

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT
M. Sc. A.

PAR
Maude LAPOINTE-RIOUX

CONCEPTION D'UN OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION EN PHYTOREMÉDIATION

MONTREAL, LE 4 NOVEMBRE 2015

©Tous droits réservés, Maude Lapointe-Rioux, 2015

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Robert Hausler, ing., Ph.D, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Michel Labrecque, Ph.D, codirecteur de mémoire
Division recherche et développement du Jardin botanique de Montréal

M. Frédéric Monette, ing., Ph.D, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Mathias Glaus, ing., Ph.D, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 7 OCTOBRE 2015

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord remercier Robert Hausler, mon directeur, qui m'a transmis son émerveillement face à la nature et sa volonté à être au service de l'environnement.

Je voudrais aussi exprimer tout ma reconnaissance envers Michel Labrecque, mon codirecteur, qui m'a donné ma chance depuis le tout début et qui m'a fait confiance dans la réalisation de ce projet hors-du-commun.

J'aimerais remercier également Frédéric Pitre qui m'a donné son avis à de nombreuses reprises et qui m'a soutenue à plusieurs étapes du projet, Mathias Glaus pour son soutien technique dans le développement LIVECODE, Christine Richard pour son aide précieuse à la rédaction, Marianna Rodriguez pour son écoute et son support moral tout au long de mon parcours ainsi que pour ses judicieux conseils.

J'aimerais souligner le soutien financier que j'ai reçu par le biais de la bourse BMP Innovation, offerte conjointement par le CRSNG, le FRQNT et la division R&D scientifique du Jardin botanique de Montréal. Cette bourse m'a permis de me consacrer pleinement à mon projet de recherche. Il faut mentionner aussi que ce travail a été réalisé avec le concours du Fonds municipal vert, un fonds financé par le Gouvernement du Canada et géré par la Fédération canadienne des municipalités (FCM).

Enfin, la réalisation de ce projet et la rédaction de ce mémoire m'ont fait vivre toutes sortes d'émotions en passant par la joie et l'enthousiasme, mais aussi la colère et la frustration à certains moments. Un gros merci à mon mari qui a fait preuve de patience, d'écoute et qui a été un soutien sans lequel je n'aurais pu passer à travers ces deux années d'études supérieures. Mes remerciements vont aussi à ma mère qui a été un support moral considérable et qui m'a encouragée dans toutes les phases du projet. Finalement, je tiens à remercier tous ceux qui de près ou de loin m'ont accompagnée dans ce cheminement et avec qui j'ai pu partager mes réflexions et mon intérêt pour la connaissance.

CONCEPTION D'UN OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION EN PHYTOREMÉDIATION

Maude LAPOINTE-RIOUX

RÉSUMÉ

Au Québec, les sites contaminés doivent être réhabilités en vertu de la *Loi sur la qualité de l'environnement* (LQE). Parmi les technologies de décontamination, la phytoremédiation consiste en l'utilisation des plantes pour dégrader, retirer ou stabiliser les contaminants du sol. Cette méthode, relativement nouvelle, est complexe car elle implique de nombreux paramètres en interrelation. Pour cette raison, il est difficile d'en évaluer le potentiel et donc, des erreurs sont souvent commises. De plus, différentes parties prenantes sont impliquées dans le processus de décision, ce qui le rend ardu. Ainsi, cette étude propose la conception d'un outil d'aide à la décision suivant deux aspects : (1) l'estimation du temps de phytoremédiation requis pour atteindre un critère générique donné et (2) la facilitation vers la planification des coûts.

La méthodologie orientée-objet a permis de catégoriser l'information sous forme de fiches techniques, lesquelles facilitent la compréhension du problème. Pour une première version de l'outil, les critères de conception se résument aux conditions du Québec (législation, climat, etc.) et à la phytoextraction du cadmium par le cultivar de saule *Salix purpurea* 'Fish Creek'.

Un algorithme a été élaboré pour l'estimation du temps à partir d'une équation mathématique de base et de deux coefficients d'affectation relatifs au pH du sol et aux degrés-jours de croissance. Une étude de cas, réalisée avec les données du site de Valcartier, a permis d'observer qu'en moyenne, l'outil estime des temps légèrement supérieurs au temps réel. Il n'a toutefois pas été possible de tirer une véritable conclusion à cet effet étant donné le nombre trop restreint d'échantillons. Néanmoins, une analyse de sensibilité a permis de prendre connaissance des paramètres les plus influents sur le temps de phytoremédiation.

En ce qui concerne l'aspect économique, deux paramètres d'affectation ont fait l'objet de cette recherche, soit le pH du sol et le type de substrat. Un sommaire des coûts a été présenté incluant ces paramètres afin de servir d'exemple type pour la planification des coûts d'un projet de phytoremédiation.

L'outil a été développé pour un seul cas spécifique, mais des mesures concrètes ont été prises pour faciliter les améliorations futures. L'objectif principal a été atteint dans la mesure où l'outil aide le processus de décision en illustrant le contexte de la phytoremédiation, en informant l'utilisateur et en pointant les données importantes à recueillir. Au-delà des attentes, l'outil consiste également en un support à la formation et une aide à la communication pour les différentes parties prenantes.

Mots-clés : outil d'aide à la décision, sites contaminés, phytoremédiation, estimation du temps, planification des coûts.

PHYTOREMEDIATION DECISION SUPPORT TOOL DESIGN

Maude LAPOINTE-RIOUX

ABSTRACT

In Québec, contaminated sites must be rehabilitated according to the *Environment Quality Act* (EQA). Amongst decontamination technologies, phytoremediation consists in using plants to degrade, to extract or to stabilize soils contaminants. This relatively new method is complex since it involves many interrelated parameters. Thus, it remains difficult to evaluate its potential and mistakes are often made. Furthermore, because various stakeholders are involved, the decision-making process is rather tedious. Therefore, this thesis proposes the design of a decision-making tool according to two topics: (1) the estimation of phytoremediation time required to reach a given generic criterion and (2) the facilitation of cost planning.

The object-oriented methodology has allowed to categorize information into data sheets, hence facilitating the understanding of the problem at hand. For its first version, this tool was designed using the conditions in the province of Québec (legislation, climate, etc.) and the phytoextraction of cadmium by 'Fish Creek' willow cultivar (*Salix purpurea*).

An algorithm has been elaborated for the estimation of time using a basic mathematical equation and two adjustment coefficients (one for soil pH, the other for growing degree days). A case study, realised with data from the Valcartier site has allowed to observe that on average, the tool estimates phytoremediation times slightly higher than field times. However, it has not been possible to draw a genuine conclusion to this effect because of the restrictive number of samples. Nevertheless, a sensitivity analysis has allowed to understand the most impacting parameters on phytoremediation time.

Regarding the economical aspect, two affecting parameters have been studied: soil pH and the type of substrate. A cost summary has been presented including these parameters in order to serve as a typical example for cost planning of a phytoremediation project.

The tool has been developed for only one specific case, but concrete measures have been taken to facilitate future improvements. The principal objective has been reached in the measure that the tool helps the decision-making process by illustrating the context of phytoremediation, by informing the end-user and by pointing out important data to collect. Beyond expectations, this tool also acts as a means of training and of communication for all stakeholders.

Keywords : decision support tool, contaminated sites, phytoremediation, estimation time, cost planning.

TABLE DES MATIÈRES

| | Page |
|---|------|
| INTRODUCTION | 1 |
| CHAPITRE 1 ÉTAT DES CONNAISSANCES | 5 |
| 1.1 Contamination des sols au Québec | 5 |
| 1.1.1 Origines de la contamination | 5 |
| 1.1.2 Réglementation au Québec | 7 |
| 1.1.3 Caractérisation des terrains | 11 |
| 1.2 Complexité de la phytoremédiation | 13 |
| 1.2.1 Phytoremédiation | 13 |
| 1.2.2 Dynamique de la phytoremédiation | 15 |
| 1.3 Outil d'aide à la décision | 17 |
| 1.3.1 Définition | 18 |
| 1.3.2 Outils d'aide à la décision existants | 18 |
| CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE | 21 |
| 2.1 Travaux effectués avec les spécialistes | 21 |
| 2.1.1 Revue de littérature et discussion avec les experts | 21 |
| 2.1.2 Études de cas | 22 |
| 2.2 Conceptualisation de l'outil | 24 |
| 2.2.1 Schéma du système dynamique de la phytoremédiation | 24 |
| 2.2.2 Limites conceptuelles de l'outil | 25 |
| 2.2.3 Structure de l'outil | 26 |
| 2.2.4 Élaboration des fiches | 28 |
| 2.3 Algorithme de calculs d'estimation du temps | 32 |
| 2.3.1 Variables de base | 33 |
| 2.3.2 Élaboration des calculs | 33 |
| 2.3.3 Méthode de détermination du coefficient d'affectation | 35 |
| 2.4 Planification des coûts | 37 |
| 2.4.1 Étapes d'un projet de phytoextraction | 38 |
| 2.4.2 Élaboration des calculs | 38 |
| 2.4.3 Méthode d'évaluation de l'affectation des coûts | 39 |
| CHAPITRE 3 RÉSULTATS | 41 |
| 3.1 Outil d'aide à la décision | 42 |
| 3.2 Prévision du temps | 47 |
| 3.2.1 Coefficients d'affectation | 47 |
| 3.2.2 Étude de cas | 51 |
| 3.2.3 Analyse de sensibilité | 56 |
| 3.3 Planification des coûts | 60 |
| 3.3.1 Paramètres d'affectation des coûts | 60 |
| 3.3.2 Sommaire des coûts prévus | 62 |

| | |
|---|----|
| CHAPITRE 4 DISCUSSION | 65 |
| 4.1 Contributions de la recherche | 65 |
| 4.1.1 Aide à la décision..... | 65 |
| 4.1.2 Estimation du temps..... | 67 |
| 4.1.3 Planification des coûts | 69 |
| 4.2 Limites et recommandations | 69 |
| 4.2.1 Travail préliminaire aux prochaines versions de l’outil | 71 |
| 4.2.2 Calculs d’estimation du temps | 74 |
| 4.2.3 Aspect économique | 75 |
| CONCLUSION | 79 |
| ANNEXE I GRILLE DE CRITÈRES GÉNÉRIQUES POUR LES SOLS..... | 85 |
| ANNEXE II CHEMINEMENT D’UNE ÉTUDE DE CARACTÉRISATION..... | 93 |
| LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | 95 |

LISTE DES TABLEAUX

| | Page |
|---|------|
| Tableau 1.1 Niveaux de critères génériques présentés dans la <i>Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés</i> | 9 |
| Tableau 2.1 Fiche du site contaminé..... | 28 |
| Tableau 2.2 Fiche de la plante | 31 |
| Tableau 3.1 Simulations avec les données du site Valcartier pour le cultivar de saule <i>Salix purpurea</i> ‘Fish Creek’ | 53 |
| Tableau 3.2 Analyse de sensibilité..... | 58 |

LISTE DES FIGURES

| | Page |
|---|------|
| Figure 2.1 Schéma du système dynamique de la phytoremédiation | 24 |
| Figure 2.2 Limites conceptuelles de l'outil..... | 26 |
| Figure 2.3 Structure de l'outil d'aide à la décision | 27 |
| Figure 2.4 Méthode de détermination du coefficient d'affectation | 37 |
| Figure 2.5 Méthode d'évaluation de l'affectation des coûts | 40 |
| Figure 3.1 Page principale de l'outil – Fiche du site contaminé..... | 42 |
| Figure 3.2 Onglet « Contamination » de la fiche du site contaminé..... | 43 |
| Figure 3.3 Onglet « Critère » de la fiche du site contaminé | 43 |
| Figure 3.4 Onglet « Site » de la fiche du site contaminé | 43 |
| Figure 3.5 Onglet « Sol » de la fiche du site contaminé | 43 |
| Figure 3.6 Fiche du cultivar de saule <i>Salix purpurea</i> 'Fish Creek' | 44 |
| Figure 3.7 Répertoire des végétaux utilisés en phytoremédiation | 45 |
| Figure 3.8 Grille des critères génériques pour les sols | 45 |
| Figure 3.9 Carte des degrés-jours de croissance réelle au Québec | 46 |
| Figure 3.10 Carte des cinq provinces géologiques du Québec | 46 |
| Figure 3.11 Triangle des textures de sol | 47 |
| Figure 3.12 Carte des degrés-jours de croissance réelle au Québec | 48 |
| Figure 3.13 Disponibilité du zinc en relation avec le pH du sol..... | 50 |
| Figure 3.14 Disponibilité du cadmium en relation avec le pH du sol..... | 50 |
| Figure 3.15 Simulations des temps prévus par l'outil..... | 54 |
| Figure 3.16 Amendement imposé par l'outil pour certaines valeurs de pH du sol..... | 61 |
| Figure 3.17 Détail des dépenses pour la planification d'un projet de phytoextraction..... | 63 |

| | |
|--|----|
| Figure 4.1 Onglet « Contamination » de la fiche du site contaminé..... | 71 |
| Figure 4.2 Menus déroulants pour le choix des trois contaminants majoritaires..... | 72 |
| Figure 4.3 Fiche du peuplier | 73 |
| Figure 4.4 Fiche du tournesol | 73 |
| Figure 4.5 Choix d'option des différentes options à effectuer..... | 74 |

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

| | |
|-----------|---|
| ADEME | Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie |
| BPC | Biphényles polychlorés |
| BRGM | Bureau de recherches géologiques et minières |
| DESYRE | DEcision Support sYstem for the REqualification of contaminated sites |
| ETM | Éléments traces métalliques |
| FCM | Fédération canadienne des municipalités |
| HAP | Hydrocarbures aromatiques polycycliques |
| Loi 72 | Loi modifiant la Loi sur la qualité de l'environnement et d'autres dispositions législatives relativement à la protection et à la réhabilitation des terrains |
| LQE | Loi sur la qualité de l'environnement |
| MDDELCC | Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques |
| pH | Potentiel d'hydrogène |
| Phyto-DSS | Phytoremediation Decision Support System |
| PPSRTC | Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés |
| RÉEIE | Règlement sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement |
| RESC | Règlement sur l'enfouissement des sols contaminés |
| RMD | Règlement sur les matières dangereuses |
| RPRT | Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains |
| RSCTSC | Règlement sur le stockage et les centres de transfert de sols contaminés |

INTRODUCTION

La contamination des sols constitue un réel problème dans plusieurs pays industrialisés. Au Canada, plus de 21 000 sites fédéraux contaminés sont répertoriés (Gouvernement du Canada, 2014). Outre les sites fédéraux contaminés présents sur son territoire, la province de Québec compte 9 692 sites inscrits dans le répertoire des terrains contaminés du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (Gouvernement du Québec, 2015). Cet inventaire ne contient toutefois que les cas rapportés, ce qui implique qu'il s'agit d'une sous-estimation du nombre réel de sites contaminés dans la province.

En plus de détériorer les propriétés des sols, les polluants peuvent se propager dans les eaux souterraines, les eaux de surface et dans l'air ambiant, contaminant alors toute la chaîne alimentaire (Khan *et al.*, 2008). Ainsi, la contamination des sols menace la vie, la santé et la sécurité des humains, d'autres espèces vivantes et l'environnement en général. Devant de tels enjeux, les autorités gouvernementales prennent des mesures législatives pour contrôler la situation. Au Québec, les terrains contaminés sont régis par la Loi sur la qualité de l'environnement (1972). Cette loi exige que les sites soient réhabilités suivant un plan spécifique de mise en œuvre et un calendrier d'exécution.

Parmi les technologies de décontamination, il existe des traitements physicochimiques tels que la désorption thermique, l'incinération, l'oxydation chimique, le lavage et il existe des traitements biologiques comme la biodégradation, la biopile et la phytoremédiation (Dufresne, 2013). La phytoremédiation consiste en l'utilisation des plantes pour dégrader, retirer ou stabiliser les contaminants du sol. Développée dans les années 1980, cette technique est relativement nouvelle (Willey, 2007). Comparativement aux autres technologies, elle semble s'inscrire davantage dans les préoccupations de respect de l'environnement (Susarla *et al.*, 2002) et possiblement dans le sens du développement durable (Witters *et al.*, 2012). Cependant, elle est toujours peu employée, et ce, pour plusieurs raisons. D'abord, la phytoremédiation prend du temps pour agir, souvent plusieurs années, voire quelques décennies (Trapp *et al.*, 2001). Cet aspect décourage bien des

décideurs et surtout les promoteurs de projets qui sont souvent pressés par le temps. De plus, la phytoremédiation s'applique seulement à un nombre restreint de sites contaminés répondant à des conditions environnementales favorables et bien spécifiques permettant l'utilisation des plantes. Une évaluation de site est par conséquent essentielle pour juger de la faisabilité du projet. Cette étape est parfois négligée par les gestionnaires, ce qui entraîne des dépenses inutiles, du gaspillage et une mauvaise compréhension de la phytoremédiation. Dans les cas où les conditions de site sont propices, il existe tout de même une réticence face à l'utilisation de cette technologie. Comprenant de nombreux paramètres en interrelation, la phytoremédiation constitue un processus complexe. Il est difficile de prendre une décision judicieuse quant à l'utilisation de cette technique, car elle est encore méconnue (Carlon *et al.*, 2007) et pour cette raison, de nombreuses erreurs sont commises. De plus, la réhabilitation des sols contaminés est le plus souvent entre les mains de plusieurs parties prenantes ayant toutes des connaissances et des intérêts divergents, ce qui rend le processus de décision ardu. Aussi, une évaluation complète du site contaminé, en début de projet, est une étape cruciale pour amener les décideurs à faire des choix éclairés et robustes.

Pour favoriser une évaluation adéquate, cette étude propose la conception d'un outil d'aide à la décision pour des projets de phytoremédiation. Selon Robinson *et al.* (2003), deux informations sont critiques dans la planification de projets de phytoremédiation, soit la période de temps à prévoir et le total des dépenses à encourir. Ainsi, les deux principaux objectifs de conception de l'outil sont :

1. l'estimation du temps de phytoremédiation pour atteindre un critère générique donné;
2. la facilitation vers la planification des coûts.

Dans le cadre de ce mémoire de maîtrise, le projet vise le développement d'une première version de l'outil. Pour ce faire, les objectifs de conception se limitent :

- aux conditions du Québec;
- à une seule technique, la phytoextraction;
- à un seul contaminant, le cadmium (Cd);
- à un seul cultivar de saule, le *Salix purpurea* 'Fish Creek'.

Parallèlement aux objectifs de développement, le but est d'illustrer le potentiel d'un tel outil d'aide à la décision. La vision à long terme de cette recherche consiste à favoriser la méthode de réhabilitation la mieux adaptée pour chaque site contaminé de manière à éviter les erreurs.

CHAPITRE 1

ÉTAT DES CONNAISSANCES

La première partie de ce chapitre porte sur la contamination des sols au Québec. La deuxième partie expose la phytoremédiation et la complexité de ses éléments en interaction. La troisième partie présente une solution envisageable au problème, inspirée de l'approche systémique, qui permet une meilleure compréhension de l'application de la phytoremédiation.

1.1 Contamination des sols au Québec

La contamination peut provenir de différentes sources et se disperser de différentes façons. La section qui suit présente d'abord les origines de la contamination. La suite de la section traite de la loi et des règlements du Québec dont les dispositions sont basées sur les concentrations totales. Enfin, les trois phases d'une étude de caractérisation de terrain sont décrites.

1.1.1 Origines de la contamination

1.1.1.1 Définition

La contamination est la pénétration et la propagation dans un être vivant d'un agent pathogène biologique, chimique ou physique, qui a des effets indésirables pour la santé et pour l'environnement. Mench *et al.* (2004), apportent un point de vue différent en soutenant que la contamination est la « présence d'une substance dans un milieu naturel à une concentration supérieure au niveau du « fond naturel » ... ». Ils expliquent que de nombreux composés, connus sous le nom d'éléments traces, apparaissent en très faible quantité dans le sol (Fe, Zn, Cd, Cu, Mn, Cr, etc.). Certains d'entre eux sont absolument essentiels à l'être humain et à tout organisme vivant, notamment les végétaux. Par contre, en grande quantité, ils deviennent au contraire nocifs et même toxiques. Afin de déterminer le degré de

contamination du sol, il est important de connaître et de caractériser cette plage acceptable entre le seuil de carence et le seuil de toxicité pour chacun des éléments traces qui font inévitablement partie de l'environnement.

1.1.1.2 Sources de la contamination

Il est possible de distinguer deux catégories d'origine de la contamination du sol, soit naturelle ou anthropique. En ce qui concerne la contamination d'origine naturelle, la roche mère constitue la principale cause des teneurs élevées en métaux (Gobat *et al.*, 2010). Puisque les éléments traces font partie intégrante de la nature, il arrive qu'à certains endroits, ils soient présents dans le sol en quantité anormalement élevée. Il existe également d'autres phénomènes naturels provoquant la contamination : les feux de forêt, le cycle biogéochimique entre le sol et les végétaux, le processus d'accumulation dans un horizon du sol, l'érosion, etc.

À propos de la contamination d'origine anthropique, elle se subdivise en deux types : elle peut être soit diffuse ou ponctuelle. Dans le premier cas, elle est issue de l'infiltration des pesticides et des engrais très riches en phosphate et en cadmium, des automobiles, du chauffage domestique, etc. La concentration des polluants y est souvent plus faible, mais couvre de grandes étendues. Dans le deuxième cas, la contamination ponctuelle est localisée. Les polluants se trouvent en forte concentration sur des zones bien définies. Les industries pétrolières, d'extraction minière et de transformation (usines), les déversements et les boues de station d'épuration en sont les causes principales (Environnement Canada, 2010).

Tandis que les processus naturels s'effectuent pour la plupart sur une longue période de temps (érosion, cycle biogéochimique, etc.), les sources anthropiques de contamination quant à elles surviennent dans un horizon temporel beaucoup plus court dans l'histoire de chaque sol, habituellement de l'ordre de la décennie selon Sirven (2006). C'est d'ailleurs ce type de contamination sur lequel portent les lois.

1.1.2 Réglementation au Québec

Le sol relève de la juridiction provinciale. Au Québec, le gouvernement affirme qu'« au même titre que l'eau et l'air, le sol constitue un élément vital de l'écosystème et une ressource limitée qui doit être protégée et, là où elle a été dégradée, réhabilitée » (Beaulieu et Drouin, 1998).

1.1.2.1 Loi sur la qualité de l'environnement (LQE)

Le sol est d'abord réglementé par la *Loi sur la qualité de l'environnement* (LQE, 1972) qui vise principalement à lutter contre la pollution de toutes formes que ce soit. La section IV.2.1, *Protection et réhabilitation des terrains*, est entièrement dédiée au sol. En 2002, soit 30 ans après l'adoption de la LQE, l'Assemblée nationale prend une mesure majeure pour mettre à jour cette portion de la législation en adoptant le projet de loi 72, soit la « *Loi modifiant la Loi sur la qualité de l'environnement et d'autres dispositions législatives relativement à la protection et à la réhabilitation des terrains* ». Cette dernière entre en vigueur le 1^{er} mars 2003 pour remplacer la section IV.2.1 du chapitre I de la LQE (1972). Elle impose de nouvelles règles afin de protéger davantage les terrains et leur réhabilitation en cas de contamination. La loi 72 établit également de nouveaux pouvoirs réglementaires en ce qui concerne le contrôle et le suivi, le traitement, la récupération, la valorisation et l'élimination des sols contaminés. Notamment, c'est en vertu de la LQE qu'une étude de caractérisation est exigée pour les terrains où il y a :

Article 31.51. « [Cessation] d'une activité industrielle ou commerciale [...] »;

Article 31.53. « [Changement de] l'utilisation d'un terrain où s'est exercée une activité industrielle ou commerciale [...] ».

L'étude de caractérisation peut révéler :

Article 31.43. « [...] la présence dans un terrain de contaminants dont la concentration excède les valeurs limites fixées [...] ou qui sont susceptibles de porter atteinte à la vie, à la santé, à la sécurité, au bien-être ou au confort de l'être humain, aux autres espèces vivantes, ou à l'environnement en général, ou encore aux biens [...] ».

Dans une telle situation, il faut immédiatement procéder à l'inscription sur le registre foncier d'un avis de contamination. De plus, le ministre a alors le pouvoir d'ordonner un plan de réhabilitation comprenant les mesures qui seront prises pour protéger les êtres humains, les autres espèces vivantes et l'environnement en général, en plus du calendrier d'exécution. Dans certains cas, le plan de réhabilitation doit être accompagné d'une évaluation des risques toxicologiques et écotoxicologiques ainsi que des impacts sur les eaux souterraines. Ainsi, dans le cas de la réhabilitation d'un site, il est obligatoire d'obtenir un certificat d'autorisation avant les travaux. En effet à l'article 22 de la LQE, on peut lire que toute personne désirant exercer une activité susceptible d'émettre, de déposer, de dégager ou de rejeter des contaminants dans l'environnement ou de modifier la qualité de l'environnement doit obtenir préalablement un certificat d'autorisation.

1.1.2.2 Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains (RPRT)

Le *Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains (2003)* a pour objectif principal d'accroître la protection et la réhabilitation des terrains. Il vient aussi préciser certains éléments de la loi comme les types de terrains assujettis, les valeurs limites fixées (définies à l'annexe I et II du dit règlement) et les catégories d'activités industrielles et commerciales qui doivent s'y rapporter. De plus, il facilite le pouvoir d'ordonnance du ministre pour obliger la caractérisation de terrains et leur réhabilitation si elle est requise.

1.1.2.3 Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés (PPSRTC)

En vue de l'application de ce règlement, le ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) suggère la *Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés* (1998, en cours de révision) qui se base sur quatre principes fondamentaux : prévention, réhabilitation-valorisation, pollueur-payeur et équité. La politique décrit les orientations du Ministère, les procédures à suivre dans diverses situations et dresse une liste des critères génériques pour les sols. Les critères génériques sont les valeurs seuils à respecter, établis de manière à

sauvegarder l'environnement et à protéger la santé de futurs utilisateurs du site (voir la grille de critères à l'annexe I). Le Ministère discerne trois niveaux de critères génériques¹ :

Tableau 1.1 Niveaux de critères génériques présentés dans la *Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés*

Niveau A : Teneurs de fond pour les paramètres inorganiques et limite de quantification pour les paramètres organiques.

La limite de quantification est définie comme la concentration minimale qui peut être **quantifiée** à l'aide d'une méthode d'analyse avec une fiabilité définie.

Niveau B : Limite maximale acceptable pour des terrains à vocation résidentielle, récréative et institutionnelle. Sont également inclus les terrains à vocation commerciale situés dans un secteur résidentiel.

L'usage institutionnel regroupe les utilisations telles que les hôpitaux, les écoles et les garderies.

L'usage récréatif regroupe un grand nombre de cas possibles qui présentent différentes sensibilités. Ainsi, les usages sensibles, comme les terrains de jeu, devront être gérés en fonction du niveau B. Pour leur part, les usages récréatifs considérés moins sensibles comme les pistes cyclables peuvent être associés au niveau C.

Niveau C : Limite maximale acceptable pour des terrains à vocation commerciale, non situés dans un secteur résidentiel, et pour des terrains à usage industriel.

