

Réhabilitation des sols contaminés et phytoremédiation

**Le modèle PhytoVan et la mesure
des services écosystémiques**

Caroline Simard

AVRIL 2018



Notice biographique

Chargée de projet pour l'IRÉC, **Caroline Simard** détient un baccalauréat en administration de l'École des Hautes études commerciales et une maîtrise en économie de l'UQAM. Elle s'occupe à l'IRÉC des volets industrie électrique, marché du carbone et fiscalité écologique.

© Institut de recherche en économie contemporaine

ISBN 978-2-923203-92-8 (PDF)

ISBN 978-2-923203-93-5 (Version imprimée)

Dépôt légal — Bibliothèque nationale du Québec, 2018

Dépôt légal — Bibliothèque nationale du Canada, 2018

IRÉC, 10555, avenue de Bois-de-Boulogne, CP 2006, Montréal (Québec) H4N 1L4

Faits saillants

- La réhabilitation des terrains contaminés permet des gains à la fois financiers, sociaux et environnementaux.
- Cette réhabilitation peut être réalisée par un nouveau type de technologies vertes : la phytoremédiation, qui possède un avantage distinctif vis-à-vis des autres technologies. La phytoremédiation procure plusieurs co-bénéfices, tels que : l'amélioration de la qualité de l'air, la lutte aux îlots de chaleur, la réduction des eaux de ruissellement et l'embellissement du paysage.
- La phytoremédiation est généralement moins coûteuse que les technologies conventionnelles.
- En dépit d'un potentiel probant, l'utilisation de cette technique demeure peu répandue.
- Le contexte légal d'utilisation de ces technologies est à améliorer.
- Le consensus scientifique concernant l'efficacité de la phytoremédiation dans divers contextes d'utilisation est méconnu et certaines difficultés persistent quant à la diffusion des expertises.
- Les outils d'aide à la décision quant au choix de la technologie fournissent des informations pertinentes sur les temps de décontamination et sur les conditions propices à leur implantation, mais ne renseignent pas sur les coûts de décontamination et sur la valeur des bénéfices environnementaux et des critères de durabilité des méthodes employées.
- Le soutien public est nécessaire pour encourager l'usage de la phytoremédiation et pour que la société en retire des bénéfices environnementaux importants en matière de services écologiques. La réhabilitation des friches industrielles contaminées de l'Île de Montréal par la phytoremédiation peut jeter les bases d'une d'infrastructures vertes et fournir une solution durable d'adaptation aux changements climatiques.

Table des matières

1. Contexte	1
2. Phytoremédiation et technologies vertes de décontamination	3
3. Niveau d'adoption des technologies vertes au Québec et ailleurs	7
4. Évaluation des obstacles au recours aux technologies de phytoremédiation	9
4.1 Contraintes légales	9
4.2 Consensus scientifique méconnu	11
4.3 Déficience dans la diffusion des connaissances auprès des experts et des promoteurs	12
4.4 Faiblesse du soutien public	14
5. Modèle PhytoVAN	17
5.1 Le cadre méthodologique de l'analyse avantages-coûts avec quantification des services écologiques	17
5.2 Description du modèle PhytoVAN	18
5.3 Résultats préliminaires	20
Conclusion : détailler la chaîne de valeur de la chimie verte	21
Bibliographie	23
Annexe	27

1. Contexte

Sur l'Île de Montréal, on dénombre environ 1900 terrains contaminés¹. En 2000, on estimait que 4200 hectares de terrains étaient potentiellement contaminés, soit quelque 60 % de tous les terrains vacants sur l'Île de Montréal (Lavallée, 2006) et 20 % de tous les terrains contaminés du Québec². Ces terrains forment des trous dans le tissu urbain et apportent leur lot de défis sociaux et économiques : diminution de la valeur des propriétés avoisinantes, revenus fonciers plus faibles, dégradation du paysage, augmentation de la criminalité. Héritage d'un passé industriel moins soucieux de son empreinte environnementale, ces terrains dressent des obstacles au développement urbain qu'on pourrait pourtant éviter. La réhabilitation des friches permet plusieurs gains, à la fois financiers, sociaux et environnementaux. Ces bénéfices sont répartis dans le temps entre plusieurs acteurs (promoteurs, résidents en périphérie, autorités municipales). Même si les coûts initiaux de décontamination sont généralement très élevés³, il arrive que la prise en charge d'un site contaminé soit bénéfique d'un point de vue social sans que cela se traduise par des recettes économiques immédiates (Martel, 2006)⁴. C'est pourquoi le gouvernement a mis en place plusieurs programmes pour accompagner les propriétaires de terrains et les inciter à la décontamination : ce sont en particulier Revi-Sols (1998-2005) (voir Trudeau, Diarra, et Guilbault, 2013, et OCETA⁵), ClimatSol (2007-2015) et plus récemment ClimatSol-Plus. Malgré ces programmes, la progression de la réhabilitation demeure lente et on estime que 300 nouveaux terrains contaminés s'ajoutent chaque année à ceux déjà identifiés (Bert, Douay, Faure, et Cadière, 2017).

À Montréal en particulier, les gouvernements du Québec et la Ville de Montréal ont entrepris de mobiliser des moyens considérables pour remettre les terrains en état. L'annonce du gouvernement Couillard, le 25 mars 2018, de consacrer 75 millions de dollars à la décontamination des terrains sur l'Île de Montréal, constitue un pas dans la bonne direction. L'ampleur des problèmes et l'échelle à laquelle il faut déployer les solutions plaident pour une approche globale qui va favoriser l'optimisation des moyens et l'établissement de priorités susceptibles de concilier les besoins de court terme et les interventions structurantes à long terme. Il est possible, en effet, de considérer la décontamination des sols comme une occasion de développement non seulement urbain, mais industriel. Il existe d'ores et déjà une industrie de la décontamination, mais les avancées scientifiques permettent d'entrevoir des possibilités d'en faire un secteur à très fort potentiel d'innovation, en particulier en matière de développement durable.

Montréal possède une expertise exceptionnelle en matière de technologies nouvelles de réhabilitation et de décontamination des sols. Avec une masse critique de chercheurs de très haut niveau,

1. Voir [<http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/terrains-contamines/resultats.asp>].

2. [Voir <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1091386/montreal-sols-contamines-decontamination-ministere-environnement-espaces-verts>].

3. Un rapport de la firme Ventix (2009), qui portait sur l'évaluation du potentiel de revalorisation dans huit municipalités du Québec, a conclu que les coûts de décontamination élevés constituent la première grande barrière à la réhabilitation des terrains contaminés.

4. Deux éléments sont donc considérés comme des failles de marché : les coûts initiaux élevés qui créent une situation de monopole naturel (mais c'est une autre question que nous n'aborderons pas ici), et le problème de coûts concentrés et bénéfices diffus. Les bénéfices sont diffus dans le sens où les bénéfices associés à la réhabilitation ne sont pas que pour le promoteur privé. Il y a des externalités positives à la réhabilitation qui bénéficieront à l'ensemble de la société.

5. « The Province of Quebec's Revi-Sol program, which was implemented in 1998, is one of the first and most successful brown-field grant programs established in Canada, resulting in the cleanup of over 300 sites. The subsequent program, ClimatSol was launched in 2007 and retains many aspects of the Revi-Sols program but also incorporates a focus on climate change » (OCETA).

l'Institut de recherche en biologie végétale (IRBV) mène des travaux qui peuvent jeter les bases d'une véritable grappe industrielle de technologies vertes de décontamination. Les interventions de la Ville de Montréal peuvent fournir une occasion et des moyens de transformer le passif environnemental que constituent les sols contaminés en véritable avantage stratégique.

2. Phytoremédiation et technologies vertes de décontamination

La réhabilitation des terrains contaminés peut être réalisée par deux types de technologies : 1) les technologies conventionnelles (par exemple : l'excavation), qui sont les plus répandues, et 2) les technologies vertes ou la *phytoremédiation*. La phytoremédiation est une technique qui utilise des végétaux pour retirer, contenir ou rendre inoffensifs des contaminants organiques ou inorganiques (métaux).

