, r.18) (RESC) seulement s'ils ont été stabilisés et solidifiés par un traitement autorisé (article 4, 1 b du RESC).

5.2 Critères de rendement

La présente section fournit certains critères de performance et de qualité à atteindre en fonction du scénario de gestion envisagé pour la matière résiduelle ou le sol traité. Il s'agit de critères environnementaux ; les aspects géotechniques ne sont pas couverts par ces critères.

5.2.1 Prévention de la contamination ou réhabilitation

Les matières résiduelles à traiter sont le plus souvent générées par un procédé industriel. Dans un scénario d'utilisation limitée (voir la section 5.1.1), l'objectif est de prévenir une mobilité significative des contaminants car le terrain sur lequel est utilisé le monolithe n'est généralement pas contaminé. Il s'agit d'un contexte de prévention de la contamination où l'on vise à limiter le plus possible la migration des contaminants du monolithe vers le sol et l'eau souterraine situés à proximité.

Le cadre d'évaluation est différent pour les sols contaminés. Le monolithe résultant du traitement des sols par stabilisation et solidification est valorisé sur le terrain contaminé d'origine (voir la section 5.1.2). Les intervenants font face à un fait accompli : ils doivent gérer une contamination existante d'un terrain. On considère que le traitement par stabilisation et solidification fait partie des mesures de réhabilitation du terrain. De plus, comme des contaminants en excès de la norme ou du critère sont maintenus dans le terrain, une évaluation des risques est requise. Cette évaluation est complétée par des mesures de confinement, de contrôle et de suivi des contaminants. Pour les cas réglementés, un avis de contamination et un avis de restriction d'usage doivent être inscrits au Registre foncier du Québec.

Pour ces raisons, l'approche de réhabilitation pour les sols contaminés est plus flexible que l'approche de prévention de la contamination appliquée aux matières résiduelles.

Quant à l'enfouissement, il se déroule dans des lieux dédiés aux activités d'élimination. Ces lieux sont aménagés et exploités en vue de gérer de façon adéquate les risques associés au dépôt définitif des sols ou des matières résiduelles.

Le tableau 4 résume le cadre d'évaluation qui s'applique à un scénario donné de gestion des monolithes obtenus à la suite du traitement par stabilisation et solidification.

Tableau 4 : Cadre d'évaluation et scénarios de gestion du monolithe

Scénario	Utilisation limitée des matières non dangereuses résiduelles traitées	Maintien dans le terrain contaminé d'origine de sols contaminés et traités par stabilisation et solidification	Enfouissement (matières résiduelles traitées ou sols contaminés et traités par stabilisation et solidification)
Cadre d'évaluation	Prévention de la contamination et bonnes pratiques	Réhabilitation avec évaluation et gestion des risques	Gestion des risques

Le tableau 5 indique, pour chaque essai, le critère de rendement devant être atteint selon le scénario envisagé. Pour certains critères de rendement, des informations complémentaires sont fournies aux sections suivantes.

Tableau 5 : Critères de rendement

Groupe	Indicateur de rendement	Utilisation limitée des matières non dangereuses résiduelles traitées	Maintien dans le terrain contaminé d'origine de sols contaminés et traités par stabilisation et solidification	Enfouissement dans un lieu visé par le RESC ¹ Enfouissement selon les normes du Règlement sur les matières dangereuses (RMD)
A	Teneur en carbone organique total (%)	Voir la figure 4		
	Concentration totale extractible des contaminants (mg/kg)	Utilisez ces données pour choisir les contaminants à surveiller dans le lixiviat.		
B	Quantité de contaminants lixiviables à l'eau (mg/L)	< critère de mobilité (tableau 6)		Non requis
	Quantité de contaminants susceptible d'être lixiviée en milieu acide acétique (mg/L)	< critère de mobilité (tableau 6)		Concentration des contaminants > normes de lixiviation du RMD pour l'enfouissement selon ce règlement. Non requis pour l'enfouissement dans un lieu visé par le RESC des métaux ou métalloïdes enlevés.
	Quantité de contaminants susceptible d'être lixiviée en milieu acide acétique (mg/L) Méthode modifiée lorsque la capacité de neutralisation est supérieure à 3 eq/kg à pH 9.	< 10 x critère de mobilité (tableau 6)		Non requis
	Quantité de contaminants susceptible d'être lixiviée par des pluies acides (mg/L)	< 10 x critère de mobilité (tableau 6)		Non requis
	Capacité de neutralisation des acides (eq/kg)	> 3 (pH 9)		> 1 (pH 9)
	Potentiel de génération d'acide (si requis)	Négatif		Non requis
C	Mobilité des contaminants dans la matrice (monolithe)	Indice de diffusivité > 9 Concentration des contaminants < critère de mobilité		Indice de diffusivité > 8