Ces critères génériques permettent d'une part d'évaluer la gravité de la contamination, et d'autre part, d'atteindre un objectif de décontamination pour un usage donné. Cependant, tel que mentionné précédemment, la contamination peut parfois provenir de phénomènes naturels. Il peut arriver que la teneur de fond naturelle d'un sol excède le critère générique. Dans un tel cas, le ministère prévoit une liste des teneurs de fond pour les métaux et métalloïdes, pour cinq secteurs géologiques au Québec : Basses-Terres du Saint-Laurent, Appalaches, Grenville, Supérieur et Rae et Fosse du Labrador (Beaulieu et Drouin, 1998). Il est indiqué que ces teneurs de fond, si elles sont bien évaluées et documentées, se substituent

¹ MDDELCC, *Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés*, Annexe II : Les critères génériques pour les sols et pour les eaux souterraines, Critères génériques pour les sols, Grille de critères génériques.

aux critères génériques, à moins qu'il y ait un impact manifeste ou un risque pour la santé. Elles servent donc d'indicateurs de l'ampleur de la contamination. Il est également possible de raffiner ces valeurs à l'échelle locale en suivant les recommandations fournies par le Ministère dans le document *Lignes directrices sur l'évaluation des teneurs de fond naturelles dans les sols* (Ouellette, 2012).

1.1.2.4 Autres règlements se rapportant aux sols contaminés

La section qui suit présente les autres règlements établis par le ministère qui concernent les sols contaminés, mais de manière plus indirecte.

Règlement sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement (RÉEIE)

Pour les lieux déclarés comme étant le dépôt définitif de sols contaminés ou pour tout projet devant procéder à une demande de certificat d'autorisation tel que prévu à la section IV.1 de la loi, il existe le *Règlement sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement*. Plus spécifiquement, l'article 2 oblige toute activité de réhabilitation de terrain visé par ce règlement à se soumettre à une évaluation environnementale.

Règlement sur les matières dangereuses (RMD)

Le *Règlement sur les matières dangereuses* entre en vigueur le 1^{er} décembre 1997. Le règlement concède que les sols contaminés ne constituent pas des matières dangereuses à moins que ceux-ci contiennent plus de 50 mg de biphényles polychlorés (BPC) par kilogrammes de sol. Cependant, dans un contexte de phytoremédiation où les plantes peuvent contenir des polluants dans leurs tissus, le Ministère a certaines exigences réglementaires à propos de la disposition des matières dangereuses. Les végétaux contaminés aux BPC, aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et autres, mais aussi ceux contaminés aux inorganiques (métaux), doivent être pris en compte notamment dans le plan de réhabilitation.

Règlement sur le stockage et les centres de transfert de sols contaminés (RSCTSC)

En matière de gestion des sols contaminés excavés, le *Règlement sur le stockage et les centres de transfert de sols contaminés* assure une amélioration accrue. Il détermine les obligations pour les entreprises qui exploitent un centre de transfert de sols contaminés, qui

veulent établir ou modifier un centre de transfert de sols contaminés, qui ont à disposer de sols contaminés, ou qui sont spécialisées en excavation de sols.

Règlement sur l'enfouissement des sols contaminés (RESC)

Suite à une importation massive de sols contaminés voués à l'enfouissement, une augmentation considérable des volumes de sols contaminés enfouis dans les années 1999 et 2000 a forcé le gouvernement à mettre en place un règlement. Mis en vigueur le 11 juillet 2001, le *Règlement sur l'enfouissement de sols contaminés* a pour objectif d'encadrer l'aménagement, l'exploitation, la fermeture et le suivi post-fermeture des lieux d'enfouissement de sols contaminés.

1.1.3 Caractérisation des terrains

Tel que décrit dans la section précédente, une étude de caractérisation est exigée, en vertu de la LQE, pour tous les terrains où il y a :

- cessation d'une activité industrielle ou commerciale;
- changement d'utilisation d'un terrain où il y a eu une activité industrielle ou commerciale;
- présence de contaminants potentiellement dangereux pour la santé ou pour l'environnement et/ou qui excèdent les valeurs fixées par le règlement RPRT.

À cet effet, le Ministère met à disposition un *Guide de caractérisation des terrains* (Laberge, 2003) qui s'adresse principalement à tous ceux et celles qui entreprennent la réalisation d'un projet de réhabilitation de terrains contaminés. L'objectif est de déterminer la présence, mais surtout, le degré de contamination du milieu en question, pour ce qui a trait à l'eau, l'air et le sol. Ce guide propose une étude en trois phases (voir le cheminement complet à l'annexe II) : la revue des informations existantes (phase I), la caractérisation préliminaire (phase II) et la caractérisation exhaustive (phase III).

1.1.3.1 Phase I – Revue des informations existantes

La première phase de l'étude de caractérisation d'un terrain consiste à effectuer une revue de l'information et de l'historique du site. Pour ce faire, le guide oriente la lecture en indiquant les documents appropriés et ceux qui doivent obligatoirement être consultés, comme le registre foncier du terrain, le répertoire des terrains contaminés, les cartes topographiques ou cadastrales, etc. Ainsi, il est de mise de se familiariser avec le terrain, d'identifier la problématique du lieu et de juger des activités susceptibles d'avoir causé de la contamination. Ensuite, si ce premier exercice laisse croire qu'il peut y avoir la présence de contamination dans le milieu, la procédure impose de cibler les secteurs et les médiums susceptibles d'être contaminés, définir le type de contamination potentielle et établir les besoins de renseignements supplémentaires. Dans le cas où les données de la phase I détectent la possibilité d'une contamination, la phase II de l'étude doit automatiquement être enclenchée.

1.1.3.2 Phase II – Caractérisation préliminaire

La deuxième phase consiste en une caractérisation exploratoire. Le but principal est de confirmer la présence ou l'absence de contamination dans chacun des éléments de l'environnement, soit l'eau, l'air et le sol. Dans les cas où il y a présence de contamination, il faut alors déterminer la ou les sources, identifier les secteurs et les médiums contaminés et évaluer l'ampleur de la contamination. Le travail s'effectue sur le terrain par les méthodes d'investigation directe, c'est-à-dire la réalisation d'une campagne d'échantillonnage. Cependant, les conditions de terrains ne sont pas toujours favorables, ou alors il peut s'avérer nécessaire de récolter des informations complémentaires. À cet effet, il existe des méthodes d'investigation indirecte, présentées dans le guide, comme la télédétection, qui permettent d'obtenir des données sans intrusion dans le substrat et sans prélèvement. Cette étape de caractérisation de terrain est très importante, car elle permet entre autres de préciser le type de contamination (organique ou inorganique), déterminer les types de matières résiduelles et les quantifier ainsi que définir les voies préférentielles de transport des contaminants et les récepteurs.

1.1.3.3 Phase III – Caractérisation exhaustive

La troisième phase de caractérisation fait partie intégrante de la démarche lorsque la présence de contamination est constatée en phase II. En premier lieu, les objectifs ultimes sont de déterminer, avec une plus grande précision, la nature et l'ampleur de la contamination pour chacun des médiums, les volumes de matériaux contaminés, les impacts de la contamination sur l'environnement et les risques potentiels pour la santé humaine, la faune et la flore. En deuxième lieu, la phase III consiste à proposer des solutions ou des mesures à prendre afin de remédier ou de contrôler les impacts identifiés. La caractérisation exhaustive doit être nécessairement très détaillée, car elle doit inclure le prélèvement et l'analyse d'un grand nombre d'échantillons, fournir l'étude complète de chacun des médiums contaminés pour finalement présenter des mesures d'intervention adaptées.

1.2 Complexité de la phytoremédiation

Dans un contexte où la réglementation est de plus en plus restrictive, la réhabilitation des sols contaminés est devenue un véritable défi sur les plans technologique et économique. Durant les dernières années, un intérêt marqué se dénote pour les traitements *in situ*. Parmi ceux-ci, la phytoremédiation est le sujet principal de nombreuses études. Les scientifiques tentent de comprendre les mécanismes de cette technologie de manière à pouvoir la maîtriser et éventuellement, la rendre davantage commercialisable. Dans la section qui suit, il est question de la phytoremédiation ainsi que de quelques-unes des techniques utilisées. Ensuite, les différents paramètres impliqués et les nombreux liens qui s'entrecroisent mettent en évidence la complexité de la technologie.

1.2.1 Phytoremédiation

La phytoremédiation est un ensemble de technologies qui met à profit les capacités des plantes pour stabiliser, dégrader et/ou retirer les contaminants du sol. Ainsi, plutôt que de traiter des quantités importantes de sol, Gerhardt *et al.* (2009) font remarquer qu'il suffit d'entretenir quelques plantes sur le terrain. Cette technique est relativement jeune puisqu'elle

a commencé à être exploitée dans les années 1980 (Willey, 2007). La phytoremédiation prend beaucoup de temps comparativement aux autres méthodes, mais elle semble concorder avec les principes de respect de l'environnement et de développement durable.

Plusieurs études ont permis de démontrer qu'il existe des plantes qui ont comme caractéristique de croître dans des conditions extrêmement difficiles et qui, en plus, ont le pouvoir de dépolluer les sols. Certaines plantes réussissent mieux que d'autres et chacune a ses propriétés respectives (Rosselli *et al.*, 2003). Les chercheurs procèdent à des essais afin de mieux comprendre et connaître les capacités de chacune. Les plantes sont alors choisies en fonction du milieu et de ses contaminants (Máthé-Gáspár *et al.*, 2005). Que ce soit pour éliminer des substances organiques ou inorganiques, les plantes ont différentes façons de procéder.

1.2.1.1 Phytoextraction

Il existe des plantes dites hyperaccumulatrices dont les racines se chargent d'absorber les éléments polluants du sol pour les transférer ensuite vers les parties aériennes de la plante; la tige et les feuilles. En retirant ces parties de la plante, il est possible d'extraire peu à peu le contaminant du milieu (Robinson *et al.*, 2006). Ceci s'applique particulièrement aux éléments traces métalliques (ETM) comme le cadmium, le cuivre, le nickel et le zinc.

1.2.1.2 Phytostabilisation

Certaines plantes arrivent à piéger les substances polluantes dans leur système racinaire. En plus d'être immobilisés par les racines, les contaminants subissent une réaction chimique engendrée par les enzymes libérées des tissus de la plante, ce qui les rend moins toxiques pour l'environnement (Brunner *et al.*, 2008).

1.2.1.3 Phytodégradation

Certaines propriétés des plantes permettent de dégrader les contaminants soit directement dans le sol ou dans les tissus végétaux (Newman *et al.*, 2004). Ce phénomène se produit par exsudation ou par réduction grâce aux enzymes sécrétées par la plante qui arrivent à métaboliser et décomposer les polluants organiques, notamment les hydrocarbures, les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les biphényles polychlorés (BPC).

1.2.1.4 Rhizoremédiation (ou rhizodégradation)

Les racines des plantes libérant des enzymes combinées aux microbes et aux bactéries de la rhizosphère agissent en symbiose à la décomposition des composés organiques. À l'instar de la phytodégradation, la rhizoremédiation permet de catalyser la désintégration des polluants (Kuiper *et al.*, 2004). L'activité microbienne joue alors un grand rôle dans le processus.

1.2.1.5 Phytovolatilisation

Certaines plantes sont capables d'absorber les contaminants par les racines et les rejeter ensuite dans l'atmosphère via leurs parties aériennes, éliminant ainsi le polluant du sol (Tsao, 2003). Ce processus peut toutefois se réaliser uniquement pour les contaminants volatiles.

1.2.2 Dynamique de la phytoremédiation

La phytoremédiation implique des vivants dans la réhabilitation des sols contaminés. Les plantes accumulent les contaminants dans leurs tissus, les dégradent ou les immobilisent dans le sol et par conséquent, la charge polluante du sol diminue. Cependant, ces processus physicochimiques de la phytoremédiation ne sont pas simples. Baltreinaite *et al.* (2012) soutiennent que de nombreux facteurs sont à prendre en considération ainsi que les circonstances dans lesquelles les plantes agissent.

1.2.2.1 Paramètres impliqués

Un large éventail d'éléments est requis pour la croissance des plantes, et par conséquent, pour le bon fonctionnement de la phytoremédiation. Les caractéristiques du sol notamment peuvent affecter le processus. Schaff *et al.* (2003) affirment que les teneurs en particules fines qui composent le sol sont des variables sensibles pour les plantes et peuvent différer d'un site à l'autre. De plus, selon eux, la présence de roches et de fragments en trop grande quantité dans le substrat peut faire entrave au développement du système racinaire des végétaux. D'autres caractéristiques du terrain peuvent également contrevenir à la phytoremédiation comme une pente abrupte, la compaction du sol et la capacité de rétention d'eau du milieu. À l'inverse, certaines propriétés du sol constituent des atouts pour l'utilisation de la technologie. Un sol riche en matière organique, véhiculant une bonne proportion de sels minéraux, particulièrement en azote (N), phosphore (P) et potassium (K) contribue au bon développement des végétaux. Le pH du sol joue un rôle important en phytoremédiation, car il est responsable de la biodisponibilité des composants du milieu. Il conditionne entre autres l'alimentation de la plante et l'accumulation des contaminants dans les tissus de la plante (Mathé-Gaspar *et al.*, 2005). Or, les caractéristiques du sol et les propriétés du substrat sont des facteurs dynamiques constituant un système complexe puisque chaque élément agit sur l'état d'un ou de plusieurs autres (Baltrenaite *et al.*, 2012).

La plante en interaction avec son milieu est également un facteur évolutif qui contribue à la complexité de la phytoremédiation. D'abord, le transfert des contaminants ou la dégradation de ceux-ci est régi par un grand nombre de paramètres, notamment les conditions environnementales (Reimann *et al.*, 2001). La photosynthèse mettant en relation l'énergie solaire et la plante, est un bon indicateur de l'efficacité de la technologie (Pietrini *et al.*, 2009). Ensuite, les précipitations assurent l'apport en eau du sol et engendrent le processus d'évapotranspiration, lequel caractérise le lien entre l'eau et la plante. En absorbant l'eau du substrat, la plante se nourrit et les racines créent un environnement riche en oxygène où l'activité biologique est améliorée (Robinson *et al.*, 2003).

Ainsi, chaque élément possède sa fonction spécifique. Il existe une grande variété dans le nombre et le type de composants du système de la phytoremédiation. De plus, les liaisons entre chacun des éléments sont pour la plupart indirectes, car elles proviennent de phénomènes biologiques, climatiques, écologiques ou chimiques. Ainsi, elles évoluent dans le temps et complexifient le système, ce qui fait de la phytoremédiation une approche multidimensionnelle.

1.2.2.2 Contexte de décision

Un autre aspect de la complexité réside dans le contexte de décision. Kiker *et al.* (2005) expliquent que les projets de réhabilitation des sols contaminés sont basés sur de multiples objectifs, soit le respect des normes environnementales, l'efficacité et l'adaptabilité de la solution, la réduction des coûts, etc. Ainsi, ces objectifs font appel à des domaines d'expertise complètement différents. L'évaluation de la méthode de réhabilitation pour chacun des sites contaminés fait alors appel à différentes parties prenantes. Ces différents groupes ont parfois des intérêts divergents et ne possèdent pas toutes les mêmes connaissances (Sorvari *et al.*, 2009). De ce fait, des méthodes d'intégration et de traitement de données hétéroclites doivent être développées afin de supporter les décideurs dans l'évaluation de la meilleure technique de réhabilitation pour les sites contaminés.

1.3 Outil d'aide à la décision

Les outils d'aide à la décision servent à supporter les décideurs ainsi que les partenaires dans la résolution de problèmes complexes. La phytoremédiation constitue une méthode complexe. L'implication de toutes les parties prenantes dans l'évaluation de la technique relativement au site contaminé contribue également à la complexité de la problématique. Dans la section qui suit, une définition de ces outils d'aide à la décision est suggérée. Dans le domaine de la remédiation des sites contaminés, différents outils de ce type ont été développés et ils sont présentés en mettant de l'avant leurs avantages et inconvénients.

1.3.1 Définition

Les outils d'aide à la décision sont développés pour assister l'utilisateur dans la résolution d'un problème évolutif en fournissant l'information pertinente avec précision, rapidité et selon les faits et les connaissances (Shim *et al.*, 2002). Ils servent aux décideurs qui sont confrontés à des critères souvent contradictoires et qui peuvent être influencés dans leur décision par le jugement, l'intuition ou l'émotion. Cependant, les outils d'aide à la décision ne remplacent pas les décideurs. Ils facilitent la recherche d'informations multiples, la structuration de problèmes, les calculs et l'évaluation d'alternatives en exposant les paramètres importants, en donnant accès aux bases de données, en présentant des modèles et en permettant de tester différents choix. Ainsi, ils aident à répondre aux questions « *Qu'est-ce qui s'est passé ?* », « *Pourquoi est-ce arrivé ainsi ?* » et « *Que se passerait-il si ?* ». Ces questions font appel à une étape importante en industrie, mieux connue sous le terme anglais *What if* qui vise à évaluer les risques pour éviter les erreurs graves et coûteuses (Haddad, 2009). Comme les outils d'aide à la décision mettent en lumière les données clés, les facteurs les plus influents et qu'ils aident à comprendre le problème dans toute sa complexité, ils sont d'une grande utilité. Grâce à ces outils, les décideurs savent sur quelles bases ils prennent leur décision et quels moyens ils utiliseront pour parvenir à leurs fins.

1.3.2 Outils d'aide à la décision existants

L'aide à la décision en termes de réhabilitation des sites contaminés fait l'objet de plusieurs études depuis les dernières années. En ce sens, des outils sont développés pour supporter les décideurs. Quelques-uns d'entre eux sont présentés ci-dessous :

Guide d'orientation pour la sélection de technologies (GOST)

Le gouvernement du Canada (2012) met à la disposition du public un outil en ligne pour aider les gestionnaires de sites contaminés. Pour obtenir une liste des techniques de décontamination applicables à son site, l'utilisateur doit remplir un questionnaire avec les spécifications de son terrain. En plus de faciliter le choix de la méthode de réhabilitation, l'outil fournit de l'information pertinente orientée-objet. Chaque contaminant fait l'objet

d'une fiche technique, de même que chaque méthode de décontamination. Ainsi, l'outil constitue une source d'information indispensable. Toutefois, l'outil comporte certaines limites. Il n'est pas suffisamment spécifique au site contaminé soumis et il n'est pas relié à la réglementation. De plus, comme il s'agit d'un questionnaire, l'utilisateur reçoit la liste des techniques applicables à son site sans savoir quels paramètres ont influencé ces choix. Ce faisant, l'utilisateur n'a pas conscience du contexte global de la problématique reliée à son site contaminé.

SélectDÉPOL

En France, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) et le bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) propose un outil semblable à celui du Gouvernement du Canada. Un outil d'aide à la décision, appelé « SélectDÉPOL » est disponible en ligne (ADEME et BRGM, 2013). Une recherche d'après trois questions peut être lancée afin d'obtenir une présélection des techniques applicables au site contaminé soumis. Des fiches techniques permettent aux usagers de prendre connaissance de chacune des méthodes de réhabilitation. De plus, des données comparatives indiquent les avantages et les désavantages de chaque traitement de manière à informer les utilisateurs. Il s'agit certes d'un outil pratique, mais peu spécifique aux conditions du site et non relié aux limites réglementaires. Un autre inconvénient réside dans le fait que le traitement des données sous forme de questionnaire ne permet pas d'exposer à l'utilisateur les paramètres critiques de son site.

Phytoremediation Decision Support System (Phyto-DSS)

Un outil d'aide à la décision conçu exclusivement pour la phytoremediation est créé en 2000 en Espagne. Il est développé pendant quelques années en Nouvelle-Zélande (2001 à 2004) puis en Suisse (2005 à 2007). Le Phyto-DSS est le seul outil disponible permettant d'évaluer spécifiquement une méthode de réhabilitation dite « douce » soit la phytoremediation (Onwubuya *et al.*, 2009). L'objectif principal du Phyto-DSS consiste à calculer les effets des variables environnementales sur la croissance de la plante et la mobilité des contaminants (Robinson *et al.*, 2003). L'outil accompagne les décideurs dans la compréhension de la phytoremediation en traitant plus d'une centaine de paramètres, lesquels

sont impliqués dans le processus de réhabilitation du sol. Ce faisant, une multitude de paramètres fait partie intégrante des calculs. Ainsi, l'outil est peu exploitable parce qu'il est difficile à paramétrer (Robinson, 2014). Par contre, le Phyto-DSS a l'avantage de calculer les coûts ainsi que les coûts des méthodes alternatives et de l'inaction.

DEcision Support sYstem for the REqualification of contaminated sites (DESYRE)

Le DESYRE vise la gestion et la remédiation intégrées de méga sites contaminés, ceux-ci appartenant à de multiples propriétaires et conduits par plusieurs parties prenantes (Carlson *et al.*, 2007). L'outil est divisé en six modules interconnectés qui traitent notamment de la caractérisation de la contamination, des facteurs socioéconomiques impliqués, de l'évaluation des risques et de l'évaluation des méthodes technologiques. Il s'adresse principalement aux experts et aux décideurs. Le DESYRE accepte un volume important de données hétérogènes en plus de supporter les décideurs dans l'évaluation des aspects socioéconomiques, environnementaux et technologiques du processus de remédiation des mégas sites contaminés. Il consiste en un outil puissant, mais peu adapté au contexte québécois étant donné la différence sur le plan de la législation et dans le traitement des sites contaminés. Au Québec, la réhabilitation s'effectue le plus souvent indépendamment pour chaque terrain et donc, il n'est que rarement question de méga sites.

L'énumération des outils ci-dessus ne constitue pas une liste exhaustive. Toutefois, elle donne un aperçu des outils créés, mis à la disposition des décideurs. Cependant, ces outils comportent quelques lacunes. Un sondage effectué par Onwubuya *et al.* (2009) indique que certains outils d'aide à la décision déjà existants contiennent de l'information trop générale, insuffisamment spécifique au site contaminé. D'autres outils sont trop compliqués et difficiles à utiliser. L'étude révèle aussi le manque de connaissance des différentes parties prenantes relativement aux méthodes douces telles que la phytoremédiation.

Dans le cadre de cette recherche, un outil d'aide à la décision est proposé afin de supporter les décideurs dans l'évaluation du site contaminé et dans l'évaluation de la phytoremédiation en tant que méthode de réhabilitation. L'information aux utilisateurs est un aspect visé dans la conception de l'outil et la finalité du projet, conjointement aux objectifs, consiste à mettre en évidence le potentiel d'un tel outil d'aide à la décision.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Le chapitre qui suit décrit la méthodologie utilisée pour le développement de l'outil d'aide à la décision. D'abord, la revue de littérature et le travail effectué avec les spécialistes ont été essentiels à la compréhension de la problématique, du contexte d'application de la phytoremédiation au Québec et éventuellement à la formulation de la solution proposée. Simultanément, la conceptualisation de l'outil s'est effectuée sous une approche systémique, notamment par l'élaboration d'un schéma, visant le traitement du problème dans son ensemble. Cette démarche a engendré la délimitation du projet et l'intégration des éléments principaux pour la création des fiches. Ensuite, les formules mathématiques issues de la littérature et les discussions avec les experts ont mené à l'algorithme de calculs pour l'estimation du temps de traitement de la technologie. L'incorporation de paramètres externes pour mieux refléter la réalité des sites s'est effectuée selon une méthode spécifique. Enfin, la planification des coûts a été réalisée suivant les étapes d'un projet et considérant deux paramètres externes.

2.1 Travaux effectués avec les spécialistes

Des travaux ont été réalisés avec la collaboration des experts en phytoremédiation, M. Michel Labrecque et M. Frédéric Pitre, tous deux chercheurs à l'Institut de recherche en biologie végétale (IRBV) et employés de la division de la recherche scientifique du Jardin botanique de Montréal.

2.1.1 Revue de littérature et discussion avec les experts

La première phase du projet, préalablement à la conceptualisation de l'outil, consistait à mieux comprendre la phytoremédiation et ses différents mécanismes. Pour ce faire, une revue de la littérature a permis l'acquisition de connaissances relatives à la phytoremédiation et plus particulièrement, des pratiques employées et des réalisations faites au Québec. De plus,

cette recherche bibliographique a permis de découvrir les différents outils d'aide à la décision existants et de mettre en évidence leurs lacunes ainsi que les besoins des décideurs pour faciliter leur prise de décision.

Suite à ces lectures, des discussions avec des experts ont été menées sur plusieurs mois. Un exercice de schématisation du système sol-contaminants-plantes a été réalisé grâce à l'aide des spécialistes Michel Labrecque et Frédéric Pitre. Les discussions avec eux, à leur bureau du Jardin botanique, ont permis entre autres :

- l'évolution du portrait global de la phytoremédiation selon une approche systémique;
- l'identification des paramètres les plus influents;
- l'élaboration de l'algorithme de calculs d'estimation du temps;
- la planification des coûts.

Cet exercice a été réalisé tout en assurant :

- le maintien d'un effort soutenu pour garder l'accent sur l'aspect simpliste de l'outil, facile d'utilisation et en lien avec la réglementation;
- la conservation d'une vision large tout au long du projet, notamment pour intégrer la considération de toutes les parties prenantes dans la création de l'outil d'aide à la décision.

2.1.2 Études de cas

La participation active à des projets de phytoremédiation, pour en faire des études de cas, a été nécessaire pour comprendre le contexte d'application de la technologie et bénéfique pour mener l'outil d'aide à la décision à terme. De plus, le suivi des projets a permis l'observation du déroulement des opérations, l'identification des problèmes rencontrés et l'implantation des solutions.

2.1.2.1 Site de Monsabré

Issu d'un ancien jardin communautaire, le parc Monsabré a été déclassé en 2001. Le diagnostic du site met en évidence la présence de contamination, et ce, à plusieurs endroits sur le site. En 2013, l'équipe du Jardin botanique obtient l'accord de la ville et le financement du Fonds municipal vert de la Fédération canadienne des municipalités (FCM) pour implanter un dispositif expérimental de phytoremédiation. Le suivi de chacune des opérations effectuées dans le cadre du projet Monsabré a permis de dresser la liste des étapes à réaliser et des coûts reliés. De plus, les travaux effectués sur le terrain ont permis de comprendre la complexité dans laquelle s'inscrit la phytoremédiation. L'observation de la terre et des micro-organismes qui y vivent, l'accroissement des plantes à chaque saison et le climat changeant sont autant de facteurs, notés lors des travaux exécutés sur le site, qui ont ensuite fait l'objet des discussions avec les spécialistes (Michel Labrecque et Frédéric Pitre, 2014). Le site Monsabré a été un projet type servant de modèle et utile à la création de l'outil d'aide à la décision.

2.1.2.2 Site de Golder

En 2009, Golder & Associés ont obtenu le mandat de caractériser et ensuite, réhabiliter un terrain de plusieurs hectares dans l'est de la ville de Montréal, appartenant autrefois à Pétromont. Ils ont concédé une parcelle de terrain pour une expérience scientifique de phytoremédiation dirigée et opérée par l'équipe de chercheurs de la division R&D du Jardin botanique de Montréal. Les travaux effectués à cette parcelle dès la première saison en 2013 ont engendré la prise de conscience par rapport aux conditions pouvant être changeantes d'un site à un autre. Notamment, comme le sol est moins fertile que celui du site Monsabré, il a fallu pallier ces conditions moins favorables en amendement le sol en matière organique. Cette opération supplémentaire a évidemment alimenté les réflexions quant au traitement des données concernant les caractéristiques du sol ainsi que la comptabilisation des coûts d'opération. De plus, les observations faites à chacune des visites du site ont permis de comparer la croissance des végétaux en fonction des variantes telles que le type de sol et ses composantes.