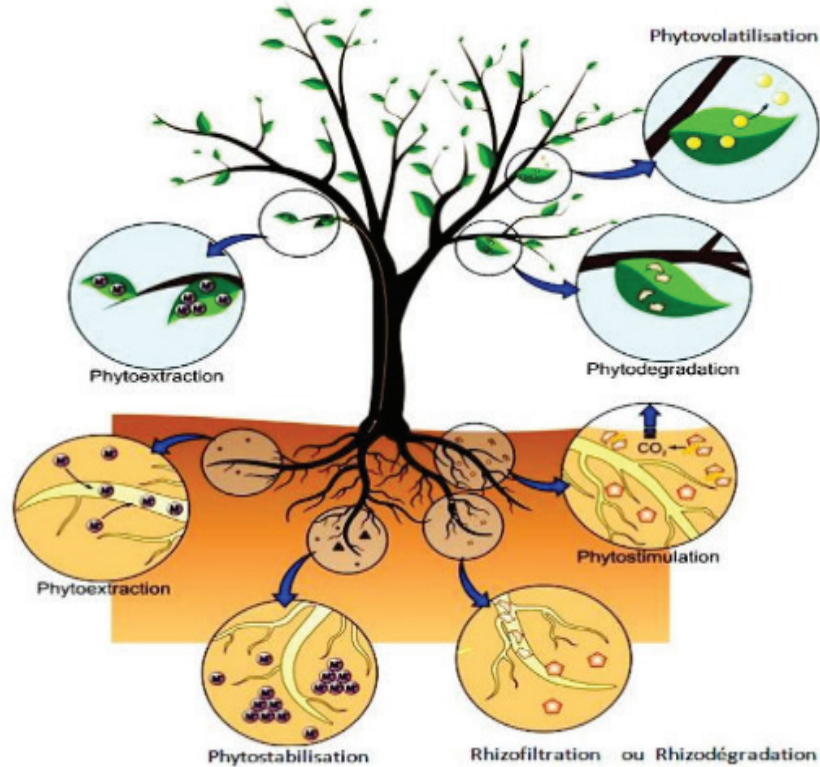
Il existe une grande variété de procédés de décontamination verte; deux grandes distinctions permettent de les identifier. La première distinction qu'on peut apporter concerne l'endroit où le traitement est réalisé. Les technologies d'assainissement *ex situ* impliquent le déplacement des terres à traiter et sont plus souvent associées aux technologies conventionnelles. Les technologies d'assainissement *in situ*, pour leur part, nécessitent l'emploi de procédés chimiques ou biologiques et sont généralement associées aux technologies vertes. Puisque les technologies *in situ* se font sur place, elles ont l'avantage de perturber moins les fonctions du sol. On dit que ce sont des technologies « de remédiation douce ». Les technologies *in situ* sont les seules capables de traiter de grandes surfaces.

La deuxième distinction entre les procédés de décontamination vertes concerne le processus de décontamination lui-même. La décontamination peut être opérée par dégradation, transformation, volatilisation ou stabilisation des contaminants. De manière générale, les contaminants inorganiques sont stabilisés, alors que les contaminants organiques sont dégradés. Il existe une multitude de procédés possibles, qu'on peut regrouper en cinq grandes catégories⁶ : (1) phytostabilisation, (2) phytodégradation, (3) phytostimulation, (4) rhizodégradation et (5) phytovolatilisation.

La figure 1 illustre les différents procédés. On comprend que pour la phytovolatilisation, les plantes absorbent les contaminants volatiles par leurs racines pour ensuite les rejeter dans l'air, alors que pour la phytodégradation, les plantes dégradent, directement dans le sol ou dans les tissus végétaux, les contaminants par exsudation ou décomposition. Dans les deux cas, il n'est pas nécessaire de récolter les plantes. Pour la phytoextraction, les contaminants (surtout de type métaux) sont extraits par les plantes qui sont récoltées jusqu'à dépollution du site. Les plantes hyperaccumulatrices absorbent les contaminants et les déplacent vers leurs parties aériennes qui seront récoltées jusqu'à dépollution du site. Dans le cas phytostabilisation, les plantes piègent les contaminants dans leurs systèmes racinaires et les rendent moins toxiques. En ce qui a trait à la phytostimulation et à la rhizodégradation, le système racinaire de la plante, en interaction avec l'activité microbienne, dégradent les contaminants, toujours par exsudation ou décomposition.

⁶Voir la catégorisation proposée par l'outil d'aide à la décision de l'ADEME : www.selecdepol.fr/fiches-techniques/phytoremédiation

Figure 1 – Illustration des principaux procédés à l'œuvre dans la phytoremédiation



Source : Atma, W. 2017 (Étude du pouvoir épurateur de quelques plantes : la phytoremédiation)

Si les technologies vertes regroupent un ensemble de méthodes et de procédés fort différents, on peut toutefois définir quelques grandes caractéristiques communes. Elles sont généralement moins coûteuses parce que réalisées sur place. Ne nécessitant pas le transport d'importantes quantités de terre, elles provoquent moins de nuisances (bruit, poussière, etc.) et affichent un bilan carbone plus sobre. Puisqu'elles reposent sur les cycles biologiques, les technologies de phytoremédiation s'inscrivent nécessairement dans un schéma temporel bien différent de celles qui procèdent par excavation. Cette dernière intervention a certes des effets immédiats sur le site, mais elle ne fait que déplacer ailleurs le temps de traitement. Sur le plan économique, évidemment, cela a un impact majeur sur les coûts de l'intervention et sur le cycle financier dans lesquels il faut les considérer. Le tableau 1 présente le contraste des avantages des deux grandes catégories de technologies de réhabilitation : conventionnelles et vertes.

Tableau 1. Comparaison des avantages et inconvénients des grandes catégories de technologies de décontamination

Technologies	Conventionnelles	Vertes
Exemples	Excavation	Phytoremédiation
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Convient à tous les types de contamination • Expertise disponible • Technologie à maturité 	<ul style="list-style-type: none"> • Efficace et à maturité pour certains cas bien précis • Moins coûteuse • Meilleure acceptabilité sociale • Quantité moindre de déchets à gérer • Co-bénéfices environnementaux
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Coûteuse • Ne peut pas traiter de grands volumes 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne convient pas à tous les types de contamination • Nécessite une expertise de pointe (complexité) • Incertitude quant au temps de décontamination

3. Niveau d'adoption des technologies vertes au Québec et ailleurs

Bien qu'elle soit efficace pour plusieurs cas bien précis de décontamination, la phytoremédiation est encore très peu utilisée au Québec. Entre 2003 et 2010, 77 cas inventoriés par le gouvernement du Québec ont fait l'objet d'une réhabilitation des sols et seulement un cas a eu recours à la phytoremédiation (Hébert et Bernard, 2013).

La plus importante étude ayant été réalisée sur le potentiel économique de la phytoremédiation (aux États-Unis et dans le monde) est l'étude privée réalisée par la firme Glass Associates et celle-ci date de 1999⁷. Cette étude prévoyait que les parts de marché de cette technologie connaîtraient une forte croissance et pourraient atteindre entre 215 millions et 370 millions \$US en 2005, soit dix fois plus que les parts de marché enregistrées au moment de réaliser l'étude. Les résultats de cette étude démontraient que la phytoremédiation demeure une technologie utilisée dans des cas exceptionnels seulement; selon les discussions avec les experts du milieu, cette situation n'a pas beaucoup évolué au cours des 20 dernières années. Par ailleurs, les chercheurs (Trudeau et coll., 2013) ont relevé que l'usage des phytotechnologies pour la remédiation des terrains contaminés est plus répandue au Canada et aux États-Unis qu'en Europe.

À cet égard, Montréal se distingue nettement. Les chercheurs de l'IRBV se situent à la fine pointe de la recherche dans le domaine et leur expertise est reconnue. Ils conduisent des travaux qui ont donné lieu à des percées scientifiques majeures. En grande majorité menés à l'échelle expérimentale, plusieurs de leurs travaux ont désormais atteint un degré de maturité qui rend envisageables les stades de développement visant une éventuelle mise à l'échelle industrielle favorisant le transfert technologique. Le programme scientifique mené au banc d'essai en phytoremédiation, une infrastructure unique, vise explicitement à jouer un rôle d'accélérateur du développement technologique.