Groupe	Indicateur de rendement	Utilisation limitée des matières non dangereuses résiduelles traitées	Maintien dans le terrain contaminé d'origine de sols contaminés et traités par stabilisation et solidification	Enfouissement dans un lieu visé par le RESC ¹ Enfouissement selon les normes du Règlement sur les matières dangereuses (RMD)
		(tableau 6), mesurer également le pH de l'eau		
	Conductivité hydraulique (m/s)		< 10 ⁻⁹	< 10 ⁻⁸
	Résistance physique après immersion (kPa)		> 3 500	> 700
	Altération	Résiste à 12 cycles avec une perte de poids < 10 %		
	Biodégradabilité (si requis)	Réussite		

Groupe A : analyses physiques ou chimiques.

Groupe B : évaluation de la stabilisation.

Groupe C : évaluation de la solidification.

1. Lorsqu'une technique d'enlèvement sera disponible, les métaux ou les métalloïdes enlevés pourront être enfouis dans un lieu visé par le RESC s'ils ont été stabilisés et solidifiés par un traitement autorisé (article 4, 1° b du RESC).

5.2.2 Les critères de rendement de la stabilisation

En ce qui concerne la stabilisation, les résultats des tests de lixiviation évaluent un potentiel de mobilité des contaminants. Pour les scénarios d'utilisation limitée ou de maintien dans le terrain contaminé d'origine, les résultats des trois tests de lixiviation (eau, pluies acides, acide acétique) après le traitement sont comparés aux critères de mobilité (voir le tableau 6). Pour les contaminants inorganiques qui ne sont pas listés au tableau 6, les critères de mobilité seront élaborés cas par cas.

Le respect des critères de mobilité ne doit pas être attribuable à la dilution causée par l'ajout des additifs, de la pierre concassée et de l'eau lors du procédé de stabilisation et de solidification (voir la section 5.2.4).

Il peut être difficile de départager la rétention d'un métal causée par la stabilisation de celle qui est causée par une variation de pH parce qu'un même essai de lixiviation n'est pas réalisé au même pH avant et après le traitement.

En revanche, il est certain qu'un monolithe intègre freine la migration des contaminants en les emprisonnant physiquement. Lors de la réhabilitation d'un terrain affecté par une contamination existante (voir la section 5.2.1), l'atteinte de résultats pour la solidification qui dépassent les critères de rendement ainsi que des mesures de confinement/contrôle/suivi du monolithe peuvent permettre de compenser jusqu'à un certain point des résultats d'essais de stabilisation moins performants.

Tableau 6 : Critères de mobilité

Contaminants	Critères de mobilité (mg/L)
Arsenic (As)	0,025
Baryum (Ba)	1
Bore (B)	5
Cadmium (Cd)	0,005
Chrome total (Cr)	0,05
Cuivre (Cu)	1
CN ⁻ (lixiviation à l'eau seulement)	0,2
Fluorure	1,5
Mercure (Hg)	0,001
Plomb (Pb)	0,01
Sélénium (Se)	0,01

5.2.3 Les critères de rendement de la solidification

L'emprisonnement des contaminants sera d'autant plus efficace que le monolithe aura une bonne intégrité physique, d'où l'importance de fixer des critères de rendement pour la solidification.

Les critères de rendement du monolithe sont évalués après 56 jours de mûrissement. Cependant, pour des raisons pratiques, ces tests peuvent être réalisés après une période de mûrissement plus courte. On assume que les propriétés du monolithe s'amélioreront avec le mûrissement. Par exemple, si un critère de rendement est atteint après 28 jours, le monolithe est jugé conforme par rapport à ce critère.