2.2 Conceptualisation de l'outil

Parallèlement à la revue de littérature, aux discussions avec les experts et aux travaux effectués en chantier, la conceptualisation de l'outil s'est réalisée sur plusieurs mois de façon progressive.

2.2.1 Schéma du système dynamique de la phytoremédiation

Le système sol-contaminants- plante constitue un système dynamique. Les divers éléments impliqués dans le processus de phytoremédiation et les interactions entre ceux-ci peuvent changer avec le temps. La figure 2.1 expose les principes de base de la phytoremédiation pour établir un support visuel et permettre une vue d'ensemble de la problématique.

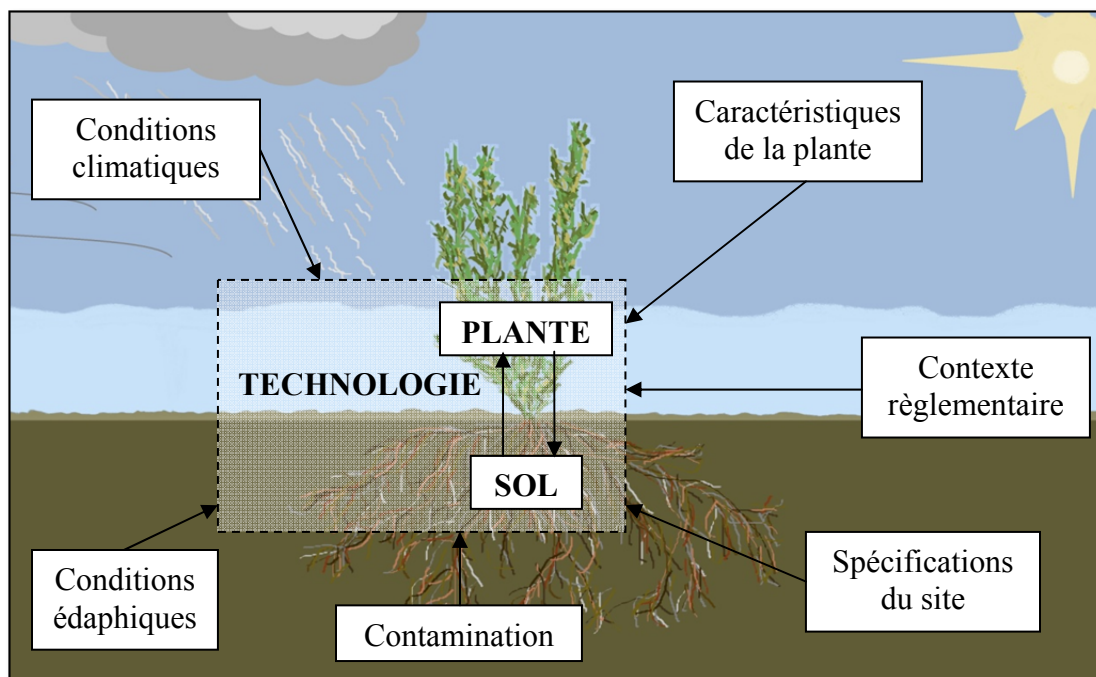


Figure 2.1 Schéma du système dynamique de la phytoremédiation

La problématique dans sa globalité, à savoir la phytoremédiation et le contexte dans lequel les plantes doivent agir, a ainsi été établie. La plante et le sol ont été déterminés comme étant

les deux éléments piliers du système dynamique. La plante étant le procédé, figure au centre, car elle est au cœur de la solution. Conceptuellement, elle constitue « l'appareil technologique ». Le sol, quant à lui, est l'objet à traiter. Il impose ses contraintes dans les échanges ioniques. Les deux éléments, c'est-à-dire la plante (*procédé*) et le sol (*élément à traiter*), travaillent ensemble et sont vus comme un système dynamique (*processus*).

Cependant, la phytoremédiation ne se limite pas seulement aux interactions entre le sol et la plante. De nombreux autres constituants entrent en ligne de compte et s'interposent dans le travail des végétaux. L'élaboration du schéma du système dynamique de la phytoremédiation a suscité la réflexion, a permis de prendre connaissance des différents concepts impliqués et par conséquent, a mené à l'identification des sous-systèmes. La contamination, les conditions édaphiques, les caractéristiques de la plante, les conditions climatiques, le contexte réglementaire et les spécifications du site sont tous des facteurs pouvant affecter le processus de la phytoremédiation et les coûts affectant par conséquent la prise de décision.

2.2.2 Limites conceptuelles de l'outil

Le travail fait en amont a permis de prendre connaissance des réels besoins des décideurs en termes d'évaluation des sites contaminés et d'évaluation de la phytoremédiation en tant que méthode de réhabilitation. Ce faisant, les limites conceptuelles du projet ont pu être fixées. Dans le cadre de ce projet, l'objectif est de concevoir un outil d'aide à la décision comportant une estimation du temps et une facilitation pour la planification des coûts. Le développement d'une première version de cet outil a été réalisé d'après certaines limitations présentées à la figure 2.2. Ces limitations ont façonné le développement de l'outil relativement aux conditions du Québec, à la contamination inorganique du sol au cadmium, à la phytoextraction et à l'utilisation du cultivar de saule *Salix purpurea* 'Fish Creek'. Ce cas spécifique a servi à l'élaboration des calculs d'estimation de temps et à la planification des coûts. Toutefois, une vision plus large de la phytoremédiation appliquée dans la province de Québec a été conservée tout au long du projet concernant l'outil d'aide à la décision comme tel. Par exemple, la fiche du site contaminé a été conçue pour un sol présentant une contamination, soit inorganique ou organique. De plus, la fiche de la plante a été créée selon

un format standard de façon à ce que ce soit possible de la remplir avec les informations pour d'autres espèces de plante. En bref, l'outil a été créé de manière flexible, notamment pour faciliter le développement des prochaines versions.

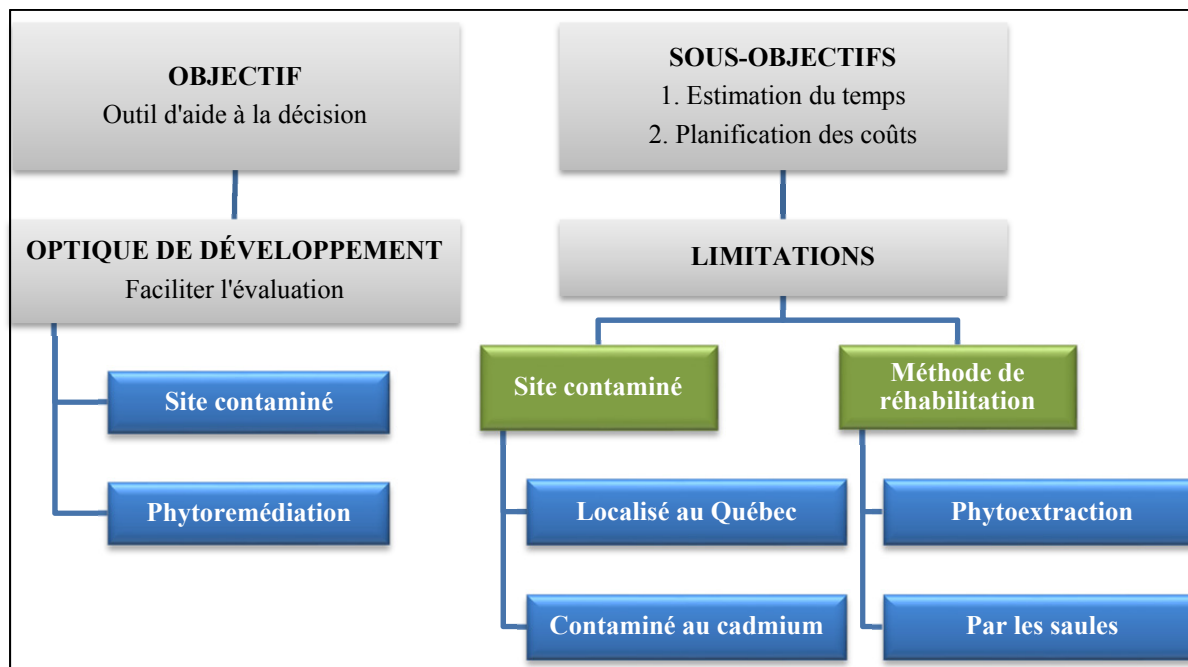


Figure 2.2 Limites conceptuelles de l'outil

2.2.3 Structure de l'outil

La création de l'outil d'aide à la décision a été inspirée par le design de Geng *et al.* (2001). La méthode *orientée-objet* a été choisie, car il s'agit d'une technique de conceptualisation intuitive et compatible avec la plupart des logiciels de programmation.

Pour ce faire, l'élaboration de fiches a été réalisée. Tel que vu dans le schéma du système dynamique, le sol représente l'élément à traiter et la plante symbolise le procédé. Ainsi, les deux éléments, au cœur de la problématique, font chacun l'objet d'une fiche. Ces fiches ont été conçues de manière à ce qu'elles contiennent essentiellement les informations nécessaires aux calculs de temps et à la planification des coûts liés à la phytoremédiation, tel que prescrit par les objectifs de ce projet de recherche. La fiche du site contaminé a été élaborée

avec des champs d'entrée servant à obtenir de l'utilisateur les données du site contaminé. À l'inverse, la fiche de la plante a été bâtie comprenant les données de la plante puisque celles-ci sont fixes et constituent les spécifications de « l'appareil technologique ». Des pages de référence sont jointes au design pour informer l'utilisateur sujet de la réglementation, de la caractérisation des types de sols, etc. De plus, un répertoire des végétaux a été créé permettant de choisir une plante parmi celles proposées. Le détail des calculs d'estimation du temps et de la planification des coûts a également été présenté sous forme de fiche. Le schéma de la figure 2.3 illustre la structure de l'outil d'aide à la décision.

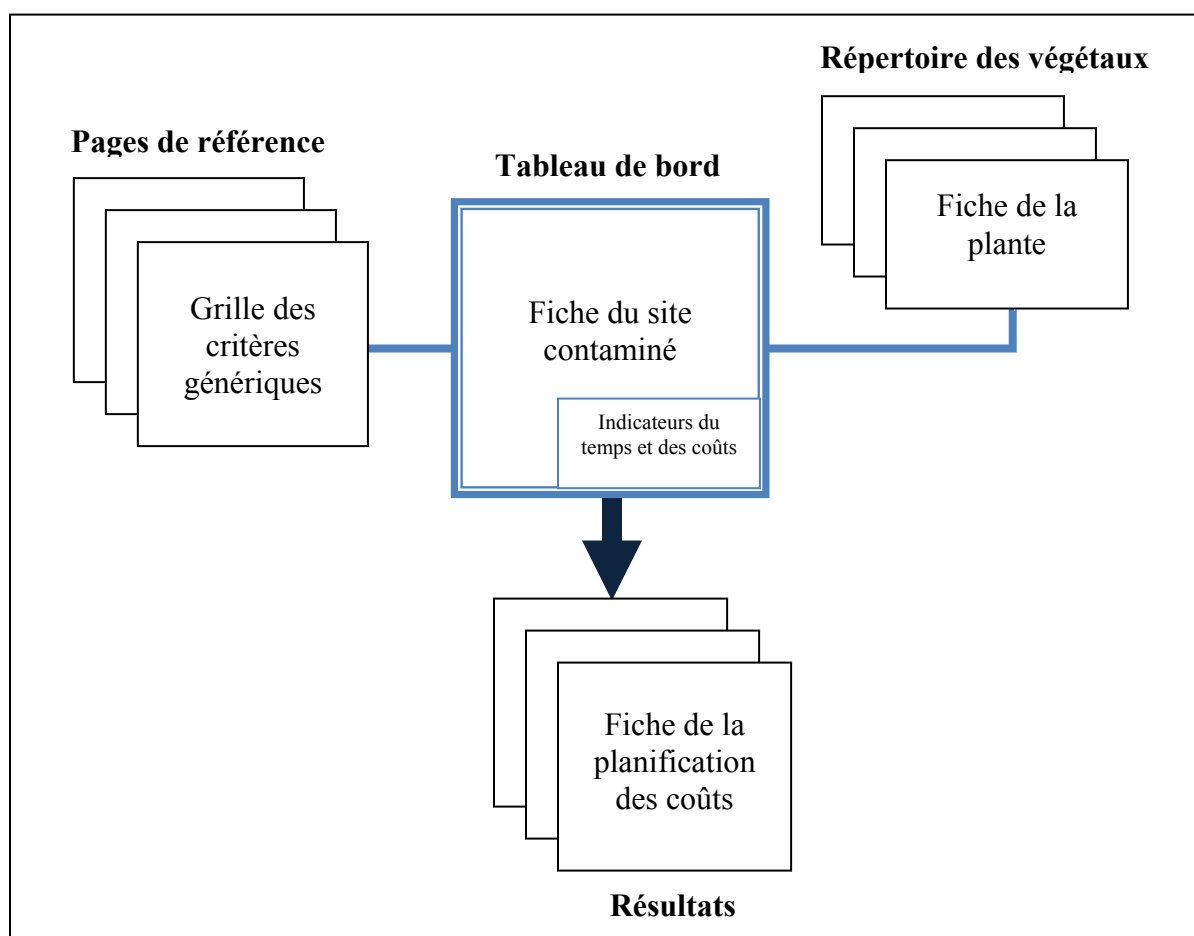


Figure 2.3 Structure de l'outil d'aide à la décision

2.2.4 Élaboration des fiches

Suivant l'approche orientée-objet, les fiches ont été conçues pour contenir les informations principales. Le travail effectué en amont a permis de distinguer les paramètres essentiels devant faire partie de ces fiches. Les discussions avec les experts, le travail sur le terrain, les lectures, notamment la lecture du *Guide de caractérisation des terrains* ont permis la formulation des fiches et l'emploi des unités de mesure usuelles. Dans la section qui suit, la fiche du site contaminé et la fiche de la plante sont présentées.

2.2.4.1 Fiche du site contaminé

Le tableau 2.1 présente la fiche du site contaminé dans laquelle apparaissent les paramètres nécessaires aux calculs du temps et à la planification des coûts. Inspirée des sous-systèmes définis lors de l'élaboration du schéma du système dynamique de la phytoremédiation, la fiche du site contaminé a été divisée en quatre sections, soit la contamination, le critère réglementaire, le site et le sol.

Tableau 2.1 Fiche du site contaminé

| FICHE DU SITE CONTAMINÉ | | | |
|-------------------------------|-------------------------------|---|--------|
| CONTAMINATION | | | |
| Description | Identifiant/Mesure | Plage de valeurs acceptées | Unités |
| Nature | Contaminant no 1 | Contaminants normés par le RPRT (voir l'annexe I) | - |
| | Contaminant no 2 | | - |
| | Contaminant no 3 | | - |
| Degré | Concentration |] 0 - 10000 [| mg/kg |
| | Profondeur |] 0 - 100 [| cm |
| CRITÈRE | | | |
| Description | Identifiant/Mesure | Plage de valeurs acceptées | Unités |
| Objectif de la réhabilitation | Critère générique à atteindre | A, B ou C | - |

Tableau 2.1 Suite

| FICHE DU SITE CONTAMINÉ | | | |
|---------------------------|--|---|-------------------|
| SITE | | | |
| Description | Identifiant/Mesure | Plage de valeurs acceptées | Unités |
| Grandeur | Superficie |] 0 - ∞ | m ² |
| Localisation géographique | Secteur géologique | Voir la carte des cinq provinces géologiques du Québec à la figure 3.10 | - |
| | Secteur de degrés-jours de croissance réelle | Voir la carte des degrés-jours de croissance réelle à la figure 3.9 | - |
| Accès et protection | Clôture | - | \$ |
| SOL | | | |
| Description | Identifiant/Mesure | Plage de valeurs acceptées | Unités |
| Grandeur physique | Masse volumique | [1000 - 2000] | kg/m ³ |
| Acidité | Valeur de pH | [0 - 14] | - |
| Texture | Teneur sable | [0 - 100] | % |
| | Teneur limon | [0 - 100] | % |
| | Teneur argile | [0 - 100] | % |
| Intervention | Préparation | - | \$ |
| Type | Remblais | - | - |
| Intervention | Amendement | - | \$ |
| Intervention | Désherbage | - | \$ |
| Intervention | Amendement en matière organique | - | \$ |

Contamination

La première section de la fiche du site contaminé vise à soutirer les informations concernant la nature et le degré de la contamination. Selon les entrevues avec les experts, il a été

déterminé que les contaminants les plus importants qui font l'objet des préoccupations sont la plupart du temps limités à trois. Le choix des principaux polluants peut reposer sur plusieurs facteurs dépendamment du contexte. En voici quelques-uns :

- la gravité des impacts sur la santé humaine et l'environnement;
- l'écart entre la concentration du sol et la norme prescrite;
- la plus forte concentration dans le sol.

Critère

Les critères A, B et C (voir la grille à l'annexe I) du ministère renseignent sur la teneur du polluant acceptée en fonction de la vocation du site. Dans le cas de l'outil d'aide à la décision, ces critères constituent la cible à atteindre.

Site

La troisième section de la fiche du site contaminé comprend la grandeur du site, la localisation et son accès. D'abord la superficie du site est un paramètre influent en ce qui concerne les dépenses du projet de réhabilitation, car chacune des interventions à réaliser doit être faite sur toute la surface du site. La localisation géographique détermine le secteur géologique dans lequel le site est localisé et la zone relative aux degrés-jours de croissance, deux données importantes en termes de calcul du temps et de planification des coûts.

Sol

Puisque le sol est un élément pilier en phytoremédiation, ses caractéristiques résident au centre de la problématique. Notamment, la masse volumique du sol, la valeur de pH et la texture du sol font partie des informations importantes à obtenir. La section « Sol » de la fiche du site contaminé comprend aussi les interventions qui peuvent être faites soit au début ou en cours de projet telles que la préparation du terrain, l'amendement en matière organique, la fertilisation et le désherbage.

2.2.4.2 Fiche de la plante

Le tableau 2.2 présente la fiche de la plante qui a été divisée en deux sections. La première section comporte les informations générales et la deuxième section, les caractéristiques spécifiques de la plante en lien avec le processus de phytoremédiation et avec les coûts d'opérations.

Tableau 2.2 Fiche de la plante

| FICHE DE LA PLANTE | | |
|---------------------------------|---|------------|
| INFORMATIONS GÉNÉRALES | | |
| Description | Identifiant/Mesure | |
| Identification | Nom commun | |
| | Nom latin | |
| Type de végétal | Herbacée, arbuste ou arbre | |
| Cycle de vie | Pérenne ou annuelle | |
| INFORMATIONS SPÉCIFIQUES | | |
| Description | Identifiant/Mesure | Unités |
| Coût | Prix unitaire de la bouture | \$ |
| Croissance au bout d'une saison | Masse sèche maximale | kg |
| Densité de plantation | Nombre d'unités pour la superficie (respectant un intervalle déterminé) | plantes/ha |
| Fréquence de la récolte | Annuelle | - |
| Capacité d'extraction | Facteur de bioaccumulation pour le contaminant no 1 | mg/kg |
| | Facteur de bioaccumulation pour le contaminant no 2 | mg/kg |
| | Facteur de bioaccumulation pour le contaminant no 3 | mg/kg |

Informations générales

L'outil d'aide à la décision développé dans le cadre de ce projet a suivi l'optique de développement initiale, soit la conception d'un outil simple et facile d'utilisation. En ce sens,

la fiche de la plante comprend peu de données afin de ne pas saturer d'information l'utilisateur : le nom commun, le nom latin, le type de végétal et le cycle de vie de la plante.

Informations spécifiques

En termes d'informations spécifiques, le prix unitaire de la plante choisie est un facteur important quant au budget à prévoir. Ensuite, la masse sèche maximale est un indice de la croissance de la plante. La densité de la plantation, la fréquence de la récolte et le facteur de bioaccumulation sont tous des paramètres influents sur le temps et les coûts de la phytoremédiation.

2.3 Algorithme de calculs d'estimation du temps

L'indication de la durée de la phytoremédiation est une information capitale pour les décideurs. Pour cette raison, l'estimation du temps était un des sous-objectifs de ce projet de recherche. L'algorithme de calculs a d'abord été élaboré à partir de relations mathématiques traduisant les notions clés, physiques et biologiques, de la phytoextraction. Ces équations sont purement théoriques. Elles contiennent les variables essentielles aux calculs telles que la superficie du site, la concentration de la contamination dans le sol, la masse sèche de la plante, etc. Toutefois les calculs théoriques ne suffisent pas pour prévoir le temps de phytoextraction. Il existe de multiples paramètres qui soit stimulent soit altèrent le processus d'accumulation du contaminant dans la plante. Pour représenter le plus fidèlement possible le comportement réel de la technologie, l'intégration de certains paramètres externes est nécessaire pour l'estimation du temps de la phytoextraction. Pour ce faire, un coefficient d'affectation a été attribué à chacun de ces paramètres. Une méthode spécifique a été mise en œuvre pour déterminer la valeur de ce coefficient en fonction de l'affectation de chacun des éléments sur le sol et/ou la plante. Deux paramètres externes ont été pris en compte dans le cadre de ce travail, à savoir les degrés-jours de croissance et le pH du sol qui sont présentés dans le chapitre des résultats.

2.3.1 Variables de base

Les variables de base sont essentielles aux calculs du temps. Dans la conception de l'outil d'aide à la décision, elles ont servi à élaborer les fiches du site contaminé et de la plante. Les variables de base sont les suivantes :

- contaminant;
- concentration du contaminant dans le sol (mg/kg);
- profondeur de la contamination (cm);
- critère générique à atteindre (A, B ou C);
- superficie (ha);
- masse volumique du sol (kg/m³);
- masse sèche de la plante (kg);
- densité de plantation (pl/ha);
- facteur de bioaccumulation de la plante (mg/kg).

2.3.2 Élaboration des calculs

Des auteurs, experts en phytoremédiation, ont proposé des équations mathématiques permettant de calculer le temps que prennent les végétaux pour retirer les contaminants inorganiques du sol. Notamment, dans une de ses publications, Robinson *et al.* (2003) proposent une équation mathématique qui prend en considération de nombreux paramètres tels que le facteur d'absorption des racines, la transpiration de la plante, la densité du sol, etc. Trapp (2014) suggère une formule qui tient compte entre autres de l'évapotranspiration et de la lixiviation dans le sol.

Les experts qui établissent des équations mathématiques pour la phytoextraction prennent toujours le bilan massique comme point de départ. Dans le cas de la présente recherche, le bilan de masse a d'abord été simplifié à sa plus simple expression :

$$\begin{array}{c}
 \text{TEMPS} \\
 \text{INITIAL} \\
 \boxed{\text{Masse de contaminants dans le sol}}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 \text{TEMPS FINAL} \\
 \boxed{\text{Masse de contaminants accumulés dans les tissus végétaux}}
 \end{array}
 +
 \begin{array}{c}
 \boxed{\text{Masse de contaminants restants dans le sol, perdue dans la nappe phréatique ou dans l'air, transportée par les eaux de surface, etc.}}
 \end{array}
 \quad (2.1)$$

La présente recherche s'est intéressée aux deux premières variables de cette équation (la masse de contaminants dans le sol et la masse de contaminants accumulés dans les tissus végétaux), car elles sont mesurables et sont directement en lien avec le processus d'évaluation de la phytoremédiation. Les calculs sont expliqués en détail ci-dessous.

La masse de contaminants dans le sol correspond à :

$$\begin{array}{c}
 \text{Masse de} \\
 \text{contaminants} \\
 \text{dans le sol} \\
 \text{(mg)}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 \text{Concentration} \\
 \text{de contaminant} \\
 \text{dans le sol} \\
 \text{(mg/kg)}
 \end{array}
 \times
 \begin{array}{c}
 \text{Volume de} \\
 \text{sol (m}^3\text{)}
 \end{array}
 \times
 \begin{array}{c}
 \text{Masse} \\
 \text{volumique du} \\
 \text{sol (kg/m}^3\text{)}
 \end{array}
 \quad (2.2)$$

Cette relation mathématique a également pu être utilisée pour déterminer la masse de contaminants à retirer du sol afin d'atteindre le critère générique voulu. Toutefois, au lieu de multiplier la concentration de contaminant dans le sol, c'est la différence entre la concentration de la contamination initiale et de la concentration de la contamination finale, celle-ci dictée par la norme, qui a été utilisée :

$$\begin{array}{c}
 \text{Masse de} \\
 \text{contaminants} \\
 \text{à retirer du} \\
 \text{sol (mg)}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c}
 \text{Différence entre} \\
 \text{la concentration} \\
 \text{initiale et la} \\
 \text{concentration} \\
 \text{finale dans le} \\
 \text{sol (mg/kg)}
 \end{array}
 \times
 \begin{array}{c}
 \text{Volume de} \\
 \text{sol (m}^3\text{)}
 \end{array}
 \times
 \begin{array}{c}
 \text{Masse} \\
 \text{volumique du} \\
 \text{sol (kg/m}^3\text{)}
 \end{array}
 \quad (2.3)$$

La masse de contaminants accumulés dans les tissus végétaux de la plante a été générée par le facteur de bioaccumulation de la tige et des feuilles (en fonction du contaminant) et la masse sèche de la plante (parties aériennes) :

$$\begin{array}{l} \text{Masse de} \\ \text{contaminants} \\ \text{accumulés dans} \\ \text{les tissus végétaux} \\ \text{de la plante} \\ \text{(mg)} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Facteur de} \\ \text{bioaccumulation} \\ \text{de la tige et des} \\ \text{feuilles (mg/kg)} \end{array} \times \begin{array}{l} \text{Masse sèche} \\ \text{de la plante} \\ \text{(tige et} \\ \text{feuilles)} \\ \text{(kg)} \end{array} \quad (2.4)$$

Le nombre de plantes agissant sur l'étendue du site contaminé a été obtenu comme suit :

$$\begin{array}{l} \text{Nombre de plantes} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Superficie du} \\ \text{site (ha)} \end{array} \times \begin{array}{l} \text{Densité de} \\ \text{plantation} \\ \text{(pl/ha)} \end{array} \quad (2.5)$$

L'équation finale qui a permis d'estimer le temps pour la phytoextraction est la suivante :

$$\begin{array}{l} \text{Temps} \\ \text{(années)} \end{array} = \frac{\begin{array}{l} \text{Masse totale de contaminants à} \\ \text{retirer du sol (mg)} \end{array}}{\begin{array}{l} \text{Masse de contaminants retirés par} \\ \text{les plantes par année (mg/année)} \end{array}} \quad (2.6)$$

Cette formule d'estimation du temps est théorique et cohérente. Toutefois, comme la phytoextraction implique de nombreux phénomènes, l'équation nécessite davantage d'élaboration. Dans le cadre de cette recherche, une adaptation est suggérée. Elle consiste à incorporer aux calculs théoriques deux paramètres externes en déterminant un coefficient d'affectation pour chacun d'eux.

2.3.3 Méthode de détermination du coefficient d'affectation

Dans le contexte d'application de la phytoextraction, les plantes agissent et réagissent avec plusieurs paramètres environnants. Outre les variables de base essentielles aux calculs, certains paramètres externes ont une réelle influence sur la technologie et doivent être considérés dans l'évaluation initiale. Pour élaborer des calculs de temps plus près de la

réalité, un coefficient a été établi pour chacun des paramètres externes. Ce coefficient a été déterminé suivant une méthode spécifique permettant de définir la manière dont les paramètres influencent le processus de phytoextraction et, par conséquent, affectent le temps. Dans le cadre de la présente recherche, cet exercice a été réalisé pour deux paramètres. Les degrés-jours de croissance et le pH du sol apparaissant parmi les paramètres les plus influents en phytoextraction sont présentés dans le chapitre des résultats.