7. D. Glass Associates, Inc., "U.S. and International Markets for Phytoremediation", 1999-2000, (1999).

4. Évaluation des obstacles au recours aux technologies de phytoremédiation

La phytoremédiation diffère des autres technologies de réhabilitation en ce qu'elle est une technologie plus complexe mobilisant des expertises pointues et nécessitant un suivi particulier. Il s'agit, de fait, d'une technologie de pointe dont l'implantation lente peut s'expliquer de plusieurs manières : degré de maturité, niveau de familiarisation, faible connaissance des coûts et rendements à grande échelle, non-prise en compte de la durabilité des méthodes, etc. Comme tout domaine à forte composante innovatrice, celui de la phytoremédiation doit se développer en surmontant un ensemble d'obstacles de différentes natures. Au regard des analyses disponibles et de l'état des connaissances, en particulier en matière économique, on peut en identifier quelques-uns qui ralentissent le rythme de diffusion de l'innovation et compliquent le recours à la phytoremédiation dans nombre de cas, en particulier dans ceux-là où, sur le plan opérationnel il serait pourtant le plus avantageux. Quatre barrières possibles sont évaluées :

- Contraintes légales;
- Consensus scientifique méconnu;
- Déficiences dans la diffusion des connaissances auprès des experts et promoteurs;
- Faiblesse du soutien public.

4.1 Contraintes légales

La chercheuse en droit de l'environnement Hélène Trudeau (Trudeau et coll., 2013) a passé en revue les lois et règlements pour identifier les contraintes légales éventuelles. Sans entrer dans tous les détails de cette étude exhaustive, nous présentons ici trois contraintes qui nous apparaissent plus importantes. La première concerne la classification des végétaux utilisés dans la phytoremédiation en tant que déchets toxiques. Dans la classification de déchets toxiques du Règlement sur la protection et la réhabilitation des terrains (RPRT), aucune mention n'est faite concernant des végétaux contaminés. Ce flou laisse donc plusieurs incertitudes quant aux obligations réglementaires pour le traitement et la disposition des végétaux⁸. Or, les coûts de traitement et de disposition des déchets dangereux sont très élevés. Une telle incertitude fait donc planer un risque financier qui constitue certainement un frein pour le déploiement plus large de la phytoremédiation. La seconde barrière a trait au rôle joué de facto par les experts externes habilités par l'État dans le choix des techniques de réhabilitation d'un terrain et dans l'encadrement des travaux de réhabilitation. Bien que la décision

8. Les plantes peuvent se voir attribuer la classification de déchets toxiques et en découlent plusieurs conséquences réglementaires qui en compliquent largement le traitement et la disposition. À défaut d'un réaménagement des législations existantes, ces coûts de traitement supplémentaires doivent être intégrés au coût global du procédé de bioremédiation. On a modifié les lois québécoises afin d'éviter l'importation de terrains contaminés. Le Règlement sur les matières dangereuses (RMD, 1997) exclut les sols contaminés de la définition des matières dangereuses à l'exception des sols contenant plus de 50mg de BPC par kg de sol. Cette disposition prévue à l'article 94 du RMD, permet ainsi d'interdire l'enfouissement de ces sols contaminés dans des lieux où l'enfouissement est normalement autorisé. On peut toutefois présumer que si la concentration des contaminants dans les résidus végétaux excède les limites fixées dans le RPRT, ceux-ci seraient alors considérés comme des déchets dangereux. Cependant, aucun cadre réglementaire ou de directive n'assure spécifiquement la gestion des résidus végétaux contaminés et la disposition des métaux lourds ou autres contaminants concentrés dans la rhizosphère ou les racines.

finale appartienne au ministère, et bien qu'il existe plusieurs directives, manuels et consignes pour encadrer la pratique de ces experts⁹, il faut bien constater que le processus comporte plusieurs lacunes en raison, notamment, du peu d'expertise des agents gouvernementaux en matière d'approches biologiques de décontamination. Nul doute que cela contribue au maintien du *statu quo* et provoque une forme d'inertie technologique¹⁰.

Un troisième enjeu réglementaire identifié par (Bert et coll., 2017; Onwubuya et coll., 2009) renvoie aux exigences et objectifs de conformité imposés par la loi et auxquels est soumise l'industrie de la décontamination. Toutes les technologies de décontamination reconnues doivent démontrer qu'elles permettent d'atteindre les standards de la loi. Or, cette démonstration est plus difficile à établir pour les phytotechnologies, en raison notamment du cycle biologique dans lequel elles s'inscrivent ou de la nature même des contaminants qu'elles visent¹¹.

Trudeau (2012) conclut néanmoins que le cadre légal actuel n'empêche pas, mais ne facilite pas non plus, les approches biologiques de la décontamination au Québec. Cela dit, il faut ajouter que le partage des compétences entre le gouvernement du Québec et celui d'Ottawa ne va pas sans compliquer les choses. Dans le contexte où on utilise une combinaison de végétaux/micro-organismes, il faut obtenir des autorisations en vertu des lois fédérales, dont la Loi canadienne sur la protection de l'environnement (LCPE, 2000). Une révision est actuellement en cours de la Politique de protection des sols et réhabilitation des terrains contaminés (PPSRTC, 2017-2021) de façon à favoriser l'utilisation des techniques de phytoremédiation *in situ* (Montpetit et Lachapelle, 2015a). Le plan d'action 2017-2021 de la PPSRTC mentionne en effet que l'un des objectifs du plan est qu'il y ait au moins 75 terrains qui soient traités à l'aide d'une technologie *in situ*. Le plan fait aussi état du souhait du gouvernement d'élaborer un programme d'aides financières pour les technologies vertes qui serait financé par la redevance à l'enfouissement de sols contaminés (MDDELCC, 2017).

9. Trois principales responsabilités sont déléguées aux experts approuvés sur la liste par le MDDELCC : les experts doivent attester: 1) de la réalisation des études de caractérisation conformément au Guide de caractérisation des terrains, 2) de la réalisation du plan de réhabilitation approuvé par le ministre et 3) que la décontamination atteinte permet bien l'usage pour lequel le terrain est destiné. « Ainsi, même s'il a été constaté que la marge de manœuvre laissée à ces experts apparaît bien mince... on peut penser qu'ils exercent de facto un rôle important quant au choix de techniques de réhabilitation d'un sol dans une situation donnée et de la façon dont les travaux seront réalisés. Ces experts sont bien souvent à l'emploi de firmes de consultants qui exécutent par contrat les travaux de réhabilitation des sols. [...] Ils sont donc des acteurs clés de la décontamination des sols au Québec... » (Feidt et coll., 2009)

10. Alors qu'autrefois, un certificat d'autorisation devait obligatoirement être déposé auprès du MDDELCC, et que ce certificat devait être signé par un expert habilité par l'État, ce qui faisait controverse, un plan de réhabilitation remplace aujourd'hui le certificat d'autorisation. C'est le Ministre qui a la responsabilité de l'approuver. Le rôle des experts habilités se résume aujourd'hui à constater la contamination (étude de caractérisation) et à attester que le plan de réhabilitation a bien été suivi et que le niveau de contamination atteint est conforme aux normes associées à l'usage auquel le terrain est destiné. « Ainsi, même s'il a été constaté que la marge de manœuvre laissée à ces experts apparaît bien mince compte tenu du contrôle qu'exerce sur eux le ministère, notamment par l'entremise de directives, de manuels et de consignes qui n'ont pas nécessairement force de loi, mais que le ministère entend faire respecter dans l'exécution des tâches qui leur ont été confiées, on peut penser qu'ils [les experts] exercent de facto un rôle important quant au choix de techniques de réhabilitation d'un sol dans une situation donnée et de la façon dont les travaux seront réalisés. Ces experts sont bien souvent à l'emploi de firmes de consultants qui exécutent par contrat les travaux de réhabilitation des sols qui auront été convenus avec les propriétaires de terrains ou les responsables de la contamination. Ils sont donc des acteurs clés de la décontamination des sols au Québec, du moins lorsque celle-ci est exigée en vertu des dispositions de la Loi, mais ils peuvent aussi être impliqués lorsque la décontamination n'est pas obligatoire. » (Feidt et coll., 2009) Ce bassin d'experts habilités n'est pas énorme au Québec. En 2017, on retrouvait quelques 126 experts habilités par l'État. Pour être accrédités, ces experts doivent cumuler un certain nombre d'années d'expérience de travail en réhabilitation et détenir des connaissances précises. Ils sont pour la plupart à l'emploi de firmes qui offrent des services de réhabilitation dits conventionnels.

11. L'effet toxique d'un polluant du sol vis-à-vis des organismes sera fonction de la concentration totale de ce polluant dans le sol et de sa biodisponibilité. Ce dernier paramètre définit la fraction d'un contaminant qui sera réellement absorbée par un organisme (Montpetit et Lachapelle, 2015a).