5.2.3.1 Mobilité des contaminants dans la matrice

L'indice de diffusivité permet d'évaluer la mobilité des contaminants dans la matrice. Un indice élevé indique une faible mobilité et vice versa.

Les indices de diffusivité listés au tableau 5 sont >8 ou >9 en fonction du scénario de gestion du monolithe. Par exemple, des indices de diffusivité de 8 ou 9 correspondent à une perte cumulative après 100 ans de moins de 5 % de la charge de contaminants d'un monolithe cubique de 10 m³ (Environnement Canada, 1992).

Le transport par diffusion augmente avec le rapport surface/volume du monolithe. Si l'on désire limiter le transport des contaminants par diffusion, il est préférable d'éviter de fabriquer plusieurs petits monolithes.

Les équations requises pour le calcul de l'indice de diffusivité sont détaillées dans le protocole de l'American Nuclear Society (ANS, 2003). Le calcul de l'indice requiert notamment la mesure de la concentration du contaminant dans l'eau autour du monolithe.

Même si le pH dans l'eau n'est pas nécessaire pour le calcul de l'indice, la mesure de ce paramètre est recommandée. Dans le cas d'un monolithe à base de ciment, il est possible que le pH mesuré soit très basique, d'où l'importance de prévoir des mesures de gestion des risques permettant d'éviter le contact du monolithe avec l'eau (voir la section 6).

5.2.3.2 Capacité de neutralisation des acides

En fonction du scénario, la capacité doit être suffisante pour permettre le maintien d'un pH de 9 après l'ajout de 1 ou 3 équivalents d'acide par kilogramme de monolithe.

À titre de comparaison, 1 eq/kg signifie que chaque kilogramme du monolithe peut neutraliser 10 000 litres d'eau acide à un pH de 4. Le pH de 9 a été choisi afin de s'assurer que la capacité de neutralisation des acides est fournie par les produits d'hydratation du ciment plutôt que par les métaux précipités (Environnement Canada, 1992).

5.2.3.3 Résistance physique après immersion

Au Québec, deux critères sont le plus souvent applicables c'est-à-dire >700 kPa ou >3 500 kPa de résistance en compression après immersion.

La valeur moins restrictive de 700 kPa a été retenue pour les scénarios d'enfouissement étant donné que les lieux d'enfouissement sont assujettis à des normes sévères d'aménagement et d'exploitation.

Le scénario d'utilisation limitée du monolithe de matières résiduelles traitées se déroule dans un environnement moins contrôlé qu'un lieu d'enfouissement. Pour cette raison, un critère de >3 500 kPa a été retenu. Il en est de même pour le maintien dans le terrain contaminé d'origine, de sols contaminés et traités par stabilisation et solidification.

À titre de comparaison, le béton utilisé pour la fabrication de poutres doit respecter au moins 40 000 kPa de résistance en compression. Quant au béton maigre, il doit respecter au moins 15 000 kPa (MTQ, 1993).

À première vue, les critères de résistance physique de 700 ou 3 500 kPa peuvent sembler peu contraignants comparativement aux exigences appliquées au béton de ciment utilisé en génie civil. Le contexte du traitement par stabilisation et solidification des matières résiduelles ou des sols contaminés est bien différent. Les sols ou matières résiduelles à traiter n'auront pas nécessairement les caractéristiques permettant d'atteindre la résistance en compression exigée pour certains usages en

génie civil. Les scénarios de maintien dans le terrain contaminé d'origine ou d'utilisation limitée doivent être adaptés en conséquence.

Par ailleurs, les contaminants organiques comme les hydrocarbures pétroliers ont un effet négatif sur le développement des liens cimentaires en formant une couche protectrice autour des grains de ciment. En conséquence, il est peu probable que le traitement de contaminants organiques par stabilisation et solidification aboutisse à une matrice qui pourra respecter les critères de résistance physique après immersion. Par exemple, on a rapporté des résultats généralement inférieurs à 700 kPa après 56 jours lors d'essais de traitement d'un sol contaminé avec 1 % de diesel (Kogbara et Al-Tabbaa, 2011).