Pour développer la méthode de détermination du coefficient d'affectation, un principe reposant sur le concept même de la phytoremédiation a été défini :

« *Les plantes doivent vivre* »

Les plantes doivent être maintenues en vie puisqu'elles instaurent le processus de réhabilitation du sol. En bref, elles sont « l'appareil technologique ». D'après ce principe, une condition idéale a été identifiée pour chacun des paramètres externes. Une valeur a été fixée en fonction des besoins de la plante, relativement au paramètre en question, pour obtenir le plein potentiel de croissance. Ensuite, des valeurs limites ont été définies pour chacun des paramètres en fonction de leur impact sur la santé/survie de la plante. Enfin, un coefficient d'affectation a été attribué aux paramètres externes relativement à leur influence sur le processus de phytoextraction. Ce coefficient suit une droite de régression, laquelle a été déterminée pour chaque élément afin d'établir par relation mathématique l'affectation de celui-ci sur les calculs du temps. Le schéma de la figure 2.4 résume la méthode développée.

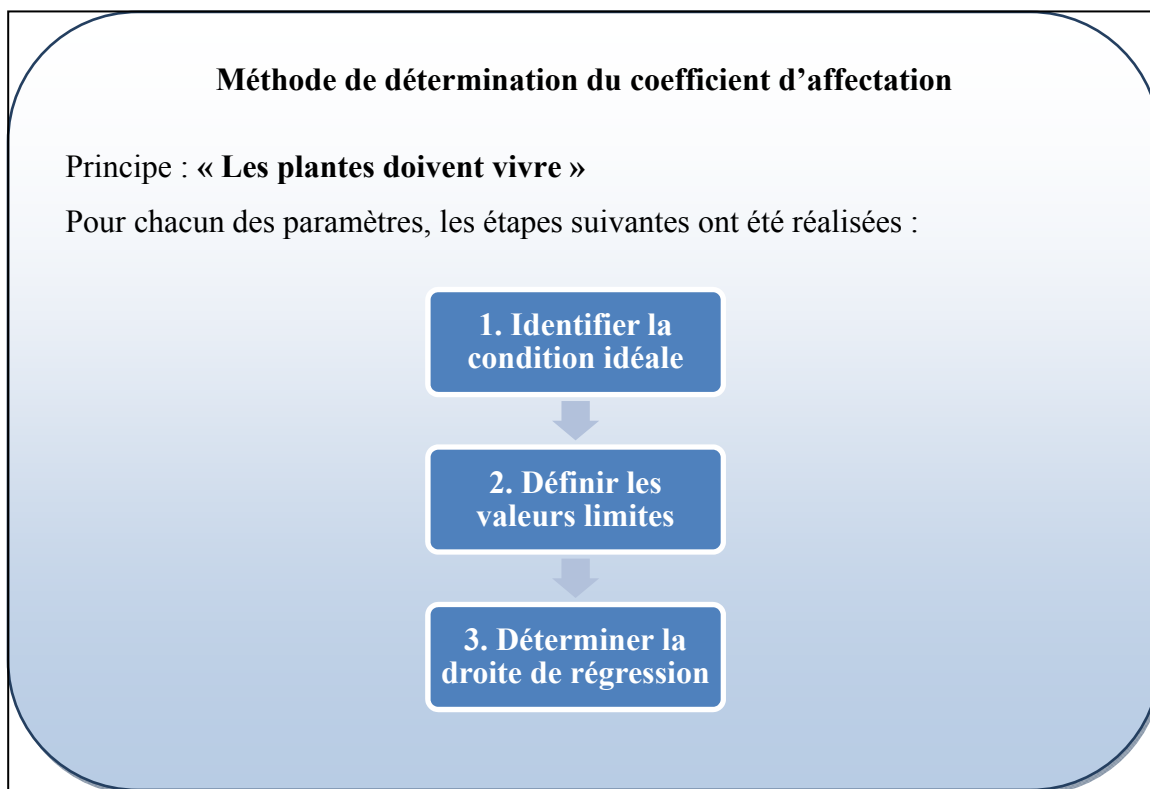


Figure 2.4 Méthode de détermination du coefficient d'affectation

2.4 Planification des coûts

Le deuxième sous-objectif de ce projet de recherche consistait en la facilitation pour la planification des coûts reliés à un projet de phytoremédiation. Plus précisément, les coûts ont été planifiés pour un cas spécifique traitant de la phytoextraction du cadmium par le cultivar *Salix purpurea* 'Fish Creek'. Les étapes d'un tel projet ont d'abord été énoncées, entraînant ensuite l'élaboration des calculs. Toutefois, à l'instar de l'estimation du temps, les calculs théoriques sont parfois insuffisants. Des paramètres externes peuvent enfreindre le processus de phytoextraction et, par conséquent, des travaux supplémentaires peuvent s'imposer. Une méthode d'évaluation de l'affectation des coûts, relative aux paramètres externes, a été développée. Dans le cadre de cette étude, deux paramètres ont été analysés suivant cette méthode à savoir le pH et le type de sol qui sont présentés au chapitre des résultats.

2.4.1 Étapes d'un projet de phytoextraction

Les travaux à effectuer pour réhabiliter un site présentant une contamination inorganique peuvent être divisés en trois grandes étapes. La liste ci-dessous a été construite d'après les pratiques employées au Québec. Les travaux se résument, mais ne se limitent pas à :

1. Préparation du terrain

- Enlèvement de débris;
- Délimitation des rangs et/ou des parcelles;
- Labourage de la terre;

2. Implantation

- Désherbage;
- Ensemencement et/ou plantation des boutures;
- Irrigation;
- Amendement;

3. Entretien annuel

- Récolte de la biomasse et gestion de celle-ci;
- Désherbage;
- Amendement.

2.4.2 Élaboration des calculs

La plupart des auteurs s'entendent pour conclure que les coûts associés à la phytoremédiation sont relativement bas. Robinson *et al.* (2003) vantent d'ailleurs la technologie en exposant les faibles dépenses qu'elle engendre comparativement aux autres techniques. Ils estiment qu'en raison de cet avantage économique, la décision d'utiliser les plantes pour la réhabilitation des sites contaminés est généralement prise en fonction de cet aspect.

L'énumération des différentes étapes à réaliser a permis de dresser le portrait global du volet économique. Le calcul des coûts a été déterminé en comptabilisant l'achat des plantes

choisies, les coûts de préparation du terrain et d'implantation des végétaux, ainsi que les coûts d'entretien annuels. Les coûts associés à la phytoextraction s'estiment comme suit :

$$\text{Coût total (\$)} = \text{Coûts d'achat des plantes} + \frac{\text{Coûts de préparation du terrain}}{\text{Coûts d'entretien annuels}} \quad (2.7)$$

Cette comptabilisation des coûts n'est pas exhaustive. L'exercice consistait à établir le sommaire des dépenses pour faciliter la planification du budget et orienter la gestion des finances pour un projet de phytoremédiation type.

2.4.3 Méthode d'évaluation de l'affectation des coûts

Les coûts d'opération d'un projet de phytoremédiation peuvent être prévus et estimés. Par contre, des travaux supplémentaires peuvent s'avérer nécessaires selon certaines particularités notamment du site, du sol, du climat ou de la plante. Une méthode a été développée sous forme de marche à suivre afin d'évaluer l'affectation des coûts due à l'influence des paramètres externes sur la technologie et due à la méthode employée pour rectifier la valeur du paramètre. Selon une approche décisionnelle, pour chacun des facteurs, une position a d'abord été prise à savoir s'il y avait influence sur le processus de phytoextraction des plantes. Ensuite, il y a eu une réflexion quant à la possibilité de modifier le paramètre visé et par quelle méthode. Enfin, l'estimation des coûts de l'opération a été ajoutée au total des dépenses. La figure 2.5 présente de façon schématique la méthode utilisée.

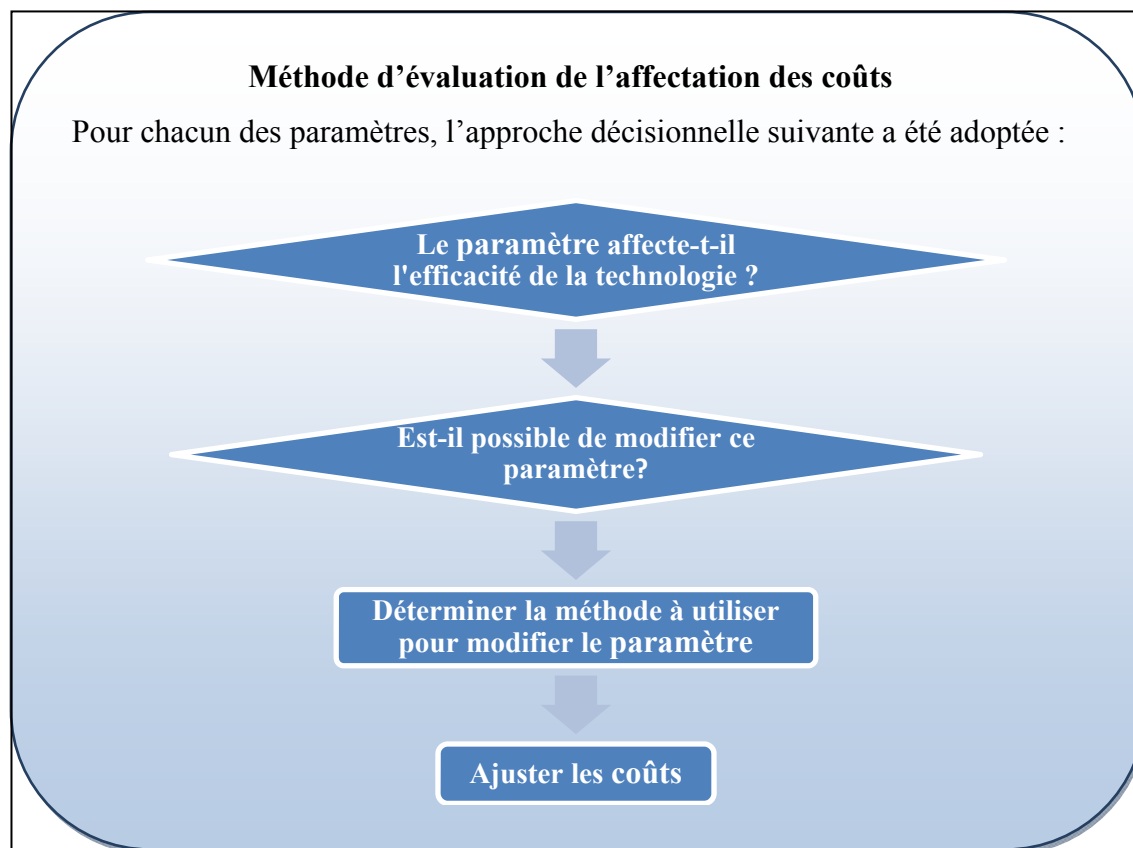


Figure 2.5 Méthode d'évaluation de l'affectation des coûts

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

Lorsqu'un site est soupçonné d'être contaminé (Phase I), il doit obligatoirement faire l'objet d'une caractérisation environnementale de site (Phase II et III) en vertu de la loi tel que décrit précédemment dans ce mémoire. L'outil d'aide à la décision développé dans le cadre de ce projet de maîtrise s'inscrit directement à l'étape suivant cette caractérisation. Une fois les données obtenues et la contamination confirmée, les décideurs ne savent généralement pas comment interpréter ces données et surtout, sur quels paramètres baser leur choix pour la méthode de réhabilitation. L'outil a été conçu de manière à soutenir les décideurs dans la compréhension du problème de contamination et dans l'évaluation du site contaminé pour formuler un choix éclairé quant à l'utilisation de la phytoremédiation. Les décisions concernant la gestion et la réhabilitation de sites contaminés sont majoritairement conduites par deux facteurs clés, soit le temps et l'argent (Sorvari *et al.*, 2009). Ce travail de maîtrise a été réalisé suivant ces deux facteurs.

Dans ce chapitre, l'outil d'aide à la décision est présenté. Plus spécifiquement, pour le calcul du temps estimé et la planification des coûts, l'outil a été développé uniquement pour les cas de sols contaminés au cadmium réhabilités par le cultivar de saule *Salix purpurea* 'Fish Creek'. L'algorithme de calculs a été développé en fonction de ces spécifications et de la considération de deux paramètres extérieurs, soit les degrés-jours de croissance et le pH du sol. Les résultats d'estimation du temps sont examinés selon une étude de cas servant comme moyen de validation externe et une analyse de sensibilité permettant d'observer l'effet de chacun des paramètres. En ce qui concerne l'aspect économique de l'aide à la décision, le pH du sol et le type de substrat sont présentés relativement à leur impact sur les dépenses. La planification des coûts reliés à la phytoextraction est montrée sous la forme d'un sommaire des dépenses à prévoir.

3.1 Outil d’aide à la décision

L’outil d’aide à la décision a été développé sous forme de système interactif pour en démontrer le potentiel. Le logiciel utilisé, *LIVECODE*, est une plateforme de développement d’applications en code source ouvert (open source) et un langage de programmation.

L’outil a été conçu de manière à faire respecter la loi et les normes en vigueur tout en concordant avec les unités de mesure utilisées lors des études de caractérisation. Les fiches élaborées pour le site contaminé et pour la plante ont été créées en pages utilisateurs, lesquelles sont présentées aux figures 3.1 à 3.6. La fiche du site contaminé exige l’entrée de plusieurs données, lesquelles ont été compartimentées en quatre onglets (figures 3.2 à 3.5).

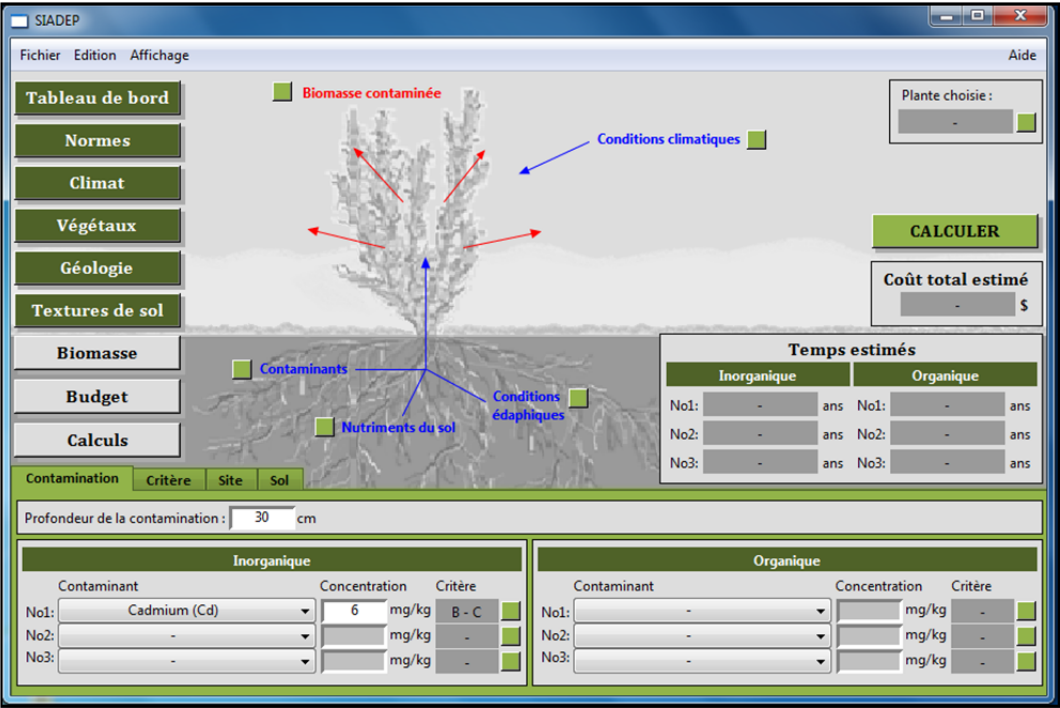


Figure 3.1 Page principale de l’outil – Fiche du site contaminé

Profondeur de la contamination : 30 cm

| Inorganique | | | |
|-------------|--------------|---------------|---------|
| No | Contaminant | Concentration | Critère |
| No1: | Cadmium (Cd) | 6 mg/kg | B - C |
| No2: | - | mg/kg | - |
| No3: | - | mg/kg | - |

| Organique | | | |
|-----------|-------------|---------------|---------|
| No | Contaminant | Concentration | Critère |
| No1: | - | mg/kg | - |
| No2: | - | mg/kg | - |
| No3: | - | mg/kg | - |

Figure 3.2 Onglet « Contamination » de la fiche du site contaminé

Veuillez indiquer le critère à atteindre pour chaque contaminant.

| Inorganique | | | | |
|-------------|--------------|----------|--------|-------------|
| No | Contaminant | Concent. | Actuel | À atteindre |
| No1: | Cadmium (Cd) | 6 | B - C | B |
| No2: | - | - | - | A |
| No3: | - | - | - | A |

| Organique | | | | |
|-----------|-------------|----------|--------|-------------|
| No | Contaminant | Concent. | Actuel | À atteindre |
| No1: | - | - | - | A |
| No2: | - | - | - | A |
| No3: | - | - | - | A |

Figure 3.3 Onglet « Critère » de la fiche du site contaminé

Superficie du site : 0 m²
 Votre site est-il clôturé ? ☐ Oui ☒ Non
 Désirez-vous clôturer le site ? (recommandé) ☒ Oui ☐ Non
 Périmètre du site : 500 m

Indiquez le secteur géologique dans lequel se situe votre site :

- ☒ Basses-Terre du Saint-Laurent
- ☐ Appalaches
- ☐ Grenville
- ☐ Supérieur et Rae
- ☐ Fosse du Labrador

Indiquez la catégorie de degrés-jours de croissance réelle dans laquelle se situe votre site :

- ☒ > 1800
- ☐ de 1600 à 1800
- ☐ de 1400 à 1600
- ☐ de 1200 à 1400
- ☐ de 1050 à 1200
- ☐ de 900 à 1050
- ☐ de 750 à 900
- ☐ de 600 à 750
- ☐ < 600
- ☐ aucune donnée

Figure 3.4 Onglet « Site » de la fiche du site contaminé

Masse volumique du sol : 1500 kg/m³
 Valeur de pH du sol : 5.5

Teneur en sable : 43 %
 Teneur en limon : 28 %
 Teneur en argile : 29 %

Veuillez indiquer les opérations que vous désirez effectuer en cochant la case appropriée.

- 1) Préparation du terrain : ☒ Oui ☐ Non
- 2) Amendement du sol en matière organique : ☐ Oui ☒ Non
- 3) Fertilisation du sol : ☒ Oui ☐ Non
- 4) Désherbage du sol : ☐ Oui ☒ Non


Figure 3.5 Onglet « Sol » de la fiche du site contaminé

Répertoire des végétaux

Saule

Salix purpurea 'Fish Creek'

Choisir cette plante ☒



Informations générales et spécifiques

Plante pérenne, saule arbustif à croissance rapide

Coût unitaire d'une bouture : 0.15 \$

Densité de plantation : 20000 plantes/ha

Masse sèche : 1 kg/plante

Récolte : annuelle

Capacité de concentration maximale dans les tissus :

Capacité de dégradation maximale dans le sol :

| Inorganique | | |
|--------------|----|-------|
| Cadmium (Cd) | 10 | mg/kg |
| - | 0 | mg/kg |
| - | 0 | mg/kg |

| Organique | | |
|-----------|---|---|
| - | 0 | % |
| - | 0 | % |
| - | 0 | % |

◀

▶

Fermer

Figure 3.6 Fiche du cultivar de saule *Salix purpurea* 'Fish Creek'

Respectant la structure établie au chapitre précédent, l’outil d’aide à la décision comporte un répertoire des végétaux exposé à la figure 3.7 ainsi que des pages de référence, illustrées aux figures 3.8 à 3.11, qui comprennent des tableaux, cartes ou graphiques pour informer l’utilisateur.

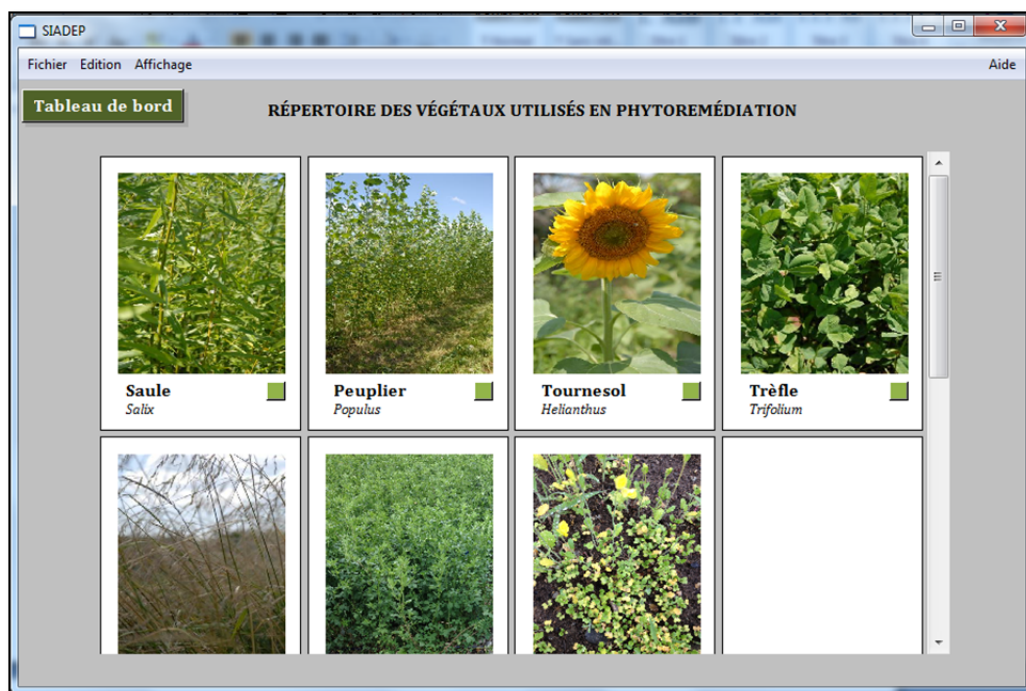


Figure 3.7 Répertoire des végétaux utilisés en phytoremédiation

| | CRITÈRES DE SOL mg/kg de matière sèche (ppm) | | |
|------------------------------------|--|------|------|
| | A | B | C |
| I - MÉTAUX (ET MÉTALLOÏDES) | | | |
| Argent (Ag) | 2 | 20 | 40 |
| Arsenic (As) | 6 | 30 | 50 |
| Baryum (Ba) | 200 | 500 | 2000 |
| Cadmium (Cd) | 1.5 | 5 | 20 |
| Cobalt (Co) | 15 | 50 | 300 |
| Chrome total (Cr) | 85 | 250 | 800 |
| Cuivre (Cu) | 40 | 100 | 500 |
| Étain (Sn) | 5 | 50 | 300 |
| Manganèse (Mn) | 770 | 1000 | 2200 |
| Mercuré (Hg) | 0.2 | 2 | 10 |
| Molybdène (Mo) | 2 | 10 | 40 |
| Nickel (Ni) | 50 | 100 | 500 |
| Plomb (Pb) | 50 | 500 | 1000 |
| Selenium (Se) | 1 | 3 | 10 |

http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/annexe_2_tableau_1.htm

Figure 3.8 Grille des critères génériques pour les sols

Tirée de la *Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés*

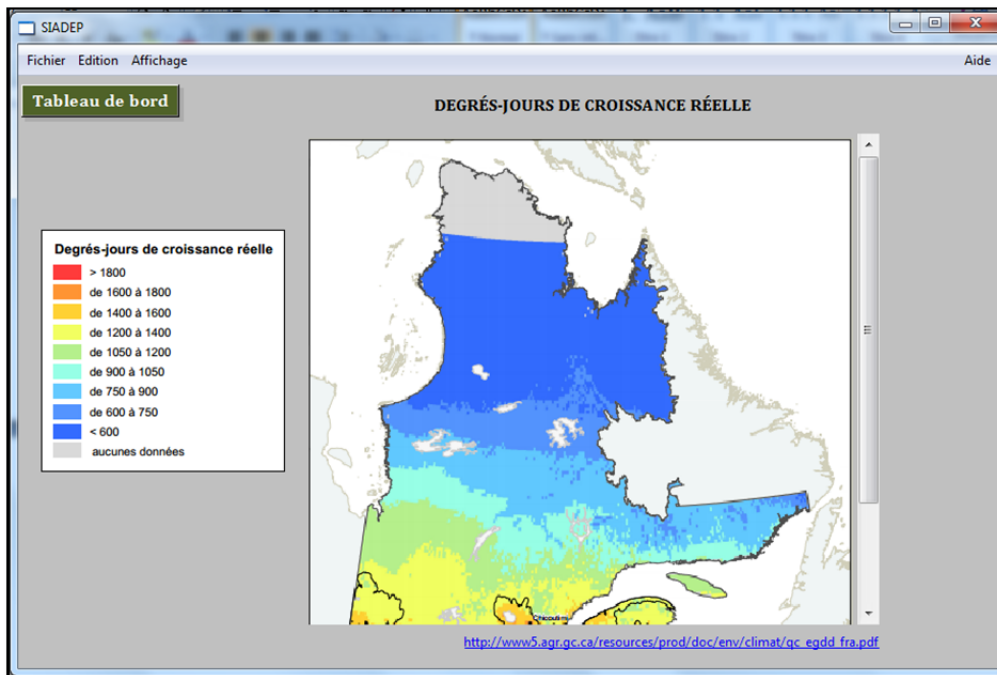


Figure 3.9 Carte des degrés-jours de croissance réelle au Québec
Tirée d'Agriculture et Agroalimentaire Canada

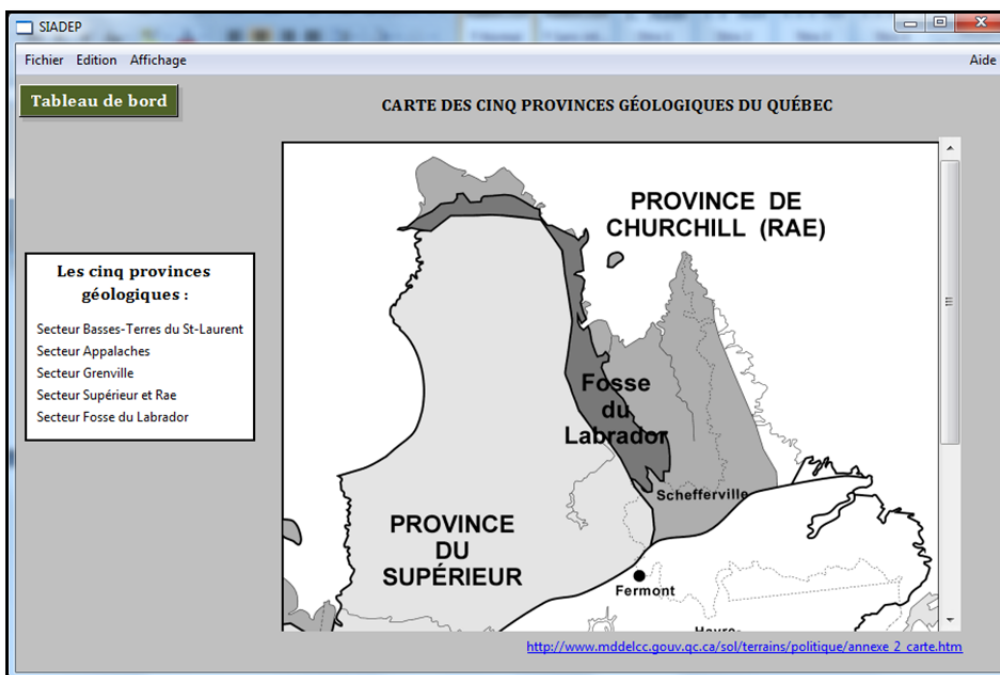


Figure 3.10 Carte des cinq provinces géologiques du Québec
Tirée de la *Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés*

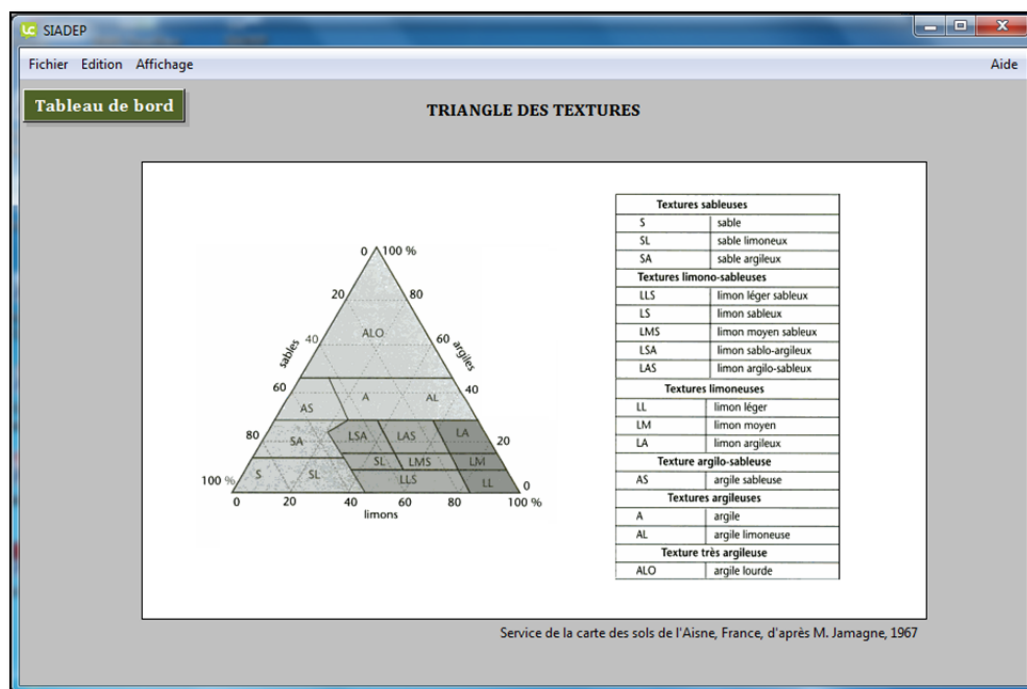


Figure 3.11 Triangle des textures de sol
Tirée du Service de la carte des sols de l'Aisne, France (Jamagne, 1967)

3.2 Prédiction du temps

L'estimation du temps que prend la phytoremédiation pour atteindre un critère générique constitue une information cruciale pour les décideurs. Cependant, il n'est pas simple d'établir une relation mathématique qui reflète bien la réalité. La formule théorique définie au chapitre précédent est cohérente, mais il faut considérer que de nombreux facteurs influencent le processus de la phytoremédiation. Dans la section qui suit, il est question des coefficients d'affectation qui ont été établis avec une méthode spécifique pour les deux paramètres sélectionnés dans le but d'ajuster les calculs de prédiction de temps.