4.2 Consensus scientifique méconnu

Les recherches sur les technologies vertes de décontamination ont fait des avancées importantes. À Montréal, un important groupe de chercheurs dans le domaine des phytotechnologies et du génie environnemental y joue un rôle majeur. Sous les auspices de l'IRBV, Montréal a été l'hôte de la 14^e conférence internationale en phytotechnologies en septembre 2017. Le constat qui est ressorti de cette rencontre est que la décontamination par les plantes a dépassé le stade expérimental. Plus encore, la recherche établit que lorsqu'il y a de trop grandes quantités de terres à traiter, les coûts de cette technologie se comparent plus qu'avantageusement à ceux des technologies conventionnelles et constitue une solution efficace pour la réhabilitation des sols :

« En d'autres mots, la phytoremédiation a fait l'objet d'études scientifiques poussées qui n'ont laissé aucun doute quant à la solution bénéfique qu'elle offre pour les sites où le coût de décontamination avec des technologies conventionnelles est prohibitif. » (Montpetit et Lachapelle, 2015a, notre traduction)

Les chercheurs reconnaissent cependant que l'efficacité de la décontamination est variable selon les polluants et les conditions du site (Gupta, Huang, et Corpas, 2013; Leung et coll., 2013). Par ailleurs, la durée relativement plus longue de la décontamination, particulièrement en comparaison avec l'apparente rapidité des techniques d'excavation conventionnelles (Batty et Dolan, 2013), et la difficulté à atteindre les contaminants situés en profondeur (Cameselle, Chirakkara, et Reddy, 2013) font en sorte que la phytoremédiation n'est pas nécessairement adaptée à tous les cas de terrains contaminés. Cependant, comme le résume Montpetit et Lachapelle (2015a et b), la plupart des auteurs cités ici ont identifié des solutions pratiques à chacun des problèmes énumérés. La phytoremédiation fonctionne bien et rapidement pour les contaminants organiques, sur les sites où les concentrations ne sont pas trop élevées. La phytoremédiation fonctionne aussi pour les contaminations aux métaux lourds, mais à des rythmes plus lents et surtout plus variables. La phytoremédiation ne semble pas non plus avoir d'effets négatifs sur les lieux d'intervention. Aucune des études recensées ne mentionnait une détérioration de la contamination après la mise en place des végétaux.

Jusqu'à tout récemment considérée comme une technique émergente, certes prometteuse, mais dont l'efficacité restait mise en doute, la phytoremédiation est maintenant mieux comprise et mieux évaluée. Les recherches ont accru notre compréhension des processus de décontamination, et les conditions à réunir pour son emploi sont mieux cernées. La phytoremédiation est employée avec succès pour la dégradation de polluants organiques dans le sol. « Lorsque certaines conditions sont réunies, il s'agit d'une technologie efficace, beaucoup moins coûteuse, qui présente des avantages au niveau de l'acceptabilité sociale et des gains environnementaux non-négligeables » (Yong, Mulligan, et Fukue, 2014).

Malgré son efficacité dans plusieurs situations et cas précis, la phytoremédiation reste sous-utilisée. Le nombre de projets entrepris avec cette technologie semble disproportionnellement bas en regard du potentiel identifié et reconnu par la communauté scientifique.

4.3 Déficience dans la diffusion des connaissances auprès des experts et des promoteurs

La phytoremédiation est une innovation technologique. Les recherches ont démontré que l'adoption de technologies innovantes n'est pas seulement influencée par l'efficacité de la technologie ou par son coût. Le processus de diffusion des connaissances et des expertises joue aussi un grand rôle dans l'adoption de technologies innovantes. Il importe d'analyser les structures institutionnelles afin de vérifier si l'information correcte (complète et exacte) peut parvenir aux décideurs publics ou privés. Dans le cas contraire, on dit qu'il s'agit de failles de marché dues à des problèmes d'asymétries d'informations, c'est-à-dire des situations d'information incomplète ou imparfaite (Jaffe, Newell, et Stavins, 2005)¹². Cette section présente l'analyse du processus de diffusion des connaissances liées à la phytoremédiation au Québec. Cette analyse est fondée sur les résultats de recherche des professeurs Montpetit et Lachapelle (2015a, 2015b). À partir de ces études, on peut identifier quelles sont les principales sources d'informations des promoteurs ou des décideurs pour la réhabilitation. Inscrites dans les particularités institutionnelles (contexte réglementaire de la décontamination), les constatations permettent d'établir quelles lacunes importantes conduisent à un problème d'asymétries d'information.

4.3.1 Sources d'information des promoteurs

Les principaux promoteurs des projets de réhabilitation de terrains contaminés, souvent des promoteurs immobiliers, sont renseignés par des experts en décontamination généralement issus des milieux du génie environnemental¹³. Le propriétaire de terrain a l'obligation légale de faire approuver le plan de réhabilitation par des experts possédant au moins dix années de pratique dans la décontamination (Trudeau et coll., 2013). On pourrait penser qu'une telle obligation renforce le maintien de l'usage des technologies connues, en raison surtout du caractère complexe (voir section 4.3.2) des connaissances requises pour mener à bien un projet de phytoremédiation. Cette hypothèse est soutenue par les résultats de Montpetit et Lachapelle (2015b). Dans le cadre du projet de recherche Génorem, les chercheurs ont réalisé un sondage auprès d'experts québécois en décontamination pour évaluer leur niveau de connaissances de la phytoremédiation. Les résultats démontrent clairement que les praticiens de la décontamination connaissent peu cette technique et ne la recommandent pas¹⁴. Ces résultats sont aussi ceux obtenus par les chercheurs européens (Chevrier, 2013; Trudeau et coll., 2013).

12. Les auteurs Jaffe, Newell et Stavins (2005) ont publié un excellent article scientifique qui porte sur les défis de la diffusion des connaissances pour l'adoption d'innovations environnementales. Ils identifient avec raison que dans un tel cas, il y a deux failles de marché en présence. Ils en tirent des conclusions fort intéressantes pour la mise en place de politiques publiques incitatives adéquates. Le lecteur intéressé pourra s'y référer pour approfondir la question. « Market failures associated with environmental pollution interact with market failures associated with the innovation and diffusion of new technologies. These combined market failures provide a strong rationale for a portfolio of public policies that foster emissions reduction as well as the development and adoption of environmentally beneficial technology. Both theory and empirical evidence suggest that the rate and direction of technological advance is influenced by market and regulatory incentives, and can be cost-effectively harnessed through the use of economic-incentive based policy. In the presence of weak or nonexistent environmental policies, investments in the development and diffusion of new environmentally beneficial technologies are very likely to be less than would be socially desirable. Positive knowledge and adoption spillovers and information problems can further weaken innovation incentives.»

13. Trudeau et coll. (2013) identifient les experts comme « les acteurs clés de la décontamination des sols au Québec ».

14. De façon plus précise, les chercheurs Montpetit et Lachapelle (2015a) affirment qu'une information factuelle et spécialisée n'est pas encore disponible et qu'ainsi, pour pouvoir déterminer les conditions de terrain propices à la phytoremédiation, il faudrait que les experts en question fassent la lecture d'un large volume d'articles scientifiques qui ne sont pas facilement

4.3.2 Spécificités de la phytoremédiation en matière de connaissances et d'expertise

Certaines caractéristiques spécifiques des technologies vertes de décontamination compliquent leur diffusion auprès des experts. La technologie fait appel à des connaissances et des savoirs souvent externes au domaine traditionnel de la réhabilitation des terrains contaminés. La phytoremédiation nécessite une adaptation au cas par cas pour être efficace. Les experts en décontamination ne détiennent souvent pas les compétences pour adapter les procédés aux conditions de terrain (Bert et coll., 2017). Le manque de formation des experts dans ces domaines augmente le risque d'échec de l'entreprise de décontamination, ce qui contribuera à renforcer l'image d'une technologie encore expérimentale quand il est question de phytoremédiation.

4.3.3 Adéquation des outils d'aide à la décision disponibles

Les outils d'aide à la décision peuvent combler les lacunes d'information pour faire connaître les conditions sous lesquelles la phytoremédiation peut être utilisée. Ils permettent de mieux déterminer et connaître les critères d'utilisation et de mieux cibler les cas adaptés.