5.2.4 Critères de rendement complémentaires

Dans les cas des contaminants lixiviés par l'eau ou par les pluies acides (voir le tableau 3), il faut montrer à l'aide de l'équation suivante une réduction réelle des concentrations lixiviées avant et après traitement. C'est-à-dire que la réduction ne doit pas être attribuable à la dilution causée par l'ajout des additifs, de la pierre concassée et de l'eau lors du procédé de stabilisation et de solidification (U.S. Army Corps of Engineers, 1995).

$$\frac{Ma}{Ma + Mb} \left(1 - \frac{[traité]}{[brut]} \right)$$

De plus, pour les comparaisons avant et après traitement, les concentrations traitées doivent être corrigées avec les équations suivantes.

$$Réduction = \left(1 - \left(1 + \frac{Ma}{Mb} \right) * \frac{[traité]}{[brut]} \right)$$

$$[traité-corrigé] = [brut] - ([brut] * réduction)$$

Où

Réduction : réduction obtenue en soustrayant l'effet de dilution.

Ma : masse de tous les additifs, de la pierre concassée et de l'eau ajoutées lors du traitement.

Mb : masse brute (avant traitement) de la matière résiduelle ou du sol.

[traité] : concentration obtenue dans le lixiviat après stabilisation et solidification.

[brut] : concentration du lixiviat de la matière résiduelle ou du sol avant traitement.

[traité-corrigé] : concentration du lixiviat du produit résultant du traitement par stabilisation et solidification, en tenant compte de l'ajout d'eau et d'additif (mg/L).

Pour un même type de lixiviation (à l'eau ou aux pluies acides), les résultats avant et après traitement sont évalués paire par paire en calculant le ratio suivant (adapté de ADEME, 2006) :

$$\frac{[traité - corrigé]}{[brut]} \leq 1$$

Le calcul de ce ratio n'est pas pertinent si [brut] < limite analytique de quantification. Si [traité-corrigé] < limite analytique de quantification, on choisit la moitié de cette limite pour le calcul.

Il est à noter que les mesures des concentrations lixiviées avant et après traitement ne sont pas réalisées au même pH. En comparant ainsi les concentrations lixiviées avant et après traitement, il n'est pas possible de départager l'effet du pH de l'effet des mécanismes de stabilisation des contaminants.

6. GESTION DES RISQUES ET BONNE PRATIQUE

Les critères énumérés au tableau 5 permettent de s'assurer du rendement intrinsèque du procédé de stabilisation et de solidification.

Les mesures de gestion des risques viennent s'ajouter aux critères de rendement et apportent un facteur de sécurité supplémentaire à long terme. Le plus souvent, il s'agira de prolonger la durée de vie du monolithe à très long terme en le confinant ainsi qu'en contrôlant et en suivant l'efficacité du confinement.

Par exemple, les conditions climatiques très rigoureuses du Québec pourraient avoir pour effet de dégrader le monolithe et de permettre la diffusion des contaminants dans l'environnement. Dans certains cas, le béton de construction, lorsqu'il est mal protégé, résiste moins bien au gel/dégel, à la pluie, aux sels de déglçage, etc. Pour ces raisons, la bonne pratique requiert que le monolithe ne soit pas exposé aux intempéries, même si tous les critères de rendement de la stabilisation et de la solidification sont respectés.

Les mesures de gestion des risques sont choisies cas par cas. Le plus fréquemment, le monolithe est recouvert et l'on fait en sorte qu'il ne vienne pas en contact avec les eaux de surface et les eaux souterraines. Le promoteur s'engagera à maintenir, entretenir et réparer les ouvrages de confinement et à consigner ses inspections et ses travaux d'entretien ou de réparation dans un registre disponible sur demande d'un officier du MELCC.

À l'inverse, le broyage du monolithe contenant les matières résiduelles traitées ou contenant les sols contaminés et traités par stabilisation et solidification et l'utilisation subséquente des granulats avec ou sans contact avec l'eau ne sont pas techniquement acceptables selon le MELCC car cette gestion n'apporte pas le facteur de sécurité recherché.