3.2.1 Coefficients d'affectation

Selon la méthode énoncée au chapitre précédent, les coefficients d'affectation ont été établis pour les degrés-jours de croissance et le pH.

3.2.1.1 Degrés-jours de croissance

L'accumulation de chaleur, exprimée en degrés-jours de croissance, est un indice agroclimatique qui permet notamment d'estimer la durée de développement des plantes. Ainsi, le coefficient d'affectation des degrés-jours a été intégré aux calculs du temps de manière à affecter le poids sec de la plante.

Agriculture et Agroalimentaire Canada (1999) fournissent une carte qui affiche le nombre de degrés-jours de croissance réelle par zones pour le Québec :

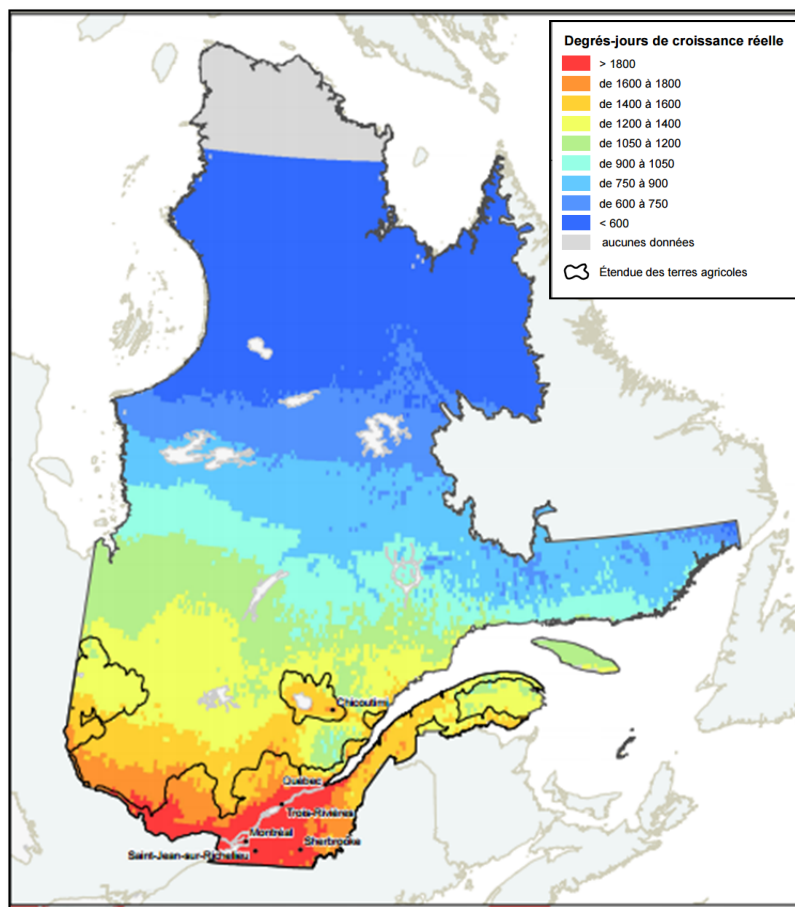


Figure 3.12 Carte des degrés-jours de croissance réelle au Québec
Tirée d'Agriculture et Agroalimentaire Canada

En se référant aux sites expérimentaux du Québec et à la littérature, il a été déterminé que les saules couramment utilisés en phytoremédiation apprécient la chaleur et se développent plus

rapidement dans le sud du Québec. La zone affichée en rouge (plus de 1800 degrés-jours) sur la carte de la figure 3.12 correspond à la condition idéale pour la phytoremédiation. Le coefficient d'affectation des degrés-jours a donc été fixé à 1 pour ce secteur. Il a également été établi que les saules localisés dans la zone illustrée en vert (de 1050 à 1200 degrés-jours) produisent une biomasse inférieure de moitié à ceux établis dans la zone en rouge. Ainsi, la droite de régression a été formulée comme suit :

$$y = \frac{(x-200)}{1600} \quad (3.1)$$

où : $y = \text{coefficient d'affectation des degrés-jours}$

$x = \text{nombre de degrés-jours}$

Il est possible de traiter les sols contaminés par phytoremédiation même dans les régions nordiques. Cependant, dans le cadre de ce projet de recherche, la limite a été établie à 1000 degrés-jours (zone affichée en vert sur la carte) dans la mesure où le nord du Québec est plus froid et donc moins propice à la phytoremédiation.

3.2.1.2 pH

Le pH est le facteur qui a le plus grand contrôle sur la capacité d'accumulation des plantes dans leurs tissus (Tremel-Schaub *et al.*, 2005). Il affecte directement la fraction soluble des contaminants. Conséquemment, dans les calculs d'estimation de temps, le facteur de bioaccumulation de la plante a été affecté par le coefficient attribué au pH du sol.

Il est établi que le cadmium est plus soluble et donc, plus facilement accumulé dans les tissus végétaux, lorsque le pH est plus bas (Dauguet *et al.*, 2011). Kirkham (2006) soutient que le comportement du cadmium est comparable à celui du zinc. Pour cette raison, le graphique de la disponibilité en zinc en relation avec le pH du sol à la figure 3.13, tirée de l'ouvrage de Doucet (1992), est considéré :

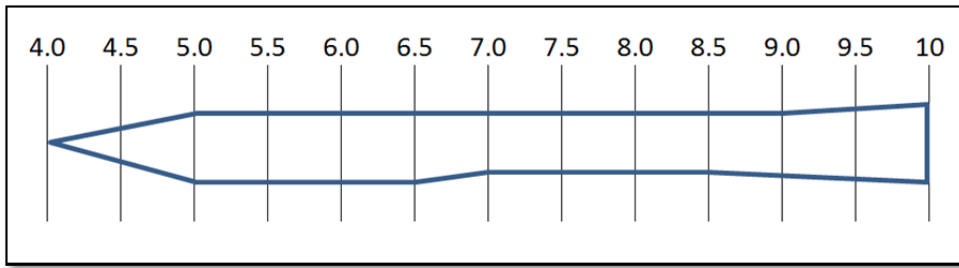


Figure 3.13 Disponibilité du zinc en relation avec le pH du sol
Tirée de Doucet (1992, p.123)

Selon Máthé-Gáspár *et al.* (2005), l'augmentation de l'acidité du sol résulte en une accumulation significative du cadmium par différentes espèces de plantes. Pour la croissance des saules généralement utilisés en phytoremédiation, un sol dont le pH est entre 5,5 et 7,5 est souhaitable. À l'intérieur de cet intervalle, la condition idéale a été fixée à une valeur de pH de 5,5, ce qui impose un coefficient d'affectation de 1 en cette circonstance. Parce que la biodisponibilité des métaux dans les sols, décroît lorsque le pH est au-dessus de 5,5 - 6,0 (Voijant *et al.*, 2011), la disponibilité du cadmium a été déterminée tel que montré à la figure 3.14 :

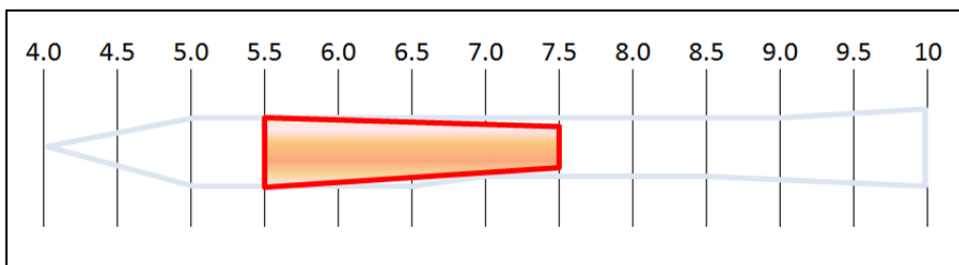


Figure 3.14 Disponibilité du cadmium en relation avec le pH du sol
Reproduite et adaptée de Doucet (1992, p.123)

Tous droits de reproduction et de modification de cette figure appartiennent à l'auteur, M. Roger Doucet.

En relation avec ce graphique de la figure 3.14, l'équation linéaire 3.2 a été adoptée pour le coefficient d'affectation du pH du sol :

$$y = -0,05x + 1,275 \quad (3.2)$$

où : y = coefficient d'affectation du pH du sol

x = valeur de pH du sol

3.2.2 Étude de cas

Afin d'évaluer la précision de l'outil d'aide à la décision en termes de calculs du temps, une validation a été effectuée au moyen d'une étude de cas.

3.2.2.1 Projet GENOREM

Amorcé en 2011, GENOREM est un projet qui utilise la phytoremédiation comme méthode de décontamination pour deux sites pollués : le site de Varennes et le site de Valcartier. À Varennes, le sol est contaminé avec des polluants organiques, notamment des hydrocarbures, tandis que le site de Valcartier est majoritairement contaminé en éléments traces. L'utilisation de différentes espèces et cultivars de saules en combinaison avec des champignons et des bactéries est l'objet de recherche des scientifiques, chercheurs, stagiaires postdoctoraux et étudiants aux cycles supérieurs impliqués. Comprendre les limites de la technologie, définir les associations plantes-microbes-sols, identifier les facteurs susceptibles de favoriser le développement et l'utilisation de la phytoremédiation, évaluer le potentiel de la technologie dans le contexte légal québécois sont les principaux objectifs de ce mégaprojet.

3.2.2.2 Comparaison entre les données réelles et celles estimées par l'outil

Le projet de ce mémoire de maîtrise s'inscrit dans les mêmes orientations que celles du projet GENOREM. Ainsi, la collaboration des chercheurs a été obtenue pour l'utilisation des données du site Valcartier (N 46° 52' 18.88", W 71° 26' 6.17") dans l'exercice de validation de l'estimation du temps. L'étude de cas avait pour but de comparer les temps de phytoextraction estimés par l'outil avec le temps réel obtenu, en fonction des caractéristiques du site.

Les données du site de Valcartier ont pu être utilisées, car elles concordaient parfaitement avec le cas employé pour la conception de l'outil. Le site de Valcartier est contaminé majoritairement en cuivre et en zinc, mais en cadmium également, et la plante utilisée pour la

phytoextraction est le saule, dont le cultivar *Salix purpurea* ‘Fish Creek’. Toutefois, les valeurs de la contamination de cadmium dans le sol au temps initial étaient en dessous du critère A fixé par le Ministère (voir tableau 3.1). L’outil calcule le temps de phytoextraction d’un site en fonction du critère indiqué par l’utilisateur. L’outil a été conçu de telle manière que lorsque le critère est déjà atteint, un message d’erreur apparaît. Pour permettre la validation de temps estimé à partir des données de Valcartier, l’outil a été modifié. Ainsi, la valeur de la contamination en cadmium dans le sol au temps final (T3) est devenue le critère A, et ce, pour chacune des données.

Le facteur de bioaccumulation de la plante a également été modifié. Il a pris la valeur correspondant à l’accumulation de cadmium dans la tige additionnée à l’accumulation de cadmium dans les feuilles. L’accumulation dans le réseau racinaire des saules a été exclue du calcul en raison du principe établi que la biomasse est recueillie chaque année (phytoextraction) afin de récupérer lorsque possible la masse de contaminants présents dans les tissus végétaux.

Le tableau 3.1 présente les résultats des simulations effectuées avec les données du site Valcartier. Le site comporte huit blocs et, dans chacun des blocs, quatre plants ont été échantillonnés. La première colonne du tableau 3.1 correspond au numéro de bloc auquel le cultivar de saule *Salix purpurea* ‘Fish Creek’ appartient, suivi de son numéro de plant (exemple : B1-6). Ensuite, le pH du sol et la densité ont été mesurés au temps initial T0. Le facteur de bioaccumulation, propre à chaque plante, est celui des parties aériennes combinées (tige et feuilles) au temps final T3. Les concentrations en cadmium dans le sol sont indiquées pour les temps T0 et T3 pour chacun des échantillons. La dernière colonne indique le temps prévu par l’outil d’aide à la décision, en années. Les simulations ont été réalisées avec les mêmes paramètres et caractéristiques que ceux du site de Valcartier :

- **Profondeur de la contamination :** 30 cm
- **Superficie du site :** 800 m²
- **Secteur géologique :** Province de Grenville
- **Degrés-jours de croissance :** entre 1600 et 1800

Tableau 3.1 Simulations avec les données du site Valcartier pour le cultivar de saule *Salix purpurea* ‘Fish Creek’

| Bloc/ No de plant | pH du sol | Masse vol. du sol (kg/m ³) | Facteur de bio- accumulation des plantes (mg/kg) | Concentration de Cd dans le sol au temps T0 (mg/kg) | Concentration de Cd dans le sol au temps T3 (mg/kg) | Temps prévus par l’outil (années) |
|-------------------------|--------------|---|--|--|--|---|
| B1-6 | 5,93 | 1150 | 8,20 | 0,29 | 0,10 | 4,4 |
| B1-30 | | | 5,72 | 0,21 | 0,10 | 3,6 |
| B1-43 | | | 4,40 | 0,39 | 0,05 | 14,5 |
| B1-59 | | | 3,96 | 0,36 | 0,18 | 8,5 |
| B2-8 | 5,71 | 1290 | 14,5 | 0,39 | 0,22 | 2,4 |
| B2-18 | | | 13,0 | 0,83 | 0,37 | 7,4 |
| B2-44 | | | 5,35 | 0,34 | 0,14 | 7,8 |
| B2-48 | | | 4,05 | 0,31 | 0,17 | 7,2 |
| B3-14 | 6,13 | 1310 | 5,60 | 0,37 | 0,20 | 6,6 |
| B3-33 | | | 14,6 | 0,46 | 0,26 | 3,0 |
| B3-43 | | | 6,09 | 0,37 | 0,17 | 7,1 |
| B3-46 | | | 5,50 | 0,32 | 0,22 | 3,9 |
| B4-8 | 7,40 | 1910 | 7,69 | 0,26 | 0,19 | 3,1 |
| B4-60 | | | 10,3 | 0,25 | 0,11 | 4,6 |
| B4-63 | | | 7,86 | 0,27 | 0,26 | 0,4 |
| B4-71 | | | 9,37 | 0,26 | 0,09 | 6,1 |
| B5-7 | 7,66 | 1040 | 4,70 | 0,25 | 0,35 | NA |
| B5-17 | | | 7,97 | 0,34 | 0,35 | NA |
| B5-47 | | | 11,9 | 0,29 | 0,12 | 2,6 |
| B5-65 | | | 8,95 | 0,28 | 0,22 | 1,2 |
| B6-29 | 6,38 | 1450 | 6,38 | 0,36 | 0,14 | 8,4 |
| B6-43 | | | 6,66 | 0,28 | 0,15 | 4,7 |
| B6-47 | | | 6,44 | 0,58 | 0,37 | 7,9 |
| B6-68 | | | 12,2 | 0,34 | 0,22 | 2,4 |
| B7-10 | 7,05 | 1340 | 10,1 | 0,69 | 0,40 | 6,7 |
| B7-18 | | | 18,6 | 0,79 | 0,58 | 2,6 |
| B7-59 | | | 13,2 | 0,97 | 0,42 | 9,7 |
| B7-63 | | | 22,9 | 0,63 | 0,34 | 2,9 |
| B8-44 | 6,15 | 1510 | 5,16 | 0,59 | 0,12 | 22,7 |
| B8-47 | | | 3,98 | 0,11 | 0,06 | 3,1 |
| B8-65 | | | 2,52 | 0,25 | 0,07 | 17,9 |
| B8-71 | | | 4,30 | 0,29 | 0,15 | 8,1 |

Les données du site de Valcartier ont été récoltées en juin 2012 pour le temps initial (T0) et en octobre 2014 pour le temps final (T3). Les temps prévus par l'outil sont donc comparés au temps réel de trois années tel qu'illustré dans le graphique de la figure 3.15 :

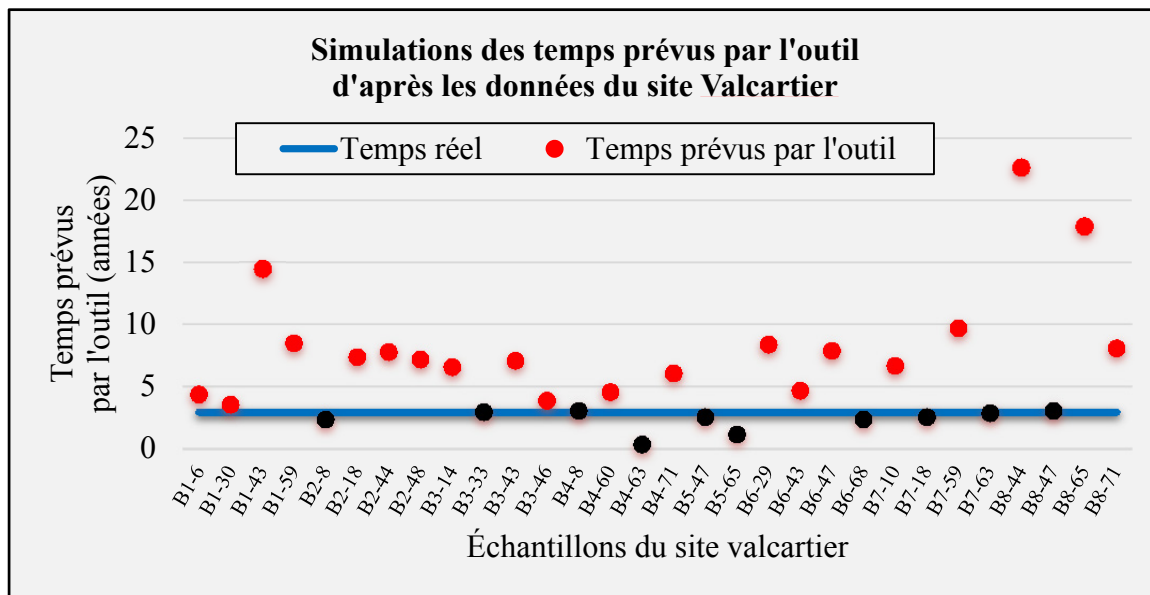


Figure 3.15 Simulations des temps prévus par l'outil

Dans le tableau 3.1 et dans le graphique de la figure 3.15, les temps indiqués en noir sont, soit sous-estimés par l'outil, soit identiques au temps réel, soit surestimés à une décimale près du temps réel. Il se trouve que le tiers des réponses correspondent à cette description. Les temps surestimés sont inscrits en rouge. Pour les deux tiers des réponses, l'outil a donc estimé une période plus longue que le temps réel de trois ans pour la phytoextraction du cadmium. La moyenne, 5,86 années, permet de faire ce même constat, car elle donne un temps plus élevé que le temps réel de 3 ans. Quant à l'écart type, 5,16 années, il indique une certaine dispersion des données.

En interprétant un à un les temps d'estimation calculés par l'outil, l'étude de cas permet tout de même de faire certains constats :

- L'outil a indiqué 0,4 année comme temps le plus court pour la phytoextraction du cadmium par le saule B4-63. Cela pourrait paraître étonnant, car le pH est

élevé (7,40) de même que la densité du sol (1910 kg/m^3), mais la cause de cette sous-estimation a été la faible différence entre la concentration de cadmium dans le sol au temps T0 et celle au temps T3, soit une différence de 1 mg/kg ;

- La période la plus longue qui a été estimée par l'outil est de 22,7 années pour le saule B8-44. Dans ce cas, il faut d'abord considérer que la quantité de cadmium éliminé du sol en trois ans est plutôt élevée comparativement aux autres données. La différence entre la concentration dans le sol au temps initial et celle au temps final est de $0,47 \text{ mg/kg}$. Un seul autre cas dépasse ce taux, celui du saule B7-59, comportant une différence de $0,55 \text{ mg/kg}$. De plus, le facteur de bioaccumulation de la plante B8-44 est relativement bas ($5,16 \text{ mg/kg}$), ce qui explique également cette surestimation;
- Pour le bloc no 8, l'outil a prévu des temps fortement surestimés, excepté pour le cas B8-47. Il faut noter que les facteurs de bioaccumulation des saules à cet endroit sont parmi les plus bas détectés pour cette étude de cas, ce qui augmente la durée de phytoextraction dans les calculs;
- Pour le bloc 5, l'outil n'a donné aucun résultat pour les cas B5-7 et B5-17, car la contamination initiale est moins élevée que la contamination finale. Pour les saules B5-47 et B5-65, les temps sous-estimés sont dus à une faible masse volumique du sol combinée à de hauts facteurs de bioaccumulation;
- Au bloc 7, les facteurs de bioaccumulation des saules sont particulièrement élevés, ce qui explique les courtes périodes de temps prévus par l'outil pour les cas B7-18 et B7-63. Quant aux deux autres échantillons de ce bloc, la différence entre la concentration initiale et la concentration finale élevée affecte le temps de phytoextraction et l'outil a alors prévu des temps plus longs que la durée réelle;
- Les temps estimés par l'outil les plus près de la réalité sont ceux du bloc 4. La moyenne des temps de ce bloc est de 3,55 ans, ce qui dépasse de 0,55 année le temps réel.

L'intervalle de confiance a été calculé pour l'estimation des temps calculés par l'outil d'aide à la décision. Il se situe entre 4,04 et 7,67 années. Puisque le temps réel de trois ans ne se retrouve pas dans l'intervalle de confiance, la précision de l'outil est plutôt faible, considérant cette étude de cas. D'ailleurs, l'erreur type de la mesure (qui constitue une

indication des fluctuations aléatoires de l'échantillonnage) est de 92,7 %. Ce haut pourcentage révèle que les 32 cas examinés ne sont pas suffisamment représentatifs pour tirer une véritable conclusion.

3.2.3 Analyse de sensibilité

Afin de mesurer l'effet de chacun des paramètres sur la réponse en temps, une analyse de sensibilité a été réalisée suivant le même cas que précédemment : phytoextraction du cadmium par le cultivar de saule *Salix purpurea* 'Fish Creek'. Il s'agit d'un cas fictif, présenté au tableau 3.2 de la page suivante. Les valeurs ont été attribuées de manière à représenter un cas réaliste au Québec. Les variables ont été modifiées une à la fois pour donner lieu à six scénarios différents. Ceci a été effectué dans le but de cibler et d'illustrer l'impact de chaque paramètre. Dans le tableau 3.2, un graphique associé à chacun des scénarios montre l'effet du paramètre modifié sur le temps de phytoextraction du cadmium par le *Salix purpurea* 'Fish Creek'. L'analyse de sensibilité a permis d'observer que :

Scénario 1

Plus le sol est contaminé en cadmium initialement, plus les saules mettront du temps à le réhabiliter. La concentration de la contamination en éléments traces détermine la quantité de polluants à retirer du sol. Il s'agit d'un facteur qui affecte de façon linéaire, le temps de phytoextraction.

Scénario 2

La profondeur de la contamination affecte également de façon linéaire le nombre d'années à prévoir pour la phytoextraction, car elle spécifie le volume de sol à traiter.

Scénario 3

La superficie n'affecte pas le temps de phytoextraction des saules étant donné que le nombre de plants est fixé en fonction de l'étendue du site.

Scénario 4

Les degrés-jours de croissance ont clairement un effet sur la technologie. A priori, les saules situés plus au nord du Québec performant moins bien que ceux implantés dans

la grande région de Montréal, où la température est plus clémente. Le temps de phytoextraction du cadmium par les saules, affecté par la diminution du nombre de degrés-jours, tend à être exponentiel comme l'illustre le graphique du scénario 4.

Scénario 5

La masse volumique du sol affecte linéairement le temps de phytoextraction, car elle détermine la quantité de contaminants à retirer.

Scénario 6

Le pH du sol, lorsqu'il dépasse 5,5, augmente le temps de phytoextraction du cadmium par les saules. Toutefois, l'augmentation est faible. À un pH de 7,5, le résultat n'est que de deux ans et demi de plus qu'à un pH de 5,5.