Même si la diffusion est encore lente, la connaissance des résultats scientifiques probants peut faire le contrepois aux incertitudes et aux réticences des promoteurs. Les travaux de recherche de Maude Lapointe-Rioux, sous la direction de Michel Labrecque (Lapointe-Rioux, 2015), ont permis de constituer un premier outil d'aide à la décision indiquant aux professionnels de la réhabilitation des terrains contaminés les cas où les phytotechnologies peuvent s'avérer pertinentes. Cet outil vise à réduire le déficit de connaissances vis-à-vis de ces technologies douces.

Un outil similaire est aujourd'hui soutenu par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) (Lapointe-Rioux, 2015) et se construit autour d'un arbre de décisions (Bert et coll., 2017, p. 16). Les décisions à prendre concernent :

- L'objectif souhaité (maîtrise des sources de pollution ou maîtrise et réduction);
- La pollution visée (polluants organiques ou inorganiques);
- La technique à utiliser (phytostabilisation aidée, phyto et rhizo dégradation, phytoextraction);
- La faisabilité technique (caractéristiques du site, contexte, caractéristiques du sol, etc.);
- La faisabilité économique et sociale (compatibilité de la technique avec les objectifs en termes d'exposition résiduelle, temps disponible *vs* temps requis, compatibilité avec le budget envisagé, engagement des acteurs : filière biomasse, collectivités, agriculteurs, population locale, etc.).

Ces outils d'aide à la décision en matière de phytotechnologie constituent certes des instruments précieux. S'ils permettent de mieux tenir compte du temps de décontamination et de mieux

accessibles. Certains outils d'aide à la décision existent, mais sont eux aussi peu connus. Par ailleurs, les chercheurs mentionnent qu'il y a une idée répandue à l'effet que l'efficacité de la phytoremédiation est faible; cette idée décourage les efforts des experts à obtenir une information factuelle additionnelle sur les phytotechnologies.

définir les critères pour cerner l'adéquation entre les conditions initiales et les technologies disponibles, ces outils sont néanmoins encore incomplets, car ils ne peuvent servir à établir la valeur des bénéfices environnementaux ni à fournir des estimations du coût de décontamination (McIntyre et Lewis, 1997; Schnoor, Light, McCutcheon, Wolfe, et Carreia, 1995; Simard, Frenette-Dussault, Benoist, Laplante, et Labrecque, 2017). Des améliorations seraient donc pertinentes pour participer à la meilleure diffusion des connaissances en phytotechnologies auprès des experts. Un premier élément à améliorer concerne l'inclusion du coût final de décontamination¹⁵.

Le second élément de raffinement concerne la mesure des bénéfices environnementaux. Puisque les outils d'aide à la décision sont conçus pour renseigner le promoteur et que rien dans les législations actuelles ne prévoit la reconnaissance de la valeur des services environnementaux, les outils d'aide à la décision passent complètement à côté de l'estimation des bénéfices environnementaux. C'est pourtant l'avantage distinctif de la décontamination verte (McIntyre et Lewis, 1997; Schnoor et coll., 1995; Simard et coll., 2017).

4.4 Faiblesse du soutien public

L'absence de prise en compte des bénéfices et co-bénéfices environnementaux que produisent les phytotechnologies (amélioration de la qualité de l'air, lutte aux îlots de chaleur, réduction des eaux de ruissellement et amélioration du paysage) explique sans doute également en partie la rareté du recours à la phytoremédiation. Il s'agit d'externalités qui ne sont pas rémunérées par les marchés. Pour les promoteurs privés, cet avantage peut facilement être négligé. Pour un propriétaire public, c'est une préoccupation qui est de moins en moins ignorée et c'est ce qui justifie l'intervention de l'État¹⁶. Ainsi, même dans l'hypothèse où la phytoremédiation serait non-rentable financièrement pour le propriétaire privé (ce qui n'est pas vérifié), le soutien public à la phytoremédiation peut être justifié par plusieurs motifs : le potentiel de création d'emplois, le positionnement futur stratégique dans une industrie appelée à croître, mais surtout, la prise en compte des externalités, qu'elles soient positives ou négatives, de nature environnementale ou autre, prise en compte dictée par l'intérêt général. À la lumière de nos recherches, nos résultats préliminaires indiquent que les bénéfices environnementaux spécifiques aux projets de phytoremédiation, qui sont actuellement occultés, sont probablement très élevés et compensent certainement leurs coûts. Ceci est d'autant plus vrai que les coûts associés à la phytoremédiation sont relativement modestes¹⁷.

Jusqu'ici, les analyses (Genorem, ADEME) tentant d'évaluer la rentabilité de l'adoption des phytotechnologies ont surtout abordé la question sous l'angle de la rentabilité privée, du point de vue du promoteur. Nous croyons que c'est une erreur d'évaluer la rentabilité des projets de phytoremédiation sur la seule base de la rentabilité financière privée. Il faut déplacer le point de vue de l'analyse des investissements à un niveau plus large pour que la prise de décision soit efficace

15. Une estimation brute du coût final de décontamination pourrait être déterminée à partir des travaux de Lapointe-Rioux (2015), qui a estimé le temps de décontamination selon diverses conditions. En effet, même si le coût de décontamination est variable selon un grand nombre de paramètres, on sait que ce coût final du projet de phytoremédiation sera proportionnel à son temps de décontamination.

16. Les co-bénéfices environnementaux sont des externalités positives. Une externalité correspond à une influence exercée par un agent économique sur un ou plusieurs autres agents, mais non prise en compte par le système de prix. Dans le cas d'externalité positive, le bénéfice privé (ici les gains fonciers du propriétaire du terrain) est inférieur au bénéfice social (ici la somme des gains fonciers, des bénéfices sociaux liés à la réhabilitation et des co-bénéfices environnementaux). Une intervention de l'État, via une subvention ou un programme d'investissements par exemple, permet de combler ce fossé.

17. L'étude de Ventix (2009) parle de coûts entre 10 et 14\$/m², soit dix fois moins cher que la décontamination opérée via les procédés conventionnels.

et tienne compte de tous les facteurs, et surtout, des gains là où ils se situent, c'est-à-dire au plan collectif et pour l'intérêt général.

Prise de décision en matière de réhabilitation

En effet, la réhabilitation par les technologies vertes des terrains contaminés permet de réaliser, lorsque celle-ci s'opère en milieu urbain ou péri-urbain, des bénéfices environnementaux qui ne sont pas pris en considération par les acteurs privés et bien souvent négligés par les analyses et outils d'aide à la décision. Au strict plan conceptuel de l'analyse économique, on peut établir que cela renvoie à une faille de marché, car les bénéfices environnementaux ne font pas l'objet de transactions sur les marchés.

Puisque la prise de décision concernant le choix de la technologie de réhabilitation repose sur un modèle défini seulement en fonction de la perspective des acteurs privés (promoteurs), ses gains sociaux et environnementaux supplémentaires ne sont pas retenus dans le processus décisionnel. Étant donné les faibles coûts associés à la réhabilitation verte, plusieurs projets de réhabilitation verte deviennent rentables pour la société¹⁸ dès lors que les externalités sont considérées dans le calcul.

Selmi, Weber, et Mehdi, (2017) mettent en évidence l'intérêt de tenir compte de la valeur ajoutée de la phytoremédiation. Comparativement à la technique d'excavation (*dig-and-dump*) qui ne fait que déplacer des quantités de terres contaminées destinées à être traitées ailleurs et ultérieurement, la phytoremédiation permet de solutionner le problème de contamination *in situ* et produit au passage une multitude d'avantages, notamment environnementaux. Ce sont les co-bénéfices : amélioration de la qualité de l'air, captation et séquestration du carbone, lutte aux îlots de chaleur, amélioration du paysage, réduction de la perméabilité de sols¹⁹. Mais cet avantage distinctif, même s'il est mentionné systématiquement en préambule des études portant sur la phytoremédiation, n'est à peu près jamais quantifié de façon rigoureuse (Selmi, Weber, et Mehdi, 2017). Les expertises nécessaires pour les quantifier et les intégrer demeurent peu répandues (Lavallée, 2006). Il y a là un défi de taille pour l'analyse économique que le cadre conceptuel de l'économie écologique et de la mesure des services écologiques peut relever.