Les mesures de gestion des risques ne dispensent pas de réaliser les essais énumérés au tableau 5. Cependant, dans le contexte de réhabilitation décrit à la section 5.2.1 pour les sols contaminés, la mise en place de mesures de confinement, de contrôle et de suivi peut permettre de relativiser les résultats d'essais de stabilisation par rapport aux conditions rencontrées sur le terrain (voir la section 5.2.2).

Comme il a été mentionné à la section 1.3, le traitement par stabilisation et solidification aura pour effet de réduire la mobilité des métaux ou des métalloïdes et, de ce fait, de contribuer à réduire les risques d'impact sur l'eau souterraine, au sens du Guide d'intervention - Protection des sols et réhabilitation des terrains contaminés.

Le programme de suivi de l'eau souterraine est la responsabilité du promoteur. Il est élaboré en fonction des récepteurs (égout, plan d'eau de surface, puits d'eau potable) affectés ou susceptibles de l'être par la qualité de cette eau. Étant donné que le transfert des contaminants du monolithe vers le milieu sera lent, une fréquence de suivi de deux campagnes par année serait adéquate. Pour faciliter la comparaison des données, les campagnes d'échantillonnage doivent toujours être réalisées à la même période de l'année. L'objectif est de valider l'absence de risque d'effet sur la santé, les usages et l'environnement au sens de la procédure d'intervention sur les eaux souterraines et de s'assurer de l'efficacité à long terme du traitement des contaminants par stabilisation et solidification. En ce sens, en l'absence de risque d'effet, une diminution de la fréquence des campagnes d'échantillonnage est à privilégier plutôt qu'une cessation complète de celles-ci. Un rapport annuel incluant les données colligées et leur interprétation doit être fourni à la direction régionale du MELCC.

À noter également que l'article 4 du Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains (Q-2, r.37) (RPRT) prévoit le suivi de la qualité de l'eau souterraine lorsque s'exerce sur un terrain une activité industrielle ou commerciale listée dans ce règlement.

Pour les cas de réhabilitation visés par le RPRT, afin de garder en mémoire les mesures de gestion des risques, elles sont accompagnées d'un avis de contamination et d'un avis de restriction d'usage qui doivent être inscrits sur le Registre foncier du Québec.

7. CONCLUSION

Le traitement par stabilisation et solidification permet d'immobiliser les contaminants par des mécanismes chimiques ou physiques.

Les informations relatives à ce type de traitement sont abondantes en ce qui concerne les matières résiduelles ou les sols contaminés par des métaux. Pour les contaminants organiques, les performances sont moins bien documentées actuellement.

Les principaux bénéfices d'un traitement par stabilisation et solidification sont :

- L'amélioration des caractéristiques physiques d'un sol ou d'une matière résiduelle;
- La diminution de la solubilité et de la toxicité des contaminants;
- La diminution de la surface des sols ou des matières résiduelles contaminées et exposées à l'environnement et au travers de laquelle les contaminants peuvent migrer.

Cependant, ces techniques peuvent entraîner une augmentation du volume des matériaux à gérer, dont il faut tenir compte si l'on désire par exemple remettre ces matériaux dans l'excavation d'origine ou les enfouir dans une cellule dont la capacité est limitée.

En outre, les contaminants traités par stabilisation et solidification ne sont pas enlevés ou détruits, d'où l'importance de s'assurer qu'ils seront immobilisés à long terme en appliquant un cadre d'évaluation tel que celui qui est décrit dans les présentes lignes directrices.

Dans un souci de faciliter l'application du cadre d'évaluation et l'interprétation des résultats, les protocoles qui ont été choisis dans les présentes lignes directrices décrivent des essais standardisés. Le cumul d'essais différents vise à évaluer un large éventail de conditions environnementales. Puisque les conditions opérationnelles sont fixées, les essais sont difficilement adaptables à des conditions spécifiques à un cas particulier.

Pour pallier cette situation, Kosson et ses collaborateurs (2002) proposent un cadre de travail alternatif. Il s'agit d'une approche flexible qui permet, par étape, d'estimer le potentiel de mobilité des contaminants soumis à des conditions plus représentatives de celles que l'on retrouve dans un cas particulier. L'objectif de la première étape est le même que celui des présentes lignes directrices c'est-à-dire d'évaluer la mobilité à partir d'essais dont les conditions opérationnelles sont fixées. Dans la seconde étape, certaines conditions opérationnelles des essais de lixiviation (pH et ratio liquide/solide) peuvent être modifiées. La troisième étape consiste en une évaluation de la mobilité des contaminants par diffusion à partir du monolithe. Ce dernier aspect est également couvert dans les présentes lignes directrices.