Tableau 3.2 Analyse de sensibilité

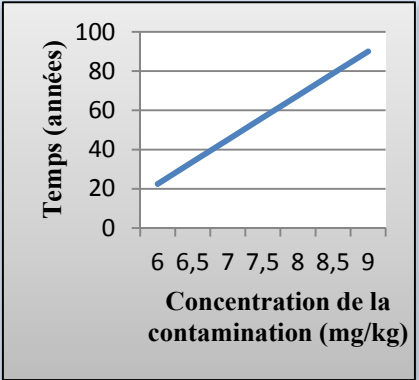
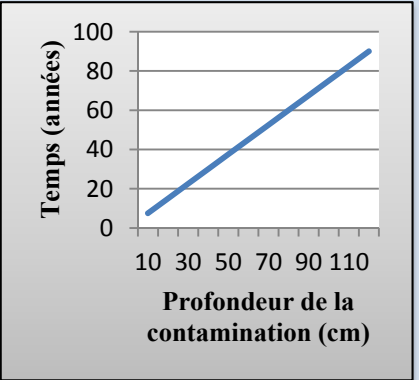
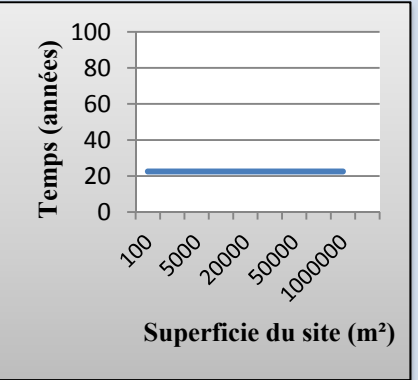
| | Scénario 1 | Scénario 2 | Scénario 3 |
|--|--|---|---|
| Contaminant | Cadmium | Cadmium | Cadmium |
| Concentration au départ | VARIABLE | 6 mg/kg | 6 mg/kg |
| Critère à atteindre | B | B | B |
| Profondeur de la contamination | 30 cm | VARIABLE | 30 cm |
| Superficie du site | 10 000 m ² | 10 000 m ² | VARIABLE |
| Secteur géologique | Basses-Terres du Saint-Laurent | Basses-Terres du Saint-Laurent | Basses-Terres du Saint-Laurent |
| Potentiel de croissance | 1800 degrés jours | 1800 degrés jours | 1800 degrés jours |
| Masse volumique du sol | 1500 kg/m ³ | 1500 kg/m ³ | 1500 kg/m ³ |
| pH du sol | 5,5 | 5,5 | 5,5 |
| Graphique de réponse en temps pour la phytoremédiation |  <p>Temps (années)</p> <p>Concentration de la contamination (mg/kg)</p> |  <p>Temps (années)</p> <p>Profondeur de la contamination (cm)</p> |  <p>Temps (années)</p> <p>Superficie du site (m²)</p> |

Tableau 3.2 Suite

| | Scénario 4 | Scénario 5 | Scénario 6 |
|--|--|--|--|
| Contaminant | Cadmium | Cadmium | Cadmium |
| Concentration au départ | 6 mg/kg | 6 mg/kg | 6 mg/kg |
| Critère à atteindre | B | B | B |
| Profondeur de la contamination | 30 cm | 30 cm | 30 cm |
| Superficie du site | 10 000 m ² | 10 000 m ² | 10 000 m ² |
| Secteur géologique | Basses-Terres du Saint-Laurent | Basses-Terres du Saint-Laurent | Basses-Terres du Saint-Laurent |
| Potentiel de croissance | VARIABLE | 1800 degrés jours | 1800 degrés jours |
| Masse volumique du sol | 1500 kg/m ³ | VARIABLE | 1500 kg/m ³ |
| pH du sol | 5,5 | 5,5 | VARIABLE |
| Graphique de réponse en temps pour la phytoremédiation | <p>Temps (années)</p> <p>Climat (degrés-jours)</p> | <p>Temps (années)</p> <p>Densité du sol (kg/m³)</p> | <p>Temps (années)</p> <p>pH du sol</p> |

3.3 Planification des coûts

Dans la planification de projet de phytoremédiation, les coûts à prévoir sont au cœur du processus de décision. À l'instar du temps de phytoextraction, les coûts sont affectés par de nombreux paramètres. Dans le cadre de cette recherche, l'objectif était de faciliter la planification des dépenses à encourir en orientant le décideur et lui pointant les dépenses courantes relatives à la phytoremédiation. Les coûts fixes ont été établis en fonction des étapes à suivre pour la réalisation d'un projet de phytoremédiation. De plus, une analyse a été menée spécifiquement pour deux éléments, lesquels affectent les coûts. Ensuite, un tableau du budget à prévoir a été élaboré afin de servir d'exemple des dépenses reliées à un projet de type phytoextraction et afin d'appuyer le décideur dans sa réflexion.

La planification des coûts a été réalisée suivant un cas précis, déterminé précédemment par les limites conceptuelles du projet : phytoextraction d'un sol contaminé au cadmium par le cultivar de saule *Salix purpurea* 'Fish Creek'.

3.3.1 Paramètres d'affectation des coûts

En phytoremédiation, la prévision des coûts doit tenir compte de plusieurs facteurs. Alors, l'évaluation initiale du site contaminé doit être faite de façon à prendre en considération les paramètres pouvant influencer les coûts de traitement, et/ou les spécifications du site nécessitant des opérations supplémentaires. Pour l'outil d'aide à la décision développé dans le cadre de ce projet, l'exercice a été réalisé pour le pH et le type de sol, à savoir comment ils affectent les coûts.

3.3.1.1 pH du sol

Le pH influe sur les coûts dans le sens où il peut nécessiter une fertilisation du sol. D'après les pratiques observées sur les sites expérimentaux et d'après la littérature, une plage de valeurs a été définie. L'outil a été conçu pour accepter un pH du sol entre 5,0 et 9,0. Il a été

convenu qu'en dehors de ces valeurs, la croissance des végétaux est trop altérée et donc, la phytoremédiation n'est pas une avenue envisageable pour la réhabilitation du site.

Considérant que la plage de valeurs acceptables pour les saules couramment utilisés en phytoremédiation se situe à un pH de sol entre 5,5 et 7,5, il demeure un écart. Ainsi, lorsque le pH du sol est entre 5,0 et 5,5, ou encore entre 7,5 et 9,0, il a été décidé que l'outil impose un amendement pour ajuster le pH (figure 3.15). Cette opération supplémentaire s'ajoute aux coûts du projet. Ainsi, le pH du sol est un paramètre auquel il est nécessaire de porter une attention du point de vue financier, car il peut engendrer une dépense additionnelle au projet de phytoremédiation.

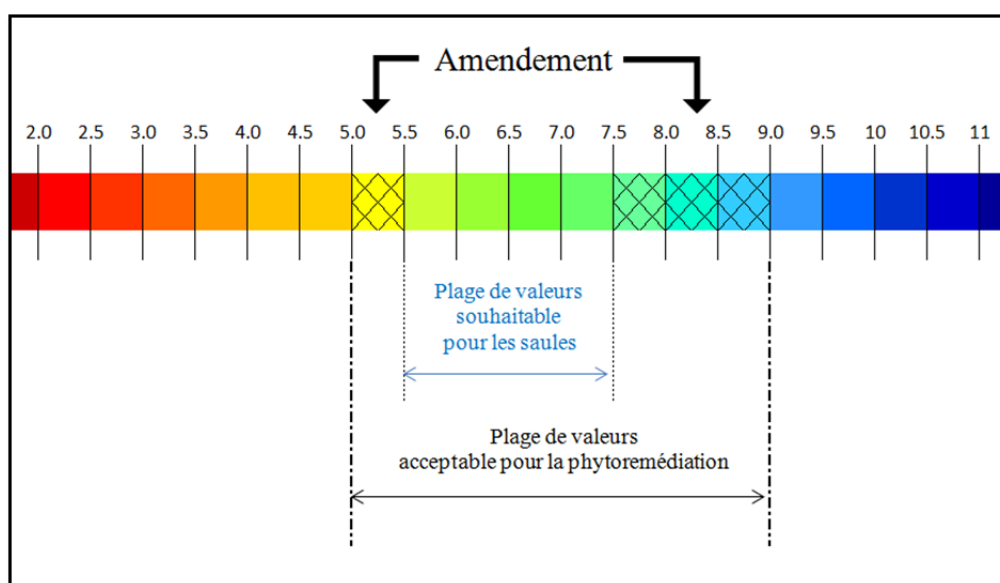


Figure 3.16 Amendement imposé par l'outil pour certaines valeurs de pH du sol

3.3.1.2 Type de sol

Selon la littérature et en fonction des sites expérimentaux étudiés, les sites contaminés sont pour la plupart près des centres urbains. Par conséquent, les premiers mètres de sols s'avèrent être du remblai. Les remblais sont composés majoritairement de débris grossiers tels que fragments de roches, matériaux de construction et scories (Nze Memiaghe, 2012). Ces matériaux dans le sol limitent l'enracinement des végétaux et la faible teneur en matière

organique contrevient à la croissance des plantes. Une solution a été élaborée pour le bon fonctionnement de la phytoremédiation : amender le sol en matière organique. L'intervention consiste à ajouter quelques centimètres de terreau sur toute l'étendue du site au début du projet. Ainsi, dans les cas où le sol est un remblai, l'amendement du sol en matière organique est une étape imposée par l'outil d'aide à la décision pour favoriser la croissance des végétaux et de ce fait, l'efficacité de la technologie.

À l'inverse, certains sols présentent des conditions très favorables aux plantes et la végétation envahit l'espace. Le désherbage est alors une étape essentielle étant donné que les plantes utilisées en phytoremédiation sont considérées comme des « appareils technologiques » et qu'elles doivent être dégagées de tout obstacle. En ce sens, l'outil d'aide à la décision a été conçu avec une option permettant d'ajouter l'étape du désherbage.

Ainsi, le type de sol constitue un paramètre ayant une incidence sur les coûts et devant faire partie intégrante de l'évaluation du site contaminé.

3.3.2 Sommaire des coûts prévus

La phytoremédiation engendre des coûts de démarrage et des coûts d'entretien annuels. En se référant aux étapes d'un projet type, énoncées au chapitre précédant, et en incluant les paramètres d'affectation énoncés dans les sections 3.3.1.1 et 3.3.1.2, un tableau des dépenses a été élaboré à la figure 3.16. Ces valeurs donnent un aperçu des coûts liés à un projet de phytoremédiation échelonné sur plusieurs années.

BUDGET
DÉTAIL DES DÉPENSES

| DESCRIPTION | QUANTITÉ | COÛT UNITAIRE | COÛTS |
|--|------------------------|---------------|---------------------|
| Coûts de départ | | | |
| Achat des boutures ou des semences | 20000 boutures | 0.15 \$ | 3000.00 \$ |
| Préparation du terrain incluant : enlèvement de débris, labourage de la terre, désherbage et délimitation des parcelles et/ou des rangs | 1 ha | 2300 \$ | 2300.00 \$ |
| Amendement du sol en matière organique * | 1 ha | 1000 \$ | 1000.00 \$ |
| Achat et installation d'une clôture | 600 m | 100 \$ | 60000.00 \$ |
| * L'amendement en matière organique est obligatoire pour les sols anthropiques. | | | |
| Sous-total 1 : | | | 66 300.00 \$ |
| Coûts annuels | | | |
| | Nombre d'années | | |
| Désherbage | 2 ans | 1 ha | 125 \$ |
| Amendement du sol * | 2 ans | 1 ha | 125 \$ |
| Récolte de la biomasse | 24 ans | 1 ha | 1000 \$ |
| * L'amendement est obligatoire pour les sols dont le pH est plus bas que 5.0 ou plus élevé que 7.5. | | | |
| Sous-total 2 : | | | 24 500.00 \$ |
| GRAND TOTAL : | | | 90 800.00 \$ |

◀ ▶ Fermer

Figure 3.17 Détail des dépenses pour la planification d'un projet de phytoextraction

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Les outils d'aide à la décision sont hautement demandés lorsqu'ils facilitent l'évaluation de la contamination et l'évaluation de la faisabilité technique de la méthode (Pollard *et al.*, 2004). Dans le cadre de ce projet de recherche, l'outil a été développé en fonction de ces deux lignes directrices. De plus, il a été réalisé de manière à présenter les informations pertinentes selon les faits et les connaissances. Ainsi, l'utilisateur prend une décision en connaissance de cause selon ses moyens et en fonction de ses besoins.

Le chapitre qui suit présente les contributions de la recherche relativement à l'objectif principal et aux deux sous-objectifs, soit l'aide à la décision, l'estimation du temps et la planification des coûts. Ensuite, les limites du projet sont présentées et des recommandations quant aux versions futures de l'outil d'aide à la décision sont proposées.

4.1 Contributions de la recherche

L'outil développé dans le cadre de ce projet de recherche a démontré que les connaissances acquises en phytoremédiation permettent d'identifier et de définir les interactions principales du système sol-contaminants-plantes. Il a aussi été montré qu'il est possible d'estimer l'efficacité et les coûts de la technologie en prévoyant le temps pour atteindre un critère réglementaire donné et en facilitant la préparation du budget.

4.1.1 Aide à la décision

L'outil développé dans le cadre de ce projet a rempli la fonction d'aide à la décision sous trois aspects, soit en illustrant le problème, en informant l'utilisateur et en pointant les données à recueillir.

Premièrement, l'interface a été conçue pour illustrer le contexte de la phytoremédiation en lien avec le problème de contamination du site. L'image en plein centre de la page principale

a été placée dans le but de mettre en lumière les deux éléments clés, soit le sol et la plante (figure 3.1). Ainsi, la complexité du processus de phytoremédiation est simplifiée. De plus, les onglets du bas ont été créés pour indiquer à l'utilisateur les différentes sphères à considérer à savoir la caractérisation de la contamination, les valeurs réglementaires, les spécifications du site et les propriétés du sol (figure 3.2 à 3.6). Le décideur et les différentes parties prenantes sont ainsi amenés à prendre conscience du contexte du site à réhabiliter. Selon Sorvari *et al.* (2009), cet aspect visuel et synthétique des outils d'aide à la décision est bénéfique, car il vulgarise la problématique, révèle les éléments les plus importants, et ce de fait, facilite la participation du public. Ainsi, l'apport des différentes parties prenantes contribue au processus d'amélioration continue.

Deuxièmement, l'outil a été développé de manière à informer l'utilisateur. Geng *et al.* (2001) font remarquer que les décideurs simplifient souvent la problématique des sols contaminés et orientent la solution vers une technique de réhabilitation qu'ils connaissent bien, l'excavation et l'enfouissement. Ce comportement est dû à un manque de connaissance et de considération des éléments contextuels. La phytoremédiation implique de nombreux paramètres en interrelation et il peut être ardu de connaître chacun des éléments dans la dynamique du système. Dans le cadre de cette maîtrise, des efforts ont été déployés pour fournir un outil d'aide à la décision comprenant de l'information à jour et de source sûre, relative aux divers sujets traités tels que la réglementation et les données climatiques statistiques. Ainsi, la grille de critères génériques des sols, la carte des degrés-jours de croissance, la carte des cinq secteurs géologiques du Québec et le triangle des textures de sol ont été intégrés à l'outil en tant que source de référence et d'information.

Troisièmement, Onwubuya *et al.* (2009) soutiennent que l'identification des diverses données nécessaires à l'évaluation du site contaminé et à la faisabilité de la méthode de réhabilitation est une étape importante en termes d'aide à la décision. Pour cette raison, dans le cadre de ce projet, l'outil a été conçu de façon à pointer à l'utilisateur les données dont il a besoin pour prendre une décision éclairée. L'élaboration de fiches orientées-objet a permis l'incorporation de cet aspect. Les champs d'entrée apparaissant à l'interface ont été placés stratégiquement par catégories (voir les onglets aux figures 3.2 à 3.5) pour que l'utilisateur

saisisse quelles sont les données qui ont du poids, et ce, dans quelle dimension du projet. Selon Sorvari *et al.* (2010), cet exercice est profitable, car il donne lieu à des échanges plus faciles et une meilleure communication entre les différentes parties prenantes.

En plus d'aider la prise de décision, l'outil a révélé d'autres usages possibles en cours de projet : le support à la formation et l'aide à la communication. Avec une approche systémique et dans une optique de vulgarisation du contexte, l'outil est utile aux diverses parties prenantes qui connaissent peu la phytoremédiation et ses différents mécanismes. L'information est présentée de façon concise, par fiches, tout en soulevant les avantages et les inconvénients avec transparence, tel que suggéré par Bardos *et al.* (2002). De plus, les unités de mesure de chacun des paramètres ont été uniformisées de façon à soutenir les échanges entre les différents groupes. Ainsi, l'outil d'aide à la décision créé dans le cadre de cette recherche accompagne le décideur ainsi que toutes les parties prenantes, pas à pas, dans l'évaluation du site contaminé et dans l'évaluation de la phytoremédiation en tant que méthode de réhabilitation, mais il sert également d'outil de formation et il amène une nouvelle dimension à la communication.

4.1.2 Estimation du temps

L'estimation du temps de phytoremédiation a été calculée par l'outil d'aide à la décision pour chacun des 32 échantillons du site de Valcartier ayant servi comme étude de cas. Le trop peu de données et l'erreur type de 92,7 % n'ont pas permis de tirer une véritable conclusion.

Toutefois, il est possible de faire une observation quant aux résultats : la moyenne des temps, 5,86 années, révèle que les prévisions de l'outil sont plutôt au-dessus du temps réel de 3 ans. Cette valeur est certes supérieure à la valeur réelle, mais pas de façon exagérée considérant que la phytoremédiation est dépendante de nombreux paramètres en interrelation. Cette surestimation du temps peut être due à différents facteurs ou plusieurs facteurs combinés :

- Robinson *et al.* (2003) affirment que la phytoremédiation est particulièrement spécifique aux conditions du site. Il se pourrait que le sol de Valcartier possède des

propriétés, autres que le pH du sol, qui soient particulièrement propices aux plantes et/ou à l'accumulation du cadmium dans les tissus végétaux;

- Les coefficients d'affectation du pH et des degrés-jours ont peut-être été surestimés. De cette façon, il est possible qu'ils affectent exagérément la durée de la phytoremédiation, ce qui donne un aperçu erroné des temps prévus pour la phytoextraction du cadmium au site de Valcartier;
- Il se pourrait que d'autres phénomènes environnants aient créé des divergences dans le processus de phytoremédiation. Des conditions climatiques telles que les précipitations, le vent, la température, au-dessus des normales de saison peuvent affecter significativement la croissance des plantes et par conséquent, la technologie.

En ce qui concerne l'analyse de sensibilité, l'exercice a permis de mettre en lumière les paramètres ayant la plus forte incidence sur le temps de phytoremédiation : la concentration de la contamination et la profondeur de la contamination. Ces deux facteurs déterminent la masse de contaminants à retirer du sol par les plantes. Par conséquent, ils dictent le nombre d'années de réhabilitation. Ainsi, il est important d'évaluer l'ampleur de la contamination dans le sol préalablement au choix de la méthode d'assainissement. D'ailleurs, c'est pour cette raison que l'outil a été conçu relativement aux données généralement recueillies et aux unités de mesure utilisées lors d'une caractérisation environnementale de site. L'analyse de sensibilité a également mis en évidence le paramètre n'ayant aucun impact sur le temps de phytoremédiation : la superficie du site. La grandeur du terrain n'affecte pas le processus des plantes, mais plutôt l'étendue des travaux. Quant aux degrés-jours de croissance, ils ont une incidence sur l'efficacité de la technologie, car ils conditionnent le développement des plantes, lesquelles agissent en tant « qu'appareil technologique ». Puisqu'il est connu que les saules préfèrent la chaleur, la localisation géographique du site en termes de latitude est à prendre en considération dans l'évaluation initiale. La masse volumique du sol a aussi un impact sur le temps de phytoremédiation d'un site. Enfin, le pH du sol influence légèrement le temps de phytoremédiation parce qu'il agit sur la fraction soluble des polluants. Dans le cadre de cette recherche, les valeurs de pH acceptées se situent entre 5,5 et 7,5. Ainsi, les variations dans le temps relatives à ce facteur sont minimales, mais il est tout de même intéressant de les souligner.

4.1.3 Planification des coûts

Selon Geng *et al.* (2001), les traitements *in situ* ont acquis de la popularité dans les dernières années parce qu'ils sont avantageux d'un point de vue économique. La phytoremédiation fait partie de cette catégorie. Ainsi dans le cadre de ce mémoire, il était essentiel d'aborder la question des coûts. Un sommaire des opérations a été établi en tenant compte de trois grandes étapes de la phytoremédiation : la préparation du terrain, l'implantation de la technologie et l'entretien. Ainsi, un exemple de planification des coûts a été montré. De plus, une analyse a été effectuée pour deux paramètres, soit le pH du substrat et le type de sol. Cette analyse a montré comment chacun des paramètres devrait être étudié relativement à leur influence sur la technologie et à leur impact sur les coûts.

4.2 Limites et recommandations

Le but ultime de ce projet était d'aider les décideurs dans l'évaluation d'un site contaminé et dans le choix d'une méthode de réhabilitation *in situ*, la phytoremédiation. Ce projet a permis également de montrer le potentiel d'un outil d'aide à la décision adapté au contexte québécois. L'outil a été développé suivant un cas type comprenant des conditions précises, soit la phytoremédiation d'un site contaminé au cadmium par le cultivar de saule *Salix purpurea* 'Fish Creek'. Par conséquent, l'outil d'aide à la décision créé dans le cadre de cette recherche est fonctionnel, mais pour un seul cas. En outre, les données de sortie, soit l'estimation du temps et la planification des coûts ont été réalisées de façon à prendre en considération certains éléments, mais il demeure que la précision de l'estimation du temps pourrait être améliorée et la planification des coûts, plus élaborée.

L'outil d'aide à la décision a été réalisé suivant un seul cas. Il traite précisément de la contamination inorganique et plus spécifiquement, du cadmium. Ce faisant, il est extrêmement limité. Les sites présentent généralement une contamination mixte. D'ailleurs, selon Norini (2007), « le devenir d'un polluant est influencé par la présence d'autres polluants ». Ainsi, l'outil devrait, dans une prochaine version, contenir l'information pour

tous les contaminants, de manière à ce que l'aide à la décision, la prévision du temps et la planification des coûts puissent considérer une contamination mixte.

Dans un même ordre d'idée, l'outil devrait, dans une prochaine version, permettre l'utilisation de plusieurs plantes et de l'activité microbienne dans le sol. La phytoremédiation utilise parfois plusieurs espèces de plantes différentes. Celles-ci ont chacune leurs capacités et leur tolérance propres et sur certains aspects, elles peuvent être complémentaires selon Huang *et al.* (2004). De plus, une combinaison de la phytoremédiation avec la remédiation microbienne peut améliorer le processus et contrevenir aux limitations de chacun des techniques. Les saules *Salix purpurea* 'Fish Creek' ont fait l'objet de cette étude pour les calculs d'estimation du temps et pour la planification des coûts. Pour une prochaine version de l'outil d'aide à la décision, il serait intéressant d'offrir la possibilité de combiner quelques plantes ainsi que l'activité des bactéries du sol pour une plus grande flexibilité dans la réhabilitation des terrains contaminés soumis.

Selon Pollard *et al.* (2004), les outils d'aide à la décision sont hautement recherchés lorsqu'ils tiennent compte notamment des préoccupations environnementales. Dans ce cas-ci, l'aspect environnemental a été pris en considération en indiquant les valeurs normatives à respecter. Par contre, un travail plus approfondi pourrait être mené. Un système de codification pourrait être établi afin de noter la phytoremédiation relativement aux avantages qu'elle présente en termes de respect de l'environnement. Éventuellement, ce pointage pourrait être utilisé pour une comparaison de la phytoremédiation avec d'autres méthodes de réhabilitation de sites contaminés.

Cundy *et al.* (2013) suggèrent la satisfaction de toutes les parties prenantes comme facteur clé de l'aide à la décision. Lors d'une étude future, il serait intéressant de sonder ces parties prenantes (propriétaires de sites, groupes de pression, autorités gouvernementales, etc.) afin d'obtenir leur avis sur l'outil d'aide à la décision développé. Ce faisant, les commentaires reçus pourraient permettre l'amélioration de l'outil dans le cadre de sa fonction principale : l'aide à la décision.

4.2.1 Travail préliminaire aux prochaines versions de l'outil

L'outil comporte plusieurs limitations. Toutefois, les limitations principales ont été anticipées et un certain travail préliminaire a été fait pour montrer l'intégration des différentes notions acquises et de manière à faciliter les prochaines versions de l'outil :

- L'outil a été conçu pour l'aide à la décision d'une seule technique, la phytoextraction agissant sur les contaminants inorganiques. Toutefois, la figure 4.1 montre que l'outil prévoit aussi le traitement des contaminants organiques. Dans le cadre de l'étude de cas de la section 3.2.2, ceux-ci ne sont pas pris en compte, car les calculs associés à la phytodégradation n'ont pas été élaborés.

| Inorganique | | | | Organique | | | |
|-------------|--------------|---------------|---------|-----------|------------------------------|---------------|---------|
| No | Contaminant | Concentration | Critère | No | Contaminant | Concentration | Critère |
| No1: | Cadmium (Cd) | 7 mg/kg | B - C | No1: | Résidus pétroliers (C10-C50) | 345 mg/kg | A - B |
| No2: | Zinc (Zn) | 134 mg/kg | A - B | No2: | BPC Congénères | 2 mg/kg | B - C |
| No3: | Plomb (Pb) | 53 mg/kg | A - B | No3: | Fluoranthène | 5 mg/kg | A - B |

Figure 4.1 Onglet « Contamination » de la fiche du site contaminé

- L'onglet « Contamination » de la fiche du site contaminé comprend tous les contaminants réglementés par le ministère indiqués dans la grille des critères génériques pour les sols et non pas juste le cadmium. Les polluants ont été compartimentés dans une section à gauche pour les inorganiques et une section à droite pour les organiques (figure 4.1). Un total de trois contaminants pour chacune des sections a été imposé parce que les sites à réhabiliter sont souvent visés par les trois contaminants majoritaires. Les menus déroulants permettent de choisir parmi la liste des polluants (figure 4.2) et de façon automatique, la plage de contamination apparaît en fonction de la concentration du contaminant (par exemple : A – B). Ainsi, lorsque chacun des facteurs de bioaccumulation des contaminants sera connu pour chacune des plantes, les valeurs n'auront qu'à être ajoutées à la programmation. Il en

sera de même pour les facteurs de biodégradation dans le cas des contaminants organiques.

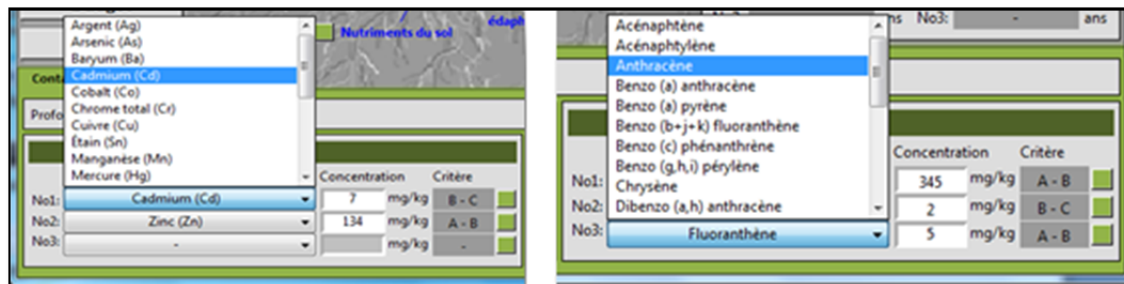


Figure 4.2 Menus déroulants pour le choix des trois contaminants majoritaires

- Un répertoire des végétaux utilisés en phytoremédiation a été créé de manière à montrer que l'outil pourrait éventuellement contenir de nouvelles fiches de plantes. Par exemple, les figures 4.3 et 4.4 illustrent respectivement la fiche du peuplier et la fiche du tournesol. Les valeurs sont inconnues, mais comme les données nécessaires aux calculs de temps et des coûts ont été identifiées, les fiches ont tout de même pu être créées. De cette façon, lorsque ces données seront connues, il suffira de les entrer dans le système.