La quantification des services écologiques constitue en effet un bon moyen d'inclure les gains environnementaux (externalités) dans la prise de décision. On définit les services écologiques comme étant les bénéfices que retirent les humains des écosystèmes sans avoir à agir pour les obtenir (Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire [ÉÉM], 2005). Des outils de calcul sont aujourd'hui disponibles pour quantifier plusieurs des services écologiques généralement associés aux arbres urbains. Le logiciel i-Tree, développé par le département de l'Agriculture des États-Unis (United States Department of Agriculture - USDA), en est un excellent exemple²⁰. En traduisant

18. À l'image du coût de l'inaction en matière de changements climatiques identifié par (Stern, 2007), on peut également considérer qu'il y a un coût à laisser les terrains contaminés en friche. Les risques de pertes sont faibles pour les autorités lorsqu'on considère l'ensemble des gains (environnementaux et sociaux). Les gains environnementaux compensent fort probablement les investissements, surtout pour les terrains de propriété publique (municipale ou autre). Par ailleurs, la non-intervention et l'attente représentent également un coût occulté pour les autorités publiques : on se prive d'un flux de bénéfices environnementaux et on reporte à plus tard les revenus fonciers liés à la réhabilitation des terrains.

19. La phytoremédiation fait appel aux notions de multifonctionnalité des territoires, mieux connues dans le domaine de l'agriculture (Vatn, 2002), et de ce fait, son évaluation est plus complexe.

20. Voir [<https://www.itreetools.org>].

au moyen de divers indicateurs les caractéristiques de la canopée²¹ urbaine, le logiciel peut fournir des estimations de valeur pour les services de séquestration et de stockage de carbone, pour la diminution des eaux de ruissellement et pour la rétention des polluants atmosphériques et des effets bénéfiques sur la santé humaine qui en découlent. Une fois la valeur de ces services écologiques estimée, on peut ensuite rétribuer les promoteurs par des paiements pour services environnementaux (PSE). Ce type de programme, qui fait partie des outils associés à l'écofiscalité, a démontré son efficacité dans plusieurs cas, notamment en ce qui concerne la préservation de la biodiversité ou la conservation des ressources hydriques²².

21. Étendue du couvert végétal formé par les arbres et arbustes sur un territoire. Voir à ce sujet le *Plan d'action canopée* de la Ville de Montréal.

22. On peut penser aux exemples tels que le réseau Natura 2000 qui rassemble des sites naturels et semi-naturels de l'Union européenne, les projets de financement LIFE qui vise la protection de la biodiversité et le programme de lutte à la déforestation en Ouganda (voir article <https://www.ledevoir.com/societe/environnement/503955/financer-la-forestation-en-afrique-nouvelle-strategie-contre-le-rechauffement>).

5. Modèle PhytoVAN

5.1 Le cadre méthodologique de l'analyse avantages-coûts avec quantification des services écologiques

La quantification des services environnementaux constitue un instrument utile à la construction d'un cadre d'analyse qui permette de prendre en compte les contributions des diverses parties prenantes aux interventions de réhabilitation. Ce cadre doit permettre de mieux cerner le caractère durable des différentes techniques de décontamination. Parmi les méthodes d'évaluation socio-économique disponibles, on retrouve l'analyse multi-critères (AMC)²³, l'analyse de cycle de vie (ACV) et l'analyse avantages-coûts (AAC) (Choquette, 2015). Onwubuya et coll. (2009) ont réalisé une importante étude comparative des différentes méthodes d'évaluation²⁴ et recommandent d'utiliser des méthodes d'évaluation englobantes, pouvant inclure les bénéfices sociaux. Bert et coll. (2017) ont aussi réalisé une recension des techniques d'évaluation économique utilisées pour les projets de phytoremédiation. Toutes ces études signalent le fait que l'intégration des dimensions sociales et environnementales requiert une expertise de pointe et une démarche sophistiquée. Les États-Unis ont procédé à une évaluation de l'empreinte environnementale des différentes techniques de remédiation et le projet SURF au Royaume-Uni met l'accent sur la nécessité d'intégrer les dimensions économiques, sociales et environnementales (Soderqvist et coll., 2015).

Nous avons pour notre part choisi la méthode de l'analyse avantages-coûts avec quantification des biens et services environnementaux pour évaluer la durabilité de la phytoremédiation et pour fournir un outil de comparaison avec les techniques conventionnelles de décontamination. Il s'agit d'une technique d'évaluation de projets largement utilisée. L'association ISO travaille présentement à établir une standardisation des évaluations de la durabilité des activités de remédiation (ISO 2014), mais les résultats des travaux ne sont pas encore connus. L'ADEME, en France, propose également d'évaluer les projets de réhabilitation au moyen d'analyse avantages-coûts.

Plusieurs instruments sont aujourd'hui disponibles pour quantifier les impacts environnementaux de façon adéquate. Les logiciels américains i-Tree évoqués plus haut et les logiciels en accès libre de la suite InVEST, issus du Natural Capital Project soutenu par l'Université Stanford, rendent non seulement possible, mais aussi facilement accessible la quantification du capital naturel. Plusieurs études ont utilisé le cadre de l'analyse avantages-coûts pour aborder les enjeux de la réhabilitation des sols (Compernelle, Van Passel, et Lebbe, 2013; Guerriero, Bianchi, Cairns, et Cori, 2011; Lemming, Friis-Hansen, et Bjerg, 2010; Mishra, Hitzhusen, Sohngen, et Guldmann, 2012; van Wezel, Franken, Drissen, Versluijs, et Van den Berg, 2008). La méthode de l'AAC possède un avantage comparatif sur les analyses de type ACV et AMC : elle permet de colliger

23. L'AMC revêt toute son importance lorsque d'importants enjeux distributifs sont en jeu. Un programme de soutien à la phytoremédiation, qu'il prenne la forme d'une subvention ou qu'il soit constitué d'un programme d'investissements publics, aura vraisemblablement des impacts redistributifs que l'on devra considérer. Cette question dépasse toutefois le mandat du présent rapport. Par ailleurs, puisque les projets de décontamination des sols sont des projets avec coûts concentrés et bénéfices diffus, on peut estimer que les enjeux d'équité intergénérationnelle priment sur ceux liés à la distribution des revenus.

24. Ces auteurs ont comparé les méthodes d'évaluation économiques de l'ACV et l'AMC, mais n'ont étonnamment pas considéré l'AAC. Ils ont postulé que les bénéfices environnementaux associés à la phytoremédiation étaient difficilement quantifiables. Pourtant, des outils performants existent aujourd'hui, tels que i-Tree et InVEST.

des informations chiffrées utiles à la constitution d'un cas d'affaires, advenant l'identification de procédés biologiques qui satisferaient aux critères de la rentabilité financière privée.

5.2 Description du modèle PhytoVAN

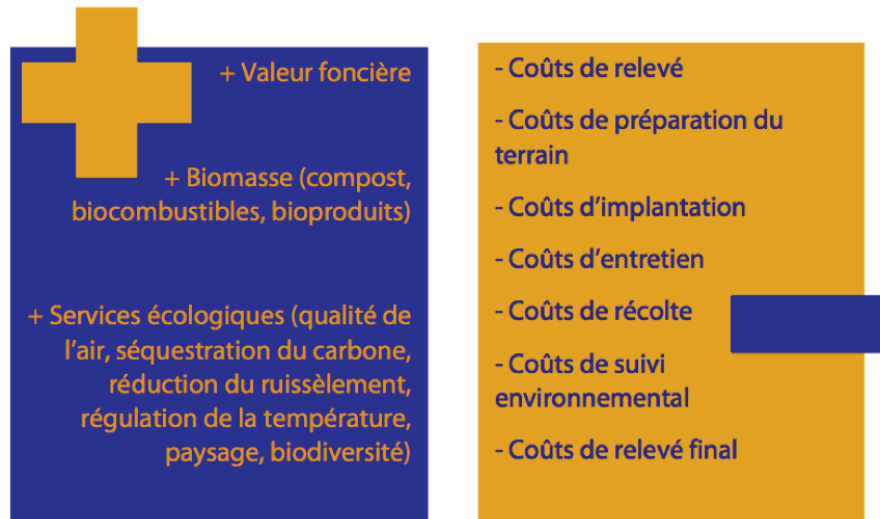
L'IRÉC a mis au point un outil d'analyse économique des bénéfices et des coûts générés par la phytoremédiation d'un terrain urbain contaminé. L'objectif du modèle PhytoVAN est de contribuer à améliorer l'identification des combinaisons optimales de plantes et de micro-organismes en quantifiant les paramètres économiques du procédé biologique de décontamination. L'analyse est réalisée sous les angles de l'intérêt public et de celui de l'investisseur privé. Trois principaux aspects y sont couverts: la valeur marchande du terrain en fin de projet, la valeur marchande de la biomasse récoltée et la quantification des biens et services environnementaux fournis par le nouvel écosystème implanté, depuis le début et tout au cours de son évolution jusqu'à la fin du processus de décontamination ou restauration. Le modèle PhytoVAN permet de quantifier les coûts liés aux choix et usages de différentes combinaisons de plantes et d'organismes dans des contextes spécifiques. PhytoVAN est donc un outil qui permet d'estimer le bénéfice social net découlant de projets de revitalisation de friches industrielles. Le modèle permet en outre de collecter les données nécessaires au calcul du taux de retour sur investissement et à la constitution d'un cas d'affaires.