Dans un même ordre d'idées, la norme NF ISO 18772 intitulée *Lignes directrices relatives aux modes opératoires de lixiviation en vue d'essais chimiques et écotoxicologiques ultérieurs des sols et matériaux du sol* propose la méthode d'évaluation suivante (AFNOR, 2008) :

1. Définition du problème et de la solution recherchée;
2. Description du scénario (les conditions applicables à un mode de gestion des matières résiduelles ou des sols);
3. Description de la source (les informations relatives au relargage des contaminants);

4. Détermination de l'influence de paramètres sur la mobilité des contaminants et sélection d'essais de lixiviation plus spécifiques et représentatifs des conditions particulières au dossier;
5. Modélisation du comportement des contaminants;
6. Validation du modèle.

Ces approches plus adaptées à des conditions particulières ont été peu utilisées jusqu'à maintenant, mais elles peuvent être intéressantes si elles sont susceptibles, par rapport à l'approche décrite dans les présentes lignes directrices, d'améliorer de façon importante l'évaluation et la gestion des risques. Compte tenu des efforts requis pour interpréter les essais en lien avec les conditions particulières d'un dossier, ces approches seront probablement plus intéressantes pour des cas d'envergure ou complexes.

Il s'agit donc d'un domaine en évolution et une prochaine version des lignes directrices pourrait rendre compte des développements dans ce secteur.

8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ADEME, 2006. *Procédure d'évaluation approfondie de la stabilisation des déchets industriels spéciaux ultimes, Cas des procédés de solidification/stabilisation utilisant des liants minéraux, Guide d'utilisation (document de travail)*, Angers, Direction des déchets et des sols, 55 pages.
- ADEME, 2006. *Procédure d'évaluation approfondie de la stabilisation des déchets industriels spéciaux ultimes, Cas des procédés de solidification/stabilisation utilisant des liants minéraux, Description technique (document de travail)*, Angers, Direction des déchets et des sols, 54 pages.
- AFNOR, 2008. *Lignes directrices relatives aux modes opératoires de lixiviation en vue d'essais chimiques et écotoxicologiques ultérieurs des sols et matériaux du sol, NF ISO 18772*, Saint-Denis, 35 pages.
- ANS, 2003. *Measurement of the leachability of solidified low level radioactive wastes by a short term test procedure, ANSI/ANS-16.1-2003*, La Grange Park, 15 pages et annexes.
- ARMISHAW, R., et collaborateurs, 1992. *Review of innovative contaminated soil clean-up processes*, Hertfordshire, Warren Spring Lab Publications, ISBN 0 85624 677 8, p. 198 à 225.
- ASTM, 1985. *Standard practice for determining resistance of plastics to bacteria, G22-76*, Philadelphie, Annual Book of ASTM Standards, p. 1132.
- ASTM, 1988. Standard test method for wetting and drying test of solid wastes, D4843, West Conshohocken, 4 pages.
- ASTM, 1990. *Standard practice for determining resistance of synthetic polymeric materials to fungi, G21-90*, Philadelphie, Annual Book of ASTM Standards, p. 1128.
- ASTM, 2008. *Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens, C39/C39M*, West Conshohocken, ASTM international, 7 pages.
- BHANDARI, A., et collaborateurs, 2007. *Remediation technologies for soils and groundwater*, American Society of Civil Engineers, ISBN 0784408947, 456 pages.
- BNQ, 2006. *Sols – Détermination de la teneur en eau, CAN/BNQ 2501-170*, Québec, 3^e édition, 3 pages.
- CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC, 1998. *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales, cahier 8, Échantillonnage des matières dangereuses*, Sainte-Foy, Le Griffon d'argile, 103 pages.
- CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC, 1998. *Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales, cahier 5, Échantillonnage des sols*, Sainte-Foy, Le Griffon d'argile, 53 pages et annexes.
- CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC, 2006. « Méthode d'analyse: protocole de lixiviation pour les espèces inorganiques, MA. 100-Lix.com.1.0 », dans le site *Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec*, [en ligne], <http://www.ceaeq.gouv.qc.ca> (page consultée en février 2008).
- CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC, 2006. « Méthode d'analyse: détermination du carbone organique total dans les solides: dosage par titrage, MA. 405 – C 1.0 », dans le site *Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec*, [en ligne], <http://www.ceaeq.gouv.qc.ca> (page consultée en avril 2008).

- CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC, 2009. « Méthode d'analyse : détermination du pouvoir neutralisant, du potentiel de génération d'acide et du potentiel acidogène d'un solide, MA.110 – ACISOL 1.0 », dans le site *Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec*, [en ligne], <http://www.ceaeq.gouv.qc.ca>.
- CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC, 2006. « Méthode d'analyse: détermination de la granulométrie : méthode gravimétrique par tamis, MA. 100 – Gran. 1.0 », dans le site *Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec*, [en ligne], <http://www.ceaeq.gouv.qc.ca> (page consultée en mai 2008).
- CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC, 2006. « Méthode d'analyse : détermination de la capacité de neutralisation des résidus solides, MA. 110 – C.neu 1.0 », dans le site *Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec*, [en ligne], <http://www.ceaeq.gouv.qc.ca> (page consultée en juillet 2008).
- CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC, 2006. « Méthode d'analyse : détermination du pH : méthode électrométrique, MA. 100 – pH 1.1 », dans le site *Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec*, [en ligne], <http://www.ceaeq.gouv.qc.ca> (page consultée en juillet 2008).
- CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC, 2006. « Détermination du carbone et du soufre : méthode de combustion et dosage par spectrophotométrie infrarouge, MA. 310 – CS 1.0 », dans le site *Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec*, [en ligne], <http://www.ceaeq.gouv.qc.ca>.
- CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC, 2010. « Méthode d'analyse : détermination des métaux: méthode par spectrométrie de masse à source ionisante au plasma d'argon, MA.200-Mét. 1.2 », dans le site *Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec*, [en ligne], <http://www.ceaeq.gouv.qc.ca>.
- ENVIRONNEMENT CANADA, 1990. *Compendium d'essais de lixiviation des déchets*, ISBN 0-662-96160-9, Rapport SPE3/HA/7, 74 pages.
- ENVIRONNEMENT CANADA, 1991. *Programme conjoint d'études de méthodes d'essai pour l'évaluation des déchets solidifiés*, ISBN 0-662-96916-2, Rapport SPE/HA/8,131 pages.
- ENVIRONNEMENT CANADA, 1992. *Protocole d'évaluation proposé pour les déchets solidifiés à base de ciment*, ISBN 0-662-97239-2, Rapport SPE 3/HA/9, 49 pages.
- ÉTATS-UNIS. *Land Disposal Restrictions, 40 CFR, Ch. I, part 268*, [Washington], Federal Register, 1998, pages multiples.
- GREGORICH, E.G., et collaborateurs, 1995. « La santé de nos sols, vers une agriculture durable au Canada, chapitre 5 : Modification de la matière organique du sol », dans le site *Agriculture et agroalimentaire Canada* [en ligne] <http://www.agr.gc.ca> (page consultée en avril 2008).
- KOGBARA, R.B., et A. AL-TABBAA, 2011. «Mechanical and leaching behaviour of slag-cement and lime-activated slag stabilised/solidified contaminated soil », *Science of the Total Environment*, 409, p. 2325-2335.
- KOSSON, D.S., H. A. VAN DER SLOOT, F. SANCHEZ et A. C. GARRABRANTS, 2002. « An integrated framework for evaluating leaching in waste management and utilization of secondary materials », *Environmental Engineering Science*, vol. 19, n° 3, p. 159-204.

- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, 1999. *Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés*, Les Publications du Québec, 2^e édition, 124 pages.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT, 2002. *Guide de valorisation des matières résiduelles inorganiques non dangereuses de source industrielle comme matériau de construction*, Québec, Direction des politiques du secteur industriel, ISBN 2-550-39504-2, Envirodoq n° ENV/2002/0167, 46 pages.
- MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA FAUNE, 1995. *Méthodes d'analyses pour l'évaluation des résidus stabilisés/solidifiés (document de travail)*, Direction des politiques du secteur industriel.
- MINISTÈRE DES TRANSPORTS, 1993. *Cahier des charges et devis généraux*, Québec, Les Publications du Québec, p. 12-14 et 12-15.
- MINISTÈRE DES TRANSPORTS, 2007. *Recueil des méthodes d'essai. Laboratoire des chaussées*, Québec, Les Publications du Québec.
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS, 2008. *Lignes de conduite pour le traitement des dossiers de terrains contaminés ayant recours à l'analyse de risque*, Québec, Service des lieux contaminés, 29 pages.
- MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS, 2009. *Lignes directrices relatives à la gestion de béton, de brique et d'asphalte issus des travaux de construction et de démolition et des résidus du secteur de la pierre de taille*, Québec, Direction des politiques en milieu terrestre, ISBN 978-2-550-56288-7, 51 pages.
- PARIA, Santanu, et Pak K. YUET, 2006. « Solidification-stabilization of organic and inorganic contaminants using portland cement : a literature review », *Environ. Rev.*, vol. 14, p. 217-255.
- PERERA, A.S.R., A. AL-TABBAA, J. M. REID et J. A. STEGEMANN, 2004. « State of practice report, UK stabilization/solidification treatment and remediation, part IV: Testing and performance criteria, part V: Long-term performance and environmental impact », dans le site *Starnet* [en ligne], <http://www.starnet.eng.cam.ac.uk> (page consultée en avril 2008).
- QUÉBEC. *Loi sur la qualité de l'environnement, L.R.Q., c. Q-2*, [Québec], Éditeur officiel du Québec, pages multiples.
- QUÉBEC. *Règlement relatif à l'application de la Loi sur la qualité de l'environnement, C.Q-2, r.3*, [Québec], Éditeur officiel du Québec, pages multiples.
- QUÉBEC. *Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains, C.Q-2, r.37*, [Québec], Éditeur officiel du Québec, pages multiples.
- QUÉBEC. *Règlement sur les matières dangereuses, C.Q-2, r.32*, [Québec], Éditeur officiel du Québec, pages multiples.
- QUÉBEC. *Règlement sur l'enfouissement des sols contaminés, C.Q-2, r.18*, [Québec], Éditeur officiel du Québec, pages multiples.
- QUÉBEC. *Règlement sur l'enfouissement et l'incinération de matières résiduelles, C.Q-2, r.19*, [Québec], Éditeur officiel du Québec, pages multiples.
- QUÉBEC. *Règlement sur la qualité de l'eau potable, C.Q-2, r.40*, [Québec], Éditeur officiel du Québec, pages multiples.

- QUÉBEC. *Règlement sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement*, C.Q-2, r.23, [Québec], Éditeur officiel du Québec, pages multiples.
- TOWNSEND, T., Y. C. JANG et T. TOLAYMAT, 2003. *A guide to the use of leaching tests in solid waste management decision making*, Gainesville, University of Florida, The Florida Center for solid and hazardous waste, Rapport n° 03-01, 31 pages.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1992. *Standard test method for water permeability of concrete*, méthode CRD-C 48-92, 4 pages.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS, 1995. *Engineering and design, treatability studies for solidification/stabilization of contaminated material*, Technical letter n° 1110-1-158, 18 pages.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS et collaborateurs, 2006. *Unified facilities guide specifications, solidification/stabilization of contaminated material*, UFGS-02 55 00, 16 pages.
- USEPA, 1989. *Stabilization/Solidification of CERCLA and RCRA wastes : Physical tests, chemical testing procedures, technology screening and field activities*, Cincinnati, Rapport EPA/625/6-89/022, 56 pages et annexes.
- USEPA, 1999. *Solidification/stabilization resource guide*, Washington, Rapport EPA/542-B-99-002, 91 pages.
- WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF ECOLOGY, 2003. *An assessment of laboratory leaching tests for predicting the impacts of fill material on ground water and surface water quality: a report to the legislature*, Olympia, rapport préparé par la Science Applications International Corporation, 155 pages.