Répertoire des végétaux

Peuplier

Populus

Choisir cette plante ☐

Informations générales et spécifiques

Plante pérenne, arbre

Coût unitaire d'une bouture : 0 \$

Masse sèche : 0 kg/plante

Capacité de concentration maximale dans les tissus :

| Inorganique | |
|--------------|---------|
| Cadmium (Cd) | 0 mg/kg |
| Zinc (Zn) | 0 mg/kg |
| Cuivre (Cu) | 0 mg/kg |

Densité de plantation : plantes/ha

Récolte : aux 3 ans

Capacité de dégradation maximale dans le sol :

| Organique | |
|------------------------------|-----|
| Résidus pétroliers (C10-C50) | 0 % |
| BPC Congénères | 0 % |
| Fluoranthène | 0 % |

Fermer

Figure 4.3 Fiche du peuplier

Répertoire des végétaux

Tournesol

Helianthus

Choisir cette plante ☐

Informations générales et spécifiques

Plante annuelle, herbacée

Coût unitaire d'un paquet de semences : 0 \$

Masse sèche : 0 kg/plante

Capacité de concentration maximale dans les tissus :

| Inorganique | |
|--------------|---------|
| Cadmium (Cd) | 0 mg/kg |
| Zinc (Zn) | 0 mg/kg |
| Cuivre (Cu) | 0 mg/kg |

Densité de plantation : plantes/ha

Récolte : annuelle

Capacité de dégradation maximale dans le sol :

| Organique | |
|------------------------------|-----|
| Résidus pétroliers (C10-C50) | 0 % |
| BPC Congénères | 0 % |
| Fluoranthène | 0 % |

Fermer

Figure 4.4 Fiche du tournesol

- Une certaine flexibilité dans le calcul des coûts d'opération a été prévue : l'utilisateur a le choix des interventions à effectuer. Comme le montre la figure 4.5, l'outil

propose quelques opérations usuelles de la phytoremédiation avec des cases à cocher. La planification des coûts prend en considération les opérations ayant été cochées « oui ». Ainsi, pour les prochaines versions de l'outil, les opérations supplémentaires n'auront qu'à être ajoutées à cette section de l'interface et les coûts, dans la programmation.

Veuillez indiquer les opérations que vous désirez effectuer en cochant la case appropriée.

| | | | |
|---|--|--|--|
| 1) Préparation du terrain : | <input checked="" type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non | <input type="checkbox"/> 3) Fertilisation du sol : | <input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non |
| S'agit-il d'un remblai ? | <input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non | | |
| 2) Amendement du sol en matière organique : | <input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non | 4) Désherbage du sol : | <input checked="" type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non |

Figure 4.5 Choix d'option des différentes options à effectuer

4.2.2 Calculs d'estimation du temps

Les calculs d'estimation du temps ont été élaborés relativement au bilan massique et considérant deux paramètres externes influents sur le processus de phytoextraction du cadmium par les saules (cultivar *Salix purpurea* 'Fish Creek'). Ces calculs sont limitatifs : ils constituent une ébauche et sont caractéristiques à un seul cas.

Pour une prochaine version de l'outil d'aide à la décision, il serait intéressant de tester l'outil avec d'autres données que ceux du site Valcartier. Ces données devraient être choisies sur plusieurs terrains différents de manière à ce que les spécifications de chacun des sites soient exclues de la comparaison des prévisions de l'outil avec les temps réels. Ainsi, il deviendrait possible de tirer une conclusion quant à la précision des calculs d'estimation du temps élaborés dans le cadre de ce projet. Parallèlement, une étude pourrait être menée à savoir si les valeurs des coefficients d'affectation pourraient être précisées. L'objectif consisterait à refléter encore mieux la réalité. L'étude devrait donc porter plus en détail sur les droites de régression qui ont été établies. Il faudrait déterminer si elles devraient demeurer linéaires ou si elles devraient plutôt être logarithmiques, exponentielles, etc.

De plus, il serait intéressant d'intégrer à l'équation du temps d'autres paramètres influençant la technologie. En plus d'améliorer la précision des calculs, l'étude de chacun des paramètres supporterait certainement l'analyse de risques, une étape très importante en réhabilitation de sites contaminés selon Cundy *et al.* (2013). Néanmoins, il faudrait conserver l'aspect simpliste de l'outil d'aide à la décision et éviter d'ajouter trop de facteurs. Il est important d'incorporer aux calculs les éléments ayant le plus d'influence sur les plantes et ceux ayant une incidence significative sur les résultats. Tel que suggéré par Robinson (2014), il faut d'une part éviter d'imposer à l'utilisateur une collecte de données exhaustive et d'autre part, empêcher que l'outil ne devienne trop difficile à paramétrer.

Le prochain paramètre à intégrer aux calculs devrait être la présence de fragments de roches et de débris dans le sol. D'une part, les éléments grossiers du sol sont des obstacles au développement du système racinaire des plantes. Ainsi, ils peuvent avoir un effet marqué sur la technologie. D'autre part, lors des analyses en laboratoires, les échantillons de sol sont examinés sans les fragments de roches et de débris. Ceux-ci sont retirés avant les tests et donc, seules les particules fines (inférieures à 2 mm de diamètre) sont soumises aux analyses. Ainsi, les calculs devraient considérer cet aspect et la masse volumique du sol devrait être ajustée en conséquence. L'incorporation de ce paramètre et des suivants, pourraient se faire de la même façon que celle présentée dans le cadre de cette étude, soit par coefficients d'affectation. Ils constituent un moyen pratique, car ils peuvent être calibrés au fil du temps ce qui facilite les ajustements dans les calculs.

Enfin, les calculs d'estimation du temps devraient être élaborés pour d'autres techniques de la phytoremédiation, telles que la phytodégradation. De cette façon, l'outil deviendrait utile pour l'évaluation des sols présentant une contamination tant inorganique qu'organique.

4.2.3 Aspect économique

La planification des coûts liés à la phytoremédiation a été facilitée suivant un exemple du détail des dépenses approximatives, présenté à la figure 3.16 au chapitre des résultats. Cependant, cette proposition donne un aperçu des dépenses à encourir selon une vision très

étroite. Pour une prochaine version de l'outil d'aide à la décision, la prévision des coûts devrait être réalisée avec beaucoup plus de finesse et de précision.

D'abord, le calcul des dépenses devrait être effectué de façon beaucoup plus définie en considérant le détail des coûts de chacune des interventions. Pour ce faire, une élaboration plus détaillée de la planification du projet permettrait :

- une meilleure définition de la charge de travail;
- une meilleure prévision des besoins en main-d'œuvre et en équipements;
- une estimation plus juste des coûts fixes et variables tels que les salaires, l'achat des biens et matériaux, le transport, etc.

Ainsi, la rentabilité du projet pourrait être mieux estimée. De manière à concevoir un outil flexible, ces coûts devraient faire l'objet de champs d'entrée d'une nouvelle fiche. De cette façon, les coûts d'opération, les taux horaires, les prix des biens et matériaux, les coûts de transport et d'entretien seraient déterminés en fonction des partenaires, sous-traitants, fournisseurs et employés choisis par les décideurs. De plus, comme la phytoremédiation est une méthode qui prend du temps, l'estimation des coûts devrait prendre en compte le taux d'inflation pour les coûts d'entretien qui s'échelonnent sur plusieurs années.

Ensuite, l'analyse des paramètres affectant la phytoremédiation et nécessitant des opérations supplémentaires a été exécutée pour le pH du sol et le type de substrat. Dans le futur, il pourrait être intéressant d'effectuer cette même analyse plus en profondeur et pour une plus grande diversité de paramètres afin de prévoir les coûts tenant compte davantage des spécifications du site tel que suggéré par Robinson *et al.* (2003).

Enfin, l'outil d'aide à la décision créé dans le cadre de cette recherche calcule les coûts d'achat, d'opérations et d'entretien afin de donner un aperçu du montant total à prévoir. Toutefois, la phytoremédiation comporte plusieurs bénéfices qui nécessiteraient d'être pris en compte tels que la préservation du milieu naturel, la production de biomasse, la possibilité de réintégrer les éléments traces recueillis par les plantes dans la chaîne industrielle, etc. Lewandowski *et al.* (2006) expriment la valeur économique de la phytoremédiation en

effectuant une analyse des coûts versus les bénéfices. Un exercice semblable, intégré à l'outil d'aide à la décision, permettrait d'avoir une meilleure vue d'ensemble de la phytoremédiation. Ainsi, les décideurs seraient en mesure d'évaluer d'une part la rentabilité de la méthode et d'autre part, les autres avantages pouvant également amener des profits.

CONCLUSION

Les projets de réhabilitation par phytoremédiation sont des projets complexes pour les décideurs, ce qui rend la prise de décision difficile. En effet, d'une part, en raison de la complexité inhérente à la technologie, le nombre considérable de paramètres à prendre en considération et la dynamique évolutive entre tous les éléments impliqués dans le processus font qu'il est difficile d'effectuer une évaluation juste d'un site à réhabiliter par phytoremédiation. Le manque de connaissances rend donc la décision difficile à prendre. D'autre part, à la complexité de la technologie s'ajoute la complexité du contexte de prise de décision : les projets de réhabilitation par phytoremédiation impliquent souvent différentes parties prenantes, lesquelles n'ont pas toutes les mêmes idées, notions et compréhension du projet. Le processus de décision s'en trouve encore une fois affecté. En raison de cette double complexité, la phytoremédiation est une avenue écartée par les décideurs, ou si elle est choisie, des erreurs sont souvent commises.

Pour répondre à cette problématique, ce projet de maîtrise avait pour objectif principal la création d'un outil d'aide à la décision pour des projets de phytoremédiation. Les critères de conception visaient deux aspects : l'estimation en temps d'un projet de phytoremédiation pour atteindre un critère générique donné et la facilitation de la planification des coûts. Pour une première version de l'outil, les travaux ont été réalisés dans un cadre dont les limites se résument au contexte québécois (réglementation, climat, type de sol, etc.), à une seule technique, la phytoextraction, à un seul contaminant, le cadmium et à un seul cultivar de saule, le *Salix purpurea* 'Fish Creek'. Une fois l'outil d'aide à la décision créé, il s'agissait aussi d'en montrer la pertinence et le potentiel.

Après avoir effectué des recherches dans la littérature et mené des discussions avec les experts, le schéma du système de la phytoremédiation a été élaboré, suivant l'approche systémique. Cet exercice a permis de rendre compte de la globalité du système dynamique de la phytoremédiation. De plus, les paramètres les plus influents et les principaux liens entre les éléments à considérer dans l'évaluation du site contaminé ont été relevés. À partir de ses notions, des limites ont été fixées et des fiches ont été élaborées de manière à structurer les

informations en deux catégories : la plante et le site contaminé. Ces fiches ont servi de base conceptuelle à la création de l'outil d'aide à la décision. En mettant en évidence les données nécessaires aux calculs d'estimation de temps et à la planification des coûts, elles ont également contribué à la formulation de l'algorithme. Parallèlement au travail effectué avec les spécialistes, la participation et le suivi de deux projets de phytoremédiation (Monsabré et Golder) ont suscité la réflexion quant au contexte d'application de la technologie. Les paramètres ayant la plus grande influence ont fait l'objet d'une évaluation, laquelle a permis de quantifier l'affectation de chacun de ces facteurs sur le temps et/ou sur les coûts du projet.

Le travail effectué en amont et les connaissances acquises en phytoremédiation jusqu'à ce jour ont permis la création d'un outil d'aide à la décision. L'outil a été développé suivant les deux facteurs clés de l'aide à la décision, soit le temps et l'argent :

1. L'équation mathématique permettant d'estimer le temps de phytoremédiation a été développée d'après un bilan de masse. Afin de refléter le mieux possible la réalité, des coefficients d'affectation ont été intégrés aux calculs relativement aux paramètres les plus influents sur la technologie, soit les degrés-jours de croissance et le pH du sol. Les résultats de cette estimation du temps ont été comparés avec des données réelles provenant du site de Valcartier, récoltées dans le cadre du projet Genorem. La moyenne des temps estimés par l'outil n'était pas très éloignée de la valeur réelle, soit à quelques décimales près. Ainsi, ceci pourrait porter à croire que les résultats témoignent d'une certaine précision de l'outil. Toutefois, l'étude de cas effectuée d'après les données du site Valcartier a révélé qu'il n'était pas possible de valider les estimations de temps étant donné le nombre trop restreint d'échantillons comparés. L'algorithme de calcul a également fait l'objet d'une analyse de sensibilité. Celle-ci a révélé que les deux paramètres ayant le plus d'incidence sur le temps de phytoremédiation sont la concentration de la contamination initiale et la profondeur de la contamination. La masse volumique du sol a également montré une certaine influence sur le temps de réhabilitation du sol par les plantes, mais de façon moins marquée.
2. Un sommaire des coûts a été dressé d'après les principales étapes d'un projet de phytoremédiation. De plus, deux paramètres ont été mis en évidence relativement à leur

influence sur la technologie, soit le pH du sol et le type de substrat. Il a été expliqué que cette influence peut se répercuter sur les coûts en imposant des opérations supplémentaires. Ainsi, un exemple complet a été fourni comprenant les coûts de préparation, d'entretien et d'opération pour un projet de phytoremédiation type.

Les critères de conception ont donc été respectés. Ainsi, l'outil est fonctionnel, mais spécifique. Pour cette raison, il ne peut servir à grande échelle. Des efforts ont tout de même été déployés de manière à anticiper les prochaines versions de l'outil. Par exemple, la fiche du site contaminé a été prévue tant pour une contamination inorganique qu'organique ou mixte, les limites réglementaires ont été attribuées à tous les contaminants régis par le *Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains* et un répertoire des végétaux a été créé contenant des fiches standards de plante pour faciliter la création d'autres fiches.

L'objectif principal de la recherche a été atteint dans la mesure où l'outil remplit sa fonction d'aide à la décision de trois façons différentes : en illustrant le problème, en informant l'utilisateur et en pointant les données essentielles à l'évaluation du site contaminé. Toutefois, en plus d'aider la décision, l'outil a révélé d'autres usages qui n'étaient pas prévus, soit l'aide à la formation et l'aide à la communication pour les différentes parties prenantes.

Ce travail a ainsi montré au-delà des attentes le potentiel d'un tel outil adapté aux divers besoins des utilisateurs. Le développement de l'outil d'aide à la décision gagnerait à être poursuivi afin d'obtenir un produit fini, commercialisable, aidant les décideurs dans l'évaluation des sites contaminés et dans le choix d'une méthode de réhabilitation adaptée.

En ce sens, l'outil d'aide à la décision a été conçu selon une vision large et de manière à prévoir les améliorations futures. Néanmoins, il reste beaucoup de travail à faire pour mettre à la disposition des décideurs un outil d'aide à la décision complet. À cet effet, il serait important de valider l'estimation en temps avec d'autres données que celles du site Valcartier. Cela permettrait de perfectionner ou corriger les calculs en ajustant les coefficients d'affectation et/ou en intégrant d'autres paramètres. D'ailleurs, il a été soulevé que le prochain élément à intégrer aux calculs devrait être la présence de roches/débris dans

le sol. Tout ce travail devrait s'effectuer selon une approche systémique de manière à conserver l'aspect global de la phytoremédiation et pour éviter que l'outil ne devienne trop difficile à paramétrer.

Le même exercice devrait être effectué pour le calcul des coûts. D'abord, une élaboration des dépenses plus rigoureuse et plus précise serait nécessaire. Les coûts de chacune des opérations pourraient être détaillés et faire l'objet de champ d'entrée, ce qui permettrait un grand raffinement pour l'utilisateur. Ensuite, d'autres paramètres affectant les coûts d'opération devraient être ajoutés aux calculs et le taux d'inflation devrait être pris en compte. Enfin, l'utilisation de plantes comporte de nombreux avantages qui peuvent avoir une incidence économique. Il serait donc intéressant d'incorporer aux calculs des coûts les bénéfices engendrés par la phytoremédiation.

Les prochaines versions de l'outil, en plus d'offrir plus de précision dans les calculs d'estimation du temps et des coûts, devraient proposer plusieurs techniques de réhabilitation ainsi que la possibilité de les combiner. Ce faisant, les décideurs pourraient tester différents choix possibles. Il serait important d'inclure d'abord les méthodes biologiques telles que la phytodégradation et la biopile. Ensuite, les traitements physicochimiques comme la désorption thermique et le lavage pourraient également être ajoutés. De plus, il serait intéressant de développer un système de pointage pour juger de l'aspect environnemental des différentes méthodes de réhabilitation des sols contaminés. La technologie ayant la cote la plus élevée serait la plus respectueuse de l'environnement. Ainsi, en plus de l'estimation du temps de réhabilitation et des coûts prévus, les décideurs auraient une autre dimension sur laquelle s'appuyer pour effectuer l'évaluation de la méthode de réhabilitation et par conséquent, faire un choix éclairé. Enfin, l'apport de toutes les parties prenantes devrait être considéré dans les prochaines versions de l'outil d'aide à la décision. Pour ce faire, des discussions devraient être menées entre autres avec les propriétaires de sites, les experts en environnement, les autorités gouvernementales, les groupes de pression et la population. De cette façon, tous les aspects, environnementaux, sociaux, économiques et politiques, seraient pris en compte, les oublis seraient évités et la satisfaction de tous les groupes de décision serait assurée.

ANNEXES

ANNEXE I

GRILLE DE CRITÈRES GÉNÉRIQUES POUR LES SOLS

Tirée de la *Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés*,
ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les
changements climatiques (MDDELCC, 1998)

Tableau A I-1 Grille des critères génériques pour les sols

| | CRITÈRES DE SOL ¹ mg/kg de matière sèche (ppm) | | |
|---|---|-------------------|--------------------|
| | A ² | B | C |
| I- MÉTAUX (et métalloïdes) | | | |
| Argent (Ag) | 2 | 20 | 40 |
| Arsenic (As) | 6 | 30 | 50 |
| Baryum (Ba) | 200 | 500 | 2 000 |
| Cadmium (Cd) | 1,5 | 5 | 20 |
| Cobalt (Co) | 15 | 50 | 300 |
| Chrome total (Cr) | 85 | 250 | 800 |
| Cuivre (Cu) | 40 | 100 | 500 |
| Étain (Sn) | 5 | 50 | 300 |
| Manganèse (Mn) | 770 | 1000 ³ | 2200 ³ |
| Mercure (Hg) | 0,2 | 2 | 10 |
| Molybdène (Mo) | 2 | 10 | 40 |
| Nickel (Ni) | 50 | 100 | 500 |
| Plomb (Pb) | 50 | 500 ⁴ | 1 000 ⁴ |
| Sélénium (Se) | 1 | 3 | 10 |
| Zinc (Zn) | 110 | 500 | 1 500 |
| II- AUTRES COMPOSÉS INORGANIQUES | | | |
| Bromure disponible (Br ⁻) | 6 | 50 | 300 |
| Cyanure disponible (CN ⁻) | 2 | 10 | 100 |
| Cyanure total (CN ⁻) | 2 | 50 | 500 |
| Fluorure disponible (F ⁻) | 200 | 400 | 2000 |

| | CRITÈRES DE SOL¹ mg/kg de matière sèche (ppm) | | |
|--|---|----------|----------|
| | A² | B | C |
| Soufre total (S) ⁵ | 400 | 1 000 | 2 000 |
| III- COMPOSÉS ORGANIQUES VOLATILS | | | |
| Hydrocarbures aromatiques monocycliques | | | |
| Benzène | 0,1 | 0,5 | 5 |
| Chlorobenzène (mono) | 0,2 | 1 | 10 |
| Dichloro-1,2 benzène | 0,2 | 1 | 10 |
| Dichloro-1,3 benzène | 0,2 | 1 | 10 |
| Dichloro-1,4 benzène | 0,2 | 1 | 10 |
| Éthylbenzène | 0,2 | 5 | 50 |
| Styrène | 0,2 | 5 | 50 |
| Toluène | 0,2 | 3 | 30 |
| Xylènes | 0,2 | 5 | 50 |
| Hydrocarbures aliphatiques chlorés | | | |
| Chloroforme | 0,2 | 5 | 50 |
| Chlorure de vinyle ⁶ | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| Dichloro-1,1 éthane | 0,2 | 5 | 50 |
| Dichloro-1,2 éthane | 0,2 | 5 | 50 |
| Dichloro-1,1 éthène | 0,2 | 5 | 50 |
| Dichloro-1,2 éthène (cis et trans) | 0,2 | 5 | 50 |
| Dichlorométhane | - | 5 | 50 |
| Dichloro-1,2 propane | 0,2 | 5 | 50 |
| Dichloro-1,3 propène (cis et trans) | 0,2 | 5 | 50 |
| Tétrachloro-1,1,2,2 éthane | 0,2 | 5 | 50 |
| Tétrachloroéthène | 0,2 | 5 | 50 |
| Tétrachlorure de carbone | 0,1 | 5 | 50 |
| Trichloro-1,1,1 éthane | 0,2 | 5 | 50 |
| Trichloro-1,1,2 éthane | 0,2 | 5 | 50 |
| Trichloroéthène | 0,2 | 5 | 50 |

| | CRITÈRES DE SOL ¹ mg/kg de matière sèche (ppm) | | |
|---|---|-----|-----|
| | A ² | B | C |
| IV- COMPOSÉS PHÉNOLIQUES | | | |
| Non chlorés | | | |
| Crésol (ortho, méta, para) | 0,1 | 1 | 10 |
| Diméthyl-2,4 phénol | 0,1 | 1 | 10 |
| Nitro-2 phénol | 0,5 | 1 | 10 |
| Nitro-4 phénol | 0,5 | 1 | 10 |
| Phénol | 0,1 | 1 | 10 |
| Chlorés | | | |
| Chlorophénol (-2, -3, ou -4) | 0,1 | 0,5 | 5 |
| Dichloro-2,3 phénol | 0,1 | 0,5 | 5 |
| Dichloro-2,4 phénol | 0,1 | 0,5 | 5 |
| Dichloro-2,5 phénol | 0,1 | 0,5 | 5 |
| Dichloro-2,6 phénol | 0,1 | 0,5 | 5 |
| Dichloro-3,4 phénol | 0,1 | 0,5 | 5 |
| Dichloro-3,5 phénol | 0,1 | 0,5 | 5 |
| Pentachlorophénol (PCP) | 0,1 | 0,5 | 5 |
| Tétrachloro-2,3,4,5 phénol | 0,1 | 0,5 | 5 |
| Tétrachloro-2,3,4,6 phénol | 0,1 | 0,5 | 5 |
| Tétrachloro-2,3,5,6 phénol | 0,1 | 0,5 | 5 |
| Trichloro-2,3,4 phénol | 0,1 | 0,5 | 5 |
| Trichloro-2,3,5 phénol | 0,1 | 0,5 | 5 |
| Trichloro-2,3,6 phénol | 0,1 | 0,5 | 5 |
| Trichloro-2,4,5 phénol | 0,1 | 0,5 | 5 |
| Trichloro-2,4,6 phénol | 0,1 | 0,5 | 5 |
| Trichloro-3,4,5 phénol | 0,1 | 0,5 | 5 |
| V- HYDROCARBURES AROMATIQUES POLYCYCLIQUES | | | |
| Acénaphène | 0,1 | 10 | 100 |
| Acénaphthylène | 0,1 | 10 | 100 |
| Anthracène | 0,1 | 10 | 100 |

| | CRITÈRES DE SOL¹ mg/kg de matière sèche (ppm) | | |
|---|---|----------------------|----------------------|
| | A² | B | C |
| Benzo (a) anthracène | 0,1 | 1 | 10 |
| Benzo (a) pyrène | 0,1 | 1 | 10 |
| Benzo (b + j + k) fluoranthène | 0,1 | 1 ¹¹ | 10 ¹¹ |
| Benzo (c) phénanthrène | 0,1 | 1 | 10 |
| Benzo (g,h,i) pérylène | 0,1 | 1 | 10 |
| Chrysène | 0,1 | 1 | 10 |
| Dibenzo (a,h) anthracène | 0,1 | 1 | 10 |
| Dibenzo (a,i) pyrène | 0,1 | 1 | 10 |
| Dibenzo (a,h) pyrène | 0,1 | 1 | 10 |
| Dibenzo (a,l) pyrène | 0,1 | 1 | 10 |
| Diméthyl-7,12 Benzo (a) anthracène | 0,1 | 1 | 10 |
| Fluoranthène | 0,1 | 10 | 100 |
| Fluorène | 0,1 | 10 | 100 |
| Indéno (1,2,3-cd) pyrène | 0,1 | 1 | 10 |
| Méthyl-3 cholanthrène | 0,1 | 1 | 10 |
| Naphtalène | 0,1 | 5 | 50 |
| Phénanthrène | 0,1 | 5 | 50 |
| Pyrène | 0,1 | 10 | 100 |
| Méthyl naphtalènes (chacun) ⁷ | 0,1 | 1 | 10 |
| VI- COMPOSÉS BENZÉNIQUES NON CHLORÉS | | | |
| Dinitro-2,6 toluène ³ | 0,7 | 2 X 10 ⁻⁴ | 3 X 10 ⁻² |
| Trinitro-2,4,6 toluène (TNT) ³ | - | 0,04 | 1,7 |
| VII- CHLOROBENZÈNES | | | |
| Hexachlorobenzène | 0,1 | 2 | 10 |
| Pentachlorobenzène | 0,1 | 2 | 10 |
| Tétrachloro-1,2,3,4 benzène | 0,1 | 2 | 10 |
| Tétrachloro-1,2,4,5 benzène | 0,1 | 2 | 10 |
| Tétrachloro-1,2,3,5 benzène | 0,1 | 2 | 10 |
| Trichloro-1,2,3 benzène | 0,1 | 2 | 10 |

| | CRITÈRES DE SOL¹ mg/kg de matière sèche (ppm) | | |
|---|---|-----------------|---------------------|
| | A² | B | C |
| Trichloro-1,2,4 benzène | 0,1 | 2 | 10 |
| Trichloro-1,3,5 benzène | 0,1 | 2 | 10 |
| VIII- BIPHÉNYLES POLYCHLORÉS (BPC) | | | |
| Sommation des congénères ⁸ | 0,05 | 1 | 10 |
| IX- PESTICIDES⁹ | | | |
| Tébutiuron ³ | - | 50 | 3600 |
| X- AUTRES SUBSTANCES ORGANIQUES | | | |
| Acrylonitrile ⁶ | - | 1 | 5 |
| Bis(2-chloroéthyl)éther ⁶ | - | 0,01 | 0,01 |
| Éthylène glycol ⁶ | - | 97 | 411 |
| Formaldéhyde ³ | 1 | 100 | 125 |
| Phtalates (chacun) ⁶ | - | - | 60 |
| Phtalate de dibutyle ³ | - | 6 | 7 X 10 ⁴ |
| XI- PARAMÈTRES INTÉGRATEURS | | | |
| Hydrocarbures pétroliers C ₁₀ à C ₅₀ ¹⁰ | 300 | 700 | 3500 |
| XII- DIOXINES ET FURANES | | | |
| | CRITÈRES DE SOL ng/kg de matière sèche (ppt) | | |
| | A² | B | C |
| Sommation des chlorodibenzo-dioxines et chlorodibenzofurannes exprimés en équivalents toxiques 2,3,7,8-TCDD (échelle de l'OTAN, 1988) | - ¹² | 15 ³ | 750 ³ |

Des critères indicatifs de la contamination des sols ne sont pas publiés, ni établis, pour tous les paramètres existants. La liste fournie n'est ni exhaustive, ni limitative. L'utilisateur doit signaler tous les paramètres détectés, même si la présente grille ne fournit pas actuellement de critère pour ces paramètres.