Tableau 2. Liste des coûts et avantages inclus dans le modèle PhytoVAN et méthodes d'estimation

Coûts / Avantages	Méthodes d'estimation
Coûts totaux	Colligés en cours de projet et projections, variables selon les heures, coûts fixes forfaitaires
Décontamination du terrain	Prix hédoniques (via l'amélioration de la valeur des terrains)
Biomasse produite	Valeur nette de la biomasse récoltée basée sur les projections de croissance des espèces à l'essai et des prévisions de prix pour chaque débouché possible
Services écologiques <ul style="list-style-type: none"> • Séquestration et/ou stockage du carbone • Réduction du volume d'eaux de ruissellement • Amélioration de la qualité de l'air (effets de santé humaine) • Réduction du volume d'eaux de ruissellement • Réduction des effets des îlots de chaleur 	Estimations obtenues <i>via</i> le logiciel i-Tree selon le volume de biomasse annuel

Le schéma ci-dessous fournit la liste des avantages (+) et des coûts (-) pris en compte dans le modèle.

Schéma 2. Avantages et coûts pris en compte par le modèle PhytoVAN



Encadré 1 : Banc d'essai en phytoremédiation de l'Est

Quelques faits ...

- Implantation sur quatre sites industriels de l'Est de Montréal, superficie d'un hectare chacun
- Contamination principalement de type organique et répartition hétérogène
- Expérimentation et suivi sur quatre années
- Technologie de 30 000 arbres par hectare



La mise au point du modèle et son premier domaine d'application sont le fruit d'une collaboration entre les chercheurs de l'IRBV et ceux de l'IRÉC. L'estimation des coûts et des bénéfices est obtenue par un travail de collecte et de synthèse de données expérimentales fournies par le banc d'essai en phytoremédiation dans l'Est de Montréal.

Les coûts sont établis en colligeant les heures de travail requises pour chaque étape d'intervention (les coûts variables) auxquelles sont ajoutés les coûts fixes liés notamment à l'utilisation de machinerie et de matériel ou aux montants forfaitaires de préparation de terrain. En ce qui concerne les bénéfices, le modèle se fonde sur les projections de croissance des végétaux (quantités estimées de biomasse végétale).

PhytoVAN permet aussi d'estimer la quantité de biomasse produite par un projet de réhabilitation verte. Ces quantités de biomasse peuvent être utilisées comme intrants dans différentes filières industrielles, que ce soit à titre de matière structurante pour le compostage ou à titre de matériaux pour l'exploitation de divers extractibles utilisés dans les différents domaines de la chimie verte.

5.3 Résultats préliminaires

Des résultats préliminaires ont été obtenus à partir des données expérimentales de l'année 1 du site numéro 1 du banc d'essai en phytoremédiation de l'Est. Ces résultats suggèrent des coûts d'un peu moins de 20\$/m², des coûts compatibles avec ceux cités par l'étude de Ventix (2009) qui étaient d'environ 10 à 14\$/m². Par ailleurs, selon les prévisions de croissance des végétaux, les estimations préliminaires concernant les bénéfices liés aux services écologiques seraient entre 3 et 30\$/m²/an²⁵. On comprend donc que même sous l'hypothèse d'un scénario conservateur les projections de croissance des végétaux (quantités estimées de biomasse végétale), les coûts d'investissement sont compensés au bout de sept ans d'expérimentation par les seuls bénéfices liés aux services écologiques. Ces résultats seront à raffiner par la constitution de séries de données colligées sur plusieurs années et par la comparaison des divers contextes d'utilisation (type de contaminants, caractérisation des sols, etc.).

Des estimations des bénéfices liés à la production de biomasse sont également à inclure au modèle. Pour les calculer, nous avons besoin des prix de chaque débouché envisagé. Mais puisque les prix actuels des débouchés ne tiennent pas compte des potentiels de développement de nouvelles filières, les bénéfices se trouvent probablement sous-estimés. La section suivante traite des effets de synergie que l'on peut attendre de la chaîne de valeur de la chimie verte et du travail à accomplir pour en tenir compte adéquatement.

25. Ces estimations ont été obtenues en réalisant un transfert de bénéfices de l'étude de Hamstead, Kremer et Mcphearson (2015) sur la valeur de la canopée urbaine réalisée à New York. Cette étude estimait des valeurs par arbres en termes de services écologiques entre 1\$ et 10\$ par arbre par année.

Conclusion : détailler la chaîne de valeur de la chimie verte

Plusieurs études récentes font référence au potentiel de production de biomasse et de chimie verte associée avec la phytoremédiation. Une recherche sur l'économie circulaire au Québec (Teigeiro, Solar-Pelletier, Bernard, Marcelin et Normandin, 2018) identifiait les effets de levier potentiels à tirer parti des symbioses industrielles. Toutefois, il manque des bases empiriques pour établir rigoureusement la mesure des potentiels économiques de ces filières émergentes. C'est à fournir ces bases que sert le modèle PhytoVAN. Les données recueillies sur le banc d'essai, de même que l'analyse conceptuelle qu'elles ont commencé à rendre possible laissent entrevoir un très fort potentiel de développement pour cet instrument et son utilité comme outil d'aide à la décision. Le développement du modèle PhytoVAN vise à intégrer la chaîne de valeur des bioproduits à l'évaluation des projets de phytoremédiation

Plusieurs éléments d'analyse doivent être pris en compte, à commencer par celui qui a trait à la caractérisation de la biomasse considérée comme extrait de phytoremédiation. Dans une note d'intervention, Noël Fagoaga (2017), chercheur à l'IRÉC, en présente les différents débouchés : des extractibles ou molécules plateformes à forte valeur ajoutée jusqu'aux commodités telles que l'éthanol ou le biodiesel. Des recherches menées par l'IRBV (Brereton et coll., 2017) ont pu démontrer tout le potentiel de valorisation de la biomasse issue de la décontamination. On comprend que la chaîne de possibilités est très diversifiée. Plus on avance dans la chaîne de valeur, plus la valeur ajoutée est grande, ce qui exige que soit prise en compte l'évolution des coûts totaux de production. Cela suppose le déploiement dans le temps de plusieurs scénarios d'intervention, chaque scénario mesurant un ensemble précis de variables (types de contaminants, superficies sous traitements, types de végétaux utilisés, etc.).

Par ailleurs, comme on sait qu'en stade expérimental et de recherche et développement, les coûts sont plus élevés et qu'ils baissent généralement lors d'une application à plus grande échelle, l'utilité du banc d'essai n'en est que plus grande encore. La possibilité d'intervenir sur des superficies s'approchant au plus près des contextes d'intervention sur friches industrielles existantes permet de mieux cerner l'ensemble des paramètres économiques de l'intervention. À ce titre, le travail en cours peut être considéré comme une nécessité incontournable pour asseoir les bases d'une véritable industrie de la phytoremédiation, et le banc d'essai considéré comme une infrastructure stratégique de premier plan.

Les travaux en cours laissent clairement entrevoir qu'une mobilisation des chercheurs solidement appuyée par les responsables gouvernementaux et les divers propriétaires de terrains contaminés peut favoriser la réduction d'un grave passif environnemental. Plus encore, considérée à la lumière de l'expertise détenue par l'équipe qui s'affaire au développement du banc d'essai en phytoremédiation, l'intensification des efforts et la multiplication des interventions de décontamination peut s'avérer une occasion exceptionnelle de combiner avancement scientifique, transfert technologique et innovation économique.

La Ville de Montréal et le gouvernement du Québec pourraient trouver dans le recours aux diverses technologies de phytoremédiation un avantage concurrentiel unique et les moyens de faire

une contribution significative à l'amélioration de la qualité de l'environnement et à la construction du développement durable.