Dans le cas où la limite de quantification de la méthode analytique est supérieure à la valeur du critère (comme c'est le cas pour le dinitro-2,6 toluène), cette limite de quantification sera tolérée comme seuil à respecter; le critère demeure toutefois l'objectif à atteindre.

Pour les métaux ou métalloïdes, il peut arriver que la teneur de fond naturelle d'un sol excède le critère générique utilisé. Cette teneur de fond, dans la mesure où elle est adéquatement évaluée et documentée, se substituera au critère générique pour l'évaluation de la contamination à moins qu'un impact manifeste ou un risque pour la santé ne soit constaté.

ˆ Pas de critère disponible actuellement.

¹ La mobilité des contaminants est influencée notamment par le pH du sol. Il faut donc prendre en considération que dans le cas où le pH est inférieur à 5 ou lorsqu'il est supérieur à 9, la mobilité des contaminants (principalement celle des métaux) est favorisée. Cette situation peut entraîner davantage d'impacts à l'environnement, et doit conséquemment être signalée au Ministère.

² Les critères A représentent les teneurs de fond pour les substances inorganiques et les limites de quantification pour les substances organiques. Dans le cas des métaux et métalloïdes, les teneurs de fond listées au tableau 1 prévalent pour la province géologique des Basses-Terres du Saint-Laurent. Pour les autres provinces géologiques, les teneurs de fond des métaux et métalloïdes à utiliser sont présentées au tableau 2. Une carte des provinces géologiques accompagne le tableau 2.

³ Critères validés par une approche de protection de santé humaine (évaluation de risque réalisée à partir de scénarios génériques en fonction de l'usage) par le Service d'analyse de risque du MEF (ensuite appelé le Groupe d'analyse de risque), en collaboration avec le Service des lieux contaminés, suite à des demandes des directions régionales. Il faut garder à l'esprit que ces valeurs n'ont pas été calculées pour tenir compte du risque pour l'écosystème. Lorsque les valeurs apparaissent élevées (par exemple dans le cas du critère C du phtalate de dibutyle), il est alors approprié de vérifier si l'application du critère basé sur la santé publique assure également la protection de l'écosystème.

Dans le cas où la limite de quantification de la méthode analytique est supérieure à la valeur du critère (comme c'est le cas pour le dinitro-2,6 toluène), cette limite de quantification sera tolérée comme seuil à respecter ; le critère demeure toutefois l'objectif à atteindre.

⁴ Modifié le 19 février 1991.

⁵ Lorsque le critère pour le soufre dans les sols est excédé, il est approprié de réaliser un test de potentiel de génération d'acide afin de décider de la gestion des sols. Consultez la direction régionale du Ministère de l'Environnement à ce sujet.

⁶ Critères établis lors d'une recherche dans la littérature réalisée par le SLC à la suite des demandes des directions régionales. Ces données peuvent provenir de différentes sources, donc elles ont pu être élaborées à partir de méthodologies différentes.

⁷ Le critère prévaut pour chaque composé présent. Les composés à analyser sont le méthyl-1 naphthalène, le méthyl-2 naphthalène, le diméthyl-1,3 naphthalène et le triméthyl-2,3,5 naphthalène.

⁸ Les congénères ciblés sont ceux identifiés par le comité sur la problématique des BPC, de la Direction des laboratoires du ministère de l'Environnement (aujourd'hui le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec). Consultez le « Guide de caractérisation des échantillons contaminés par des biphényles polychlorés » (format PDF, 2,7 Mo), Direction des laboratoires, Ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec, 1996.12.03.

⁹ Des valeurs devraient être établies ultérieurement pour différents pesticides spécifiques. Les pesticides visés sont ceux listés dans la Grille des critères applicables aux cas de contamination des eaux souterraines.

¹⁰ En vigueur depuis le 1er janvier 1996, en remplacement de la méthode des « Huiles et graisses minérales » dans les sols.

¹¹ Le critère s'applique à la sommation du benzo (b) fluoranthène, du benzo (j) fluoranthène et du benzo (k) fluoranthène. S'il est possible de séparer le benzo (k) fluoranthène du benzo (b+j) fluoranthène, la valeur de 1 ppm pour le critère B ou de 10 ppm pour le critère C est accordée à chacun d'entre eux. S'il est possible de doser séparément le benzo (b) fluoranthène, le benzo (j) fluoranthène et le benzo (k) fluoranthène, la valeur de 1 ppm pour le critère B ou de 10 ppm pour le critère C est accordée à chacun d'entre eux.

¹² Pour les dioxines et les furannes, il n'est pas possible d'exprimer une limite de quantification en équivalents toxiques. Il faudra utiliser la limite de quantification propre à chacun des congénères de dioxines et de furannes. Ces valeurs sont :

Tableau A I -2 Limite de quantification des congénères de dioxines et furannes

| Congénères | Échantillons solides Limite de quantification (ng/Kg) |
|----------------------------------|--|
| 2,3,7,8-T ₄ CDD | 0,5 |
| 1,2,3,7,8-P ₅ CDD | 0,5 |
| 1,2,3,4,7,8-H ₆ CDD | 1,0 |
| 1,2,3,7,8,9-H ₆ CDD | 1,0 |
| 1,2,3,6,7,8-H ₆ CDD | 1,0 |
| 1,2,3,4,6,7,8-H ₇ CDD | 2,0 |
| OCDD | 4,0 |
| 2,3,7,8-T ₄ CDF | 0,5 |
| 2,3,4,7,8-P ₅ CDF | 0,5 |
| 1,2,3,7,8-P ₅ CDF | 0,5 |
| 1,2,3,4,7,8-H ₆ CDF | 1,0 |
| 1,2,3,7,8,9-H ₆ CDF | 1,0 |
| 1,2,3,6,7,8-H ₆ CDF | 1,0 |
| 2,3,4,6,7,8-H ₆ CDF | 1,0 |
| 1,2,3,4,6,7,8-H ₇ CDF | 2,0 |
| 1,2,3,4,7,8,9-H ₇ CDF | 2,0 |
| OCDF | 4,0 |

ANNEXE II

CHEMINEMENT D'UNE ÉTUDE DE CARACTÉRISATION

Tirée du *Guide de caractérisation des terrains* (2003, p.3)

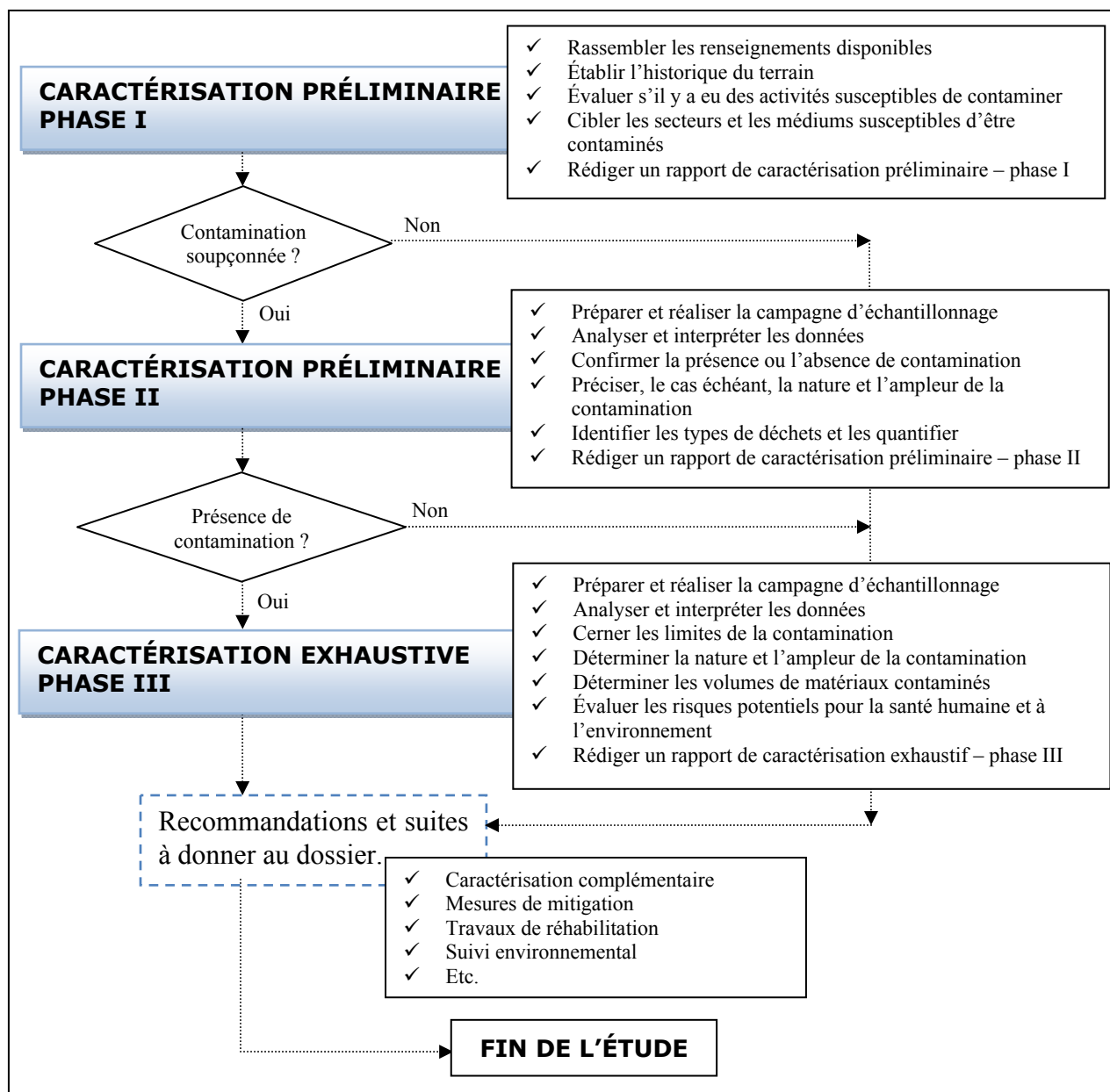


Figure A II-1 Cheminement d'une étude de caractérisation

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) et Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM). 2013. « SélectDÉPOL Outil interactif de pré-sélection des techniques de dépollution ». In *SélectDÉPOL*. En ligne. <http://www.selecdepol.fr/>. Consulté le 7 juillet 2015.
- Agriculture et agroalimentaire Canada. 1999. *Degrés-jours de croissance réelle – Québec – Données de climat : 1971-2000. Scénario de changement climatique : 2010-2039*. Québec : Agriculture et agroalimentaire Canada en partenariat avec Environnement Canada Bureau national des services-Agriculture.
- Baltreinaite, Edita, Arvydas Lietuvninkas et Pranas Baltrenas. 2012. « Use of Dynamic Factors to Assess Metal Uptake and Transfer in Plants – Example of Trees ». *Water Air Soil Pollut*, vol. 223, p. 4297-4306.
- Bardos, Paul, Judith Nathanail et Brian Pope. 2002. « General principles for remedial approach selection ». *Land Contamination & Reclamation*, vol. 10, no.3, p. 137-160.
- Beaulieu, Michel et Ruth Drouin. 1998. *Terrains contaminés : Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés*. Coll. « Les publications du Québec », ISBN 2-551-18001-5. Sainte-Foy (Québec) : Gouvernement du Québec, Ministère de l'Environnement et de la Faune, 124 p.
- Brunner, Ivano, Jörg Luster, Madeleine S. Günthardt-Goerg et Beat Frey. 2008. « Heavy metal accumulation and phytostabilisation potential of tree fine roots in a contaminated soil ». *Environmental Pollution*, vol. 152, p. 559-568.
- Carlón, Claudio, Andrea Critto, Emiliano Ramieri et Antonio Marcomini. 2007. « DESYRE: Decision Support System for the Rehabilitation of Contaminated Megasites ». *Integrated Environmental Assessment and Management*, vol. 3, no.2, p. 211-222.
- Cundy, A.B., R.P. Bardos, A. Church, M. Puschenreiter, W. Friesl-Hanl, I. Müller, S. Neu, M. Mench, N. Witters et J. Vangronsveld. 2013. «Developing principles of sustainability and stakeholder engagement for “gentle” remediation approaches: The European context ». *Journal of Environmental Management*, vol. 129, p. 283-291.
- Dauguet S., L. Denaix, C. Nguyen, E. Royer, P. Levasseur, M. Potin-Gauthier, G. Lespes, C. Parat, J. Héroult, R. Coudure, P. Chéry, M. Devert, N. Robert, P. Pouech. 2011. « Mesures des flux d'éléments traces (Pb, Cd, As, Cu, Zn) dans les sols, végétaux, porc et lisiers des exploitations porcines du Sud-Ouest ». *Innovations agronomiques*, vol. 17, p. 175-190.

- Doucet, Roger. 1992. « La Science agricole – Climat, sols et productions végétales du Québec ». Flammarion Canada. Eastman (Québec) : Éditions Berger, 699 pages.
- Dufresne, Myriam. 2013. « Les technologies de traitement des sols contaminés : lesquels sont durables ? » Essai en vue de l'obtention du grade de maître en environnement, Sherbrooke, Université de Sherbrooke, 61 p.
- Geng, Liqiang, Zhi Chen, Christine W. Chan et Gordon H. Huang. 2001. «An intelligent decision support system for management of petroleum-contaminated sites ». *Experts Systems with Applications*, vol. 20, p. 251-260.
- Gerhardt, Karen E., Xiao-Dong Huang, Bernard R. Glick et Bruce M. Greenberg. 2009. «Phytoremediation and rhizoremediation of organic soil contaminants: Potential and challenges ». *Plant Science*, vol. 176, p. 20-30.
- Gobat, Jean-Michel, Michel Aragno et Willy Matthey. 2010. *Le sol vivant : Bases de pédologie – Biologie des sols*, 3^{ième} édition. « Sciences et ingénierie de l'environnement ». Suisse : Presses polytechniques et universitaires romandes, 817 p.
- Gouvernement du Canada. Environnement Canada. 2010. «Contamination des eaux souterraines ». In *Environnement Canada*. En ligne. <https://www.ec.gc.ca/eau-water/default.asp?lang=Fr&n=6A7FB7B2-1>. Consulté le 19 octobre 2015.
- Gouvernement du Canada. Portail des sites contaminés fédéraux. 2014. «Le plan d'action pour les sites contaminés fédéraux PASCF ». In *Portail des sites contaminés fédéraux*. En ligne. <http://www.federalcontaminatedsites.gc.ca/default.asp?lang=Fr&n=BAC292EB-1>. Consulté le 16 juin 2015.
- Gouvernement du Québec. Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques. 2015. «Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés ». In *Le site du ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques*. En ligne. <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/>. Consulté le 6 février 2015.
- Gouvernement du Québec. Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques. 2015. «Répertoire des terrains contaminés ». In *Le site du ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques*. En ligne. <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/terrains-contamines/recherche.asp>. Consulté le 16 juin 2015.
- Haddad, Hedi. 2009. « Une approche pour supporter l'analyse qualitative des suites d'actions dans un environnement géographique virtuel et dynamique. L'analyse « What if » comme exemple. » Thèse de doctorat en informatique, Québec, Université Laval, 277 p.

- Huang, S. Q. Cao, Y. M. Zheng, Y. Z. Huang, Y. G. Zhu. 2004. « A multi-process phytoremediation system for removal of polycyclic aromatic hydrocarbons from contaminated soils ». *Environmental Pollution*, vol. 130, p. 465-476.
- Khan, S. Q. Cao, Y. M. Zheng, Y. Z. Huang, Y. G. Zhu. 2008. « Health risks of heavy metals in contaminated soils and food crops irrigated with wastewater in Beijing, China ». *Environmental Pollution*, vol. 152, p. 686-692.
- Kirker, Gregory A., Todd S. Bridges, Arun Varghese, Thomas P. Seager et Igor Linkov. 2005. « Application of Multicriteria Decision Analysis in Environmental Decision Making ». *Integrated Environmental Assessment and Management*, vol. 1, no.2, p. 95-108.
- Kirkham, M. B. 2006. « Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments ». *Geoderma*, vol. 137, p. 19-32.
- Kuiper, Irene, Ellen L. Lagendijk, Guido V. Bloemberg et Ben J. J. Lugtenberg. 2004. « Rhizoremediation : A Beneficial Plant-Microbe Interaction ». *Molecular Plant-Microbe Interactions*, vol. 17, no 1, p. 6-15.
- Laberge, Johanne. 2003. *Guide de caractérisation des terrains*. Coll. « Gouvernement du Québec ». Sainte-Foy (Québec) : Les Publications du Québec, 130 p.
- Labrecque, M. et Frédéric Pitre (2014). *Consultations au sujet de la phytoremédiation, des étapes de réalisation d'un projet et de ce qui freinent les décideurs à choisir cette technologie*. Communication orale. Rencontres au bureau de M. Labrecque, au Jardin botanique de Montréal : michel.labrecque@umontreal.ca et frederic.pitre@umontreal.ca, avril 2014 à mars 2015, à Montréal.
- Lewandowski, I., U. Schmidt, M. Londo et A. Faaij. 2006. « The economic value of the phytoremediation function – Assessed by the example of cadmium remediation by willow (*Salix* spp) ». *Agricultural Systems*, vol. 89, p. 68-89.
- Máthé-Gáspár, Gabriella et Attila Anton. 2005. « Phytoremediation study: Factors influencing heavy metal uptake of plants ». *Acta Biologica Szegediensis*, vol. 49 (1-2), p. 69-70.
- Mench, Michel et Denis Baize. 2004. « Contamination des sols et de nos aliments d'origine végétale par les éléments en traces : mesures pour réduire l'exposition ». *Courrier de l'environnement de l'INRA*, n°52, p.31-56.
- Newman, Lee A. et Charles M. Reynolds. 2004. « Phytodegradation of organic compounds ». *Environmental biotechnology*, vol. 15, p. 225-230.

- Norini, Marie-Paule. 2007. « Écodynamique des Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques (HAP) et des communautés microbiennes dans des sols à pollution mixte (HAP, métaux) avant et après traitement par biopile et par désorption thermique : Influence de la rhizosphère et de la mycorhization ». Thèse de doctorat en Géosciences, Nancy (France), Université Henri Poincaré, 303 p.
- Nze Memiaghe, Jeff Daniel. 2012. « Caractérisation des sols urbains formés par remblaiement: approche pédologique intégrant l'étude de la fraction grossière ». Mémoire de maîtrise en génie de l'environnement, Montréal, École de technologie supérieure, 122 p.
- Onwubuya, Kene, Andrew Cundy, Markus Puschenreiter, Jurate Kumpiene, Brian Bone, Jon Greaves, Phillip Teasdale, Michel Mench, Pavel Tlustos, Sergey Mikhalovsky, Steve Waite, Wolfgang Friesl-Hanl, Bernd Marschner et Ingo Müller. 2009. « Developing decision support tools for the selection of “gentle” remediation approaches ». *Science of the Total Environment*, vol. 407, p. 6132-6142.
- Ouellette, Hugues. 2012. *Lignes directrices sur l'évaluation des teneurs de fond naturelles dans les sols*. Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, ISBN 978-2-550-49918-3, 25 p.
- Pietrini, Fabrizio, Massimo Zacchini, Valentina Lori, Lucia Pietrosanti, Daniel Bianconi et Angelo Massacci. 2009 « Screening of Poplar Clones for Cadmium Phytoremediation Using Photosynthesis, Biomass and Cadmium Content Analyses ». *International Journal of Phytoremediation*, vol. 12, p. 105-120.
- Pollard S.J.T., A. Brookes, N. Earl, J. Lowe, T. Kearny, C.P. Nathanail. 2004 « Integrating decision tools for the sustainable management of land contamination ». *Science of the Total Environment*, vol. 325, p. 15-28.
- Québec (Province). À jour au 1^{er} février 2015. *Loi sur la qualité de l'environnement, Chapitre Q-2*. En ligne. Québec (Qc) : Éditeur officiel du Québec. < http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/Q_2/Q2.htm >. Consulté le 6 février 2015.
- Québec (Province). À jour au 1^{er} février 2015. *Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains, Chapitre Q – 2, r.37*. En ligne. Québec (Qc) : Éditeur officiel du Québec. < http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/Q_2/Q2R37.htm >. Consulté le 9 février 2015.
- Québec (Province). À jour au 1^{er} février 2015. *Règlement sur l'enfouissement des sols contaminés, Chapitre Q – 2, r.18*. En ligne. Québec (Qc) : Éditeur officiel du Québec. < http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/Q_2/Q2R18.HTM >. Consulté le 9 février 2015.

- Québec (Province). À jour au 1^{er} février 2015. *Règlement sur les matières dangereuses, Chapitre Q – 2, r.32*. En ligne. Québec (Qc) : Éditeur officiel du Québec. < http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/Q_2/Q2R32.HTM >. Consulté le 9 février 2015.
- Québec (Province). À jour au 1^{er} février 2015. *Règlement sur le stockage et les centres de transfert de sols contaminés, Chapitre Q – 2, r.46*. En ligne. Québec (Qc) : Éditeur officiel du Québec. < http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/Q_2/Q2R46.HTM >. Consulté le 9 février 2015.
- Québec (Province). À jour au 1^{er} février 2015. *Règlement sur l'évaluation et l'examen des impacts sur l'environnement, Chapitre Q – 2, r.23*. En ligne. Québec (Qc) : Éditeur officiel du Québec. < http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/Q_2/Q2R23.HTM >. Consulté le 9 février 2015.
- Reimann C., F. Koller, B. Frengstad, G. Kashulina, H. Niskavaara et P. Englmaier. 2001. « Comparison of the element composition in several plant species and their substrate from a 1 500 000 km² area in Northern Europe ». *Science of the total environment*, vol. 278, p. 87-112.
- Robinson B., Green S., Mills T., Clothier B., Fung L., Hurst S., Snow V., McIvor I., Sivakumaran S., Van Den Dijssel C., Babbage N. 2003. « Assessment of phytoextraction as best management practice for degraded environments ». In *Environmental management using soil-plants systems (Eds L D Currie, R B Stewart and C W N Anderson)*, Occasional Report No 16. (Massey University, February 2003), p. 39-50. Palmerston North (New Zealand) : Fertilizer and Lime Research Centre.
- Robinson B., R. Schulin, B. Nowack, S. Roulier, M. Menon, B. Clothier, S. Green et T. Mills. 2006. « Phytoremediation for the management of metal flux in contaminated sites », *Forest Snow Landscape Res*, Volume 80 (2), p. 221-234
- Robinson Brett, Steve Green, Tessa Mills, Brent Clothier, Marijn van der Velde, Raphael Laplane, Lindsay Fung, Markus Deurer, Sarah Hurst, Thabo Thayalakumaran et Carlo van den Dijssel. 2003. « Phytoremediation : using plants as biopumps to improve degraded environments », *Australian Journal of Soil Research*, Volume 41, p. 599-611
- Robinson, Brett (2014). *Discussion au sujet du Phyto-DSS comme outil d'aide à la décision en phytoremédiation*. Communication écrite par courriel : Brett.Robinson@lincoln.ac.nz, 28 juin 2014.
- Rosselli, Walter, Catherine Keller et Katia Boschi. 2003. « Phytoextraction capacity of trees growing on a metal contaminated soil ». *Plant and Soil*, vol. 256, p. 265-272.

- Schaff, Steven D., S. Reza Pezeshki, F. Douglas Shields. 2003. « Effects of Soil Conditions on Survival and Growth of Black Willow Cuttings ». *Environmental Management*, vol. 31, no. 6, p. 748-763.
- Shim, J.P., Merrill Warkentin, James F. Courtney, Daniel J. Power, Ramesh Sharda, Christer Carlsson. 2002. « Past, present, and future of decision support technology ». *Decision Support Systems*, vol. 33, no. 6, p. 111-126.
- Sirven, Jean-Baptiste. 2006. « Détection des métaux lourds dans les sols par spectroscopie d'émission sur plasma induit par laser (LIBS) ». Thèse de doctorat en sciences physiques et en génie, Bordeaux, Université Bordeaux 1, 252 p.
- Sorvari, Jaana, Riina Antikainen, Marja-Leena Kosola, Pekka Hokkanen, Teija Haavisto. 2009. « Eco-efficiency in contaminated land management in Finland – Barriers and development needs ». *Journal of Environmental Management*, vol. 90, p. 1715-1727.
- Sorvari, Jaana et Jyri Seppälä. 2010. « A decision support tool to prioritize risk management options for contaminated sites ». *Science of the Total Environment*, vol. 408, p. 1786-1799.
- Susarla, Sridhar, Victor F. Medina et Steven C. McCutcheon. 2002. « Phytoremediation: An ecological solution to organic chemical contamination ». *Ecological Engineering*, vol. 18, p. 20-30.
- Trapp, Stephen et Ulrich Karlson. 2001. « Aspects of Phytoremediation of Organic Pollutants ». *Journal of Soils and Sediments*, vol. 1, issue 1, p. 37-43.
- Trapp, Stefan. 2014. *Feasibility of phytoremediation of common soil and groundwater pollutants*. Coll. « European Community's Seventh Framework Program FP7 ». ENV.2010.3.1.5-2. Environmental Technologies for Brownfield Regeneration under Grant Agreement no 265364 (2011-2014), 48 p.
- Tremel-Schaub, Anne et Isabelle Feix. 2005. *Contamination des sols – Transferts des sols vers les plantes*. Coll. « Sols et Transferts », EDP Sciences et ADEME Éditions. France : EDP Sciences et ADEME, 413 p.
- Tsao, David T. 2003. « Overview of Phytotechnologies ». *Advances in Biochemical Engineering Biotechnology*, sous la dir. David T. Tsao, p. 1-50. vol. 78. Berlin Heidelberg (Allemagne) : T. Scheper, Springer-Verlag.
- Vojant Tangahu, Bieby, Siti Rozaimah Sheikh Abdullah, Hassan Basri, Mushrifah Idris, Nurina Anuar et Muhammad Mukhlisin. 2011. « A review on Heavy Metals (As, Pb and Hg) Uptake by Plants through Phytoremediation ». *International Journal of Chemical Engineering*, vol. 2011, Article ID 939161, 31 p.

- Willey, Neil. 2007. *Phytoremediation : Methods and Reviews*, Coll. «Methods in biotechnology », 23. Totowa, New Jersey (États-Unis) : Humana Press Inc., 460 p.
- Witters N., R. Mendelsohn, S. Van Passel, S. Van Slycken, N. Weyens, E. Schreurs, E. Meers, F. Tack, B. Vanheusden et J. Vangronsveld. 2012. «Phytoremediation, a sustainable remediation technology ? II : Economic assessment of CO² abatement through the use of phytoremediation crops for renewable energy production ». *Biomass and Bioenergy*, vol. 39, p. 470-477.