Bibliographie

- Batty, L. C. et Dolan, C. (2013). The Potential Use of Phytoremediation for Sites With Mixed Organic and Inorganic Contamination. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 43(3), 217–259. <https://doi.org/10.1080/10643389.2011.604254>
- Bert, V., Douay, F., Faure, O. et Cadière, F. (2017). *Les Phytotechnologies appliquées aux sites et sols pollués (nouveaux résultats de recherche et démonstration)*. Angers.
- Brereton, N., Berthod, N., Laffleur, B., Pedneault, K., Pitre, F. et Labrecque, M. (2017). Extractable phenolic yield variation in five cultivars of mature short rotation coppice willow from four plantations in Quebec. *Industrial Crops and Products*. 97 (2017) 525–535.
- Cameselle, C., Chirakkara, R. A. et Reddy, K. R. (2013). Electrokinetic-enhanced phytoremediation of soils: Status and opportunities. *Chemosphere*, 93(4), 626–636. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.06.029>
- Chevrier, É. (2013). Mémoire- La phytoremédiation, une solution d’avenir pour le Québec. *Centre Universitaire de Formation En Environnement, Université de Sherbrooke*, 91 pp. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Choquette, M. (2015). *Proposition méthodologique. Évaluation développement durable des stratégies de décontamination*. Université de Monrécoll.
- Compernelle, T., Van Passel, S. et Lebbe, L. (2013). Bioremediation: How to deal with removal efficiency uncertainty? An economic application. *Journal of Environmental Management*, 127, 77–85. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.04.016>
- Fagoaga, Noël (2017). « Les éléments pour le développement d’une économie biosourcée - Une définition, une vision », Note d’intervention de l’IRÉC, no 54, mai 2017. <http://www.irec.net/index.jsp?p=76>
- Feidt, C., Denys, S., Floch-Barneaud, A., Caboche, J., Dor, F., Dabin, C. et Tack, K. (2009). Biodisponibilité des polluants du sol : définition, caractérisation et utilisation potentielle dans la gestion des sites et sols pollués. *Rencontres Nationales de La Recherche Sur Les Sites et Sols Pollués*, 7pp.
- Guerriero, C., Bianchi, F., Cairns, J. et Cori, L. (2011). Policies to clean up toxic industrial contaminated sites of Gela and Priolo: a cost-benefit analysis. *Environmental Health*, 10(1), 68. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-10-68>

- Gupta, D. K., Huang, H. G. et Corpas, F. J. (2013). Lead tolerance in plants: strategies for phytoremediation. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(4), 2150–2161. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1485-4>
- Hamstead, Z., Kremer, P. et Mcphearson, T. (2015). Advancing urban ecosystem service assessment for urban planning. New York.
- Hébert, J. et Bernard, J. (2013). *Bilan sur le gestion des terrains contaminés au 31 décembre 2010*. Québec. Retrieved from <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/sol/terrains/bilan/bilan2010.pdf>
- Jaffe, A. B., Newell, R. G. et Stavins, R. N. (2005). A tale of two market failures: Technology and environmental policy. *Ecological Economics*, 54(2–3), 164–174. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.12.027>
- Lapointe-Rioux, M. (2015). *Conception d'un outil d'aide à la décision en phytoremédiation*. École de technologie supérieure (ÉTS).
- Lavallée, S. (2006). *Les terrains contaminés au Québec: quels sont les risques pour les prêteurs?* Montréal. Retrieved from <https://www.cirano.qc.ca/pdf/publication/2006RB-01.pdf>
- Lemming, G. Friis-Hansen, P., et Bjerg, P. L. (2010). Risk-based economic decision analysis of remediation options at a PCE-contaminated site. *Journal of Environmental Management*, 91(5), 1169–1182. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.01.011>
- Leung, H.-M., Wang, Z.-W., Ye, Z.-H., Yung, K.-L., Peng, X.-L. et Cheung, K.-C. (2013). Interactions Between Arbuscular Mycorrhizae and Plants in Phytoremediation of Metal-Contaminated Soils: A Review. *Pedosphere*, 23(5), 549–563. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(13\)60049-1](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(13)60049-1)
- Martel, G. (2006). *Bilan et analyse du programme Revi-Sols*.
- McIntyre, T. et Lewis, G. M. (1997). The advancement of pytoremediation as an innovative environmental technology for stabilization, remediation, or restoration of contaminated sites in canada: A discussion paper. *Journal of Soil Contamination*, 6(3), 227–241. <https://doi.org/10.1080/15320389709383562>
- MDDELCC. Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés : Plan d'action 2017-2021, Gouvernement du Québec § (2017). <https://doi.org/ISBN2-551-18001-5>
- Mishra, S. K., Hitzhusen, F. J., Sohngen, B. L. et Guldmann, J.-M. (2012). Costs of abandoned coal mine reclamation and associated recreation benefits in Ohio. *Journal of Environmental Management*, 100, 52–58. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.01.021>

- Montpetit, É. et Lachapelle, E. (2015a). Can policy actors learn from academic scientists? *Environmental Politics*, 24(5), 661–680. <https://doi.org/10.1080/09644016.2015.1027058>
- Montpetit, É. et Lachapelle, E. (2015b). Information, Values and Expert Decision-Making: The Case of Soil Decontamination. *Policy Sciences*.
- OCETA. (2008). *STATE OF CANADA'S BROWNFIELD REDEVELOPMENT INDUSTRY A Review of Canada's Progress in Response to the National Round Table on the Environment and the Economy's 2003 National Brownfield Redevelopment Strategy*. Ottawa. Retrieved from http://www.canadianbrownfieldsnetwork.ca/PDF/FINAL_REPORT-State_of_Canadian_Brownfield_Redevelopment_Industry_for_NRTEE_by_OCETA-March_31-08.pdf
- Onwubuya, K., Cundy, A., Puschenreiter, M., Kumpiene, J., Bone, B., Greaves, J., ... Müller, I. (2009). Developing decision support tools for the selection of “gentle” remediation approaches. *Science of the Total Environment*, 407(24), 6132–6142. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.08.017>
- Schnoor, J. L., Light, L. A., McCutcheon, S. C., Wolfe, N. L. et Carreia, L. H. (1995). Phytoremediation of organic and nutrient contaminants. *Environmental Science et Technology*, 29(7), 318A–323A. <https://doi.org/10.1021/es00007a002>
- Selmi, W., Weber, C. et Mehdi, L. (2017). Multifonctionnalité des espaces végétalisés urbains.
- Simard, C., Frenette-Dussault, C., Benoist, P., Laplante, R. et Labrecque, M. (2017). An economic evaluation of phytoremediation projects of eastern Montreuil. In *14th International Phytotechnologies Conference*. Montrécoll.
- Soderqvist, T., Brinkhoff, P., Norberg, T., Rosen, L., Back, P.-E. et Norrman, J. (2015). Cost-benefit analysis as a part of sustainability assessment of remediation alternatives for contaminated land. *Journal of Environmental Management*, 157, 267–278. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.04.024>
- Stern, N. (2007). *The Economics of Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511817434>
- Teigeiro, S., Solar-Pelletier, L., Bernard, S., Marcelin, J. et Normandin, D. (2018). *Économie circulaire au Québec: Opportunités et impacts économiques*. Montrécoll.
- Trudeau, H., Diarra, M. et Guilbault, M.-É. (2013). La phytoremédiation ou la décontamination du sol par les arbres : réflexions à la lumière des contextes normatifs québécois et français applicables à la réhabilitation des terrains contaminés. *Barreau Du Québec - Développement Récents En Droits de L'environnement*, 370(2013).

- van Wezel, A. P., Franken, R. O. G., Drissen, E., Versluijs, K. C. W. et Van den Berg, R. (2008). Societal Cost–Benefit Analysis for Soil Remediation in The Netherlands. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 4(1), 61. https://doi.org/10.1897/IEAM_2007-034.1
- Vatn, A. (2002). Multifunctional agriculture: some consequences for international trade regimes. *European Review of Agriculture Economics*, 29(3), 309–327. <https://doi.org/10.1093/eurrag/29.3.309>
- Yong, R. N., Mulligan, C. N. et Fokue, M. (2014). *Sustainable Practices in geoenvironmental Engineering, Second Edition*. (C. Press, Ed.).

Annexe

Le tableau ci-dessous présente les acteurs de la phytoremédiation, leur rôle respectif par rapport à la décision de réhabilitation et les bénéfices ou coûts encourus par chacun. Il nous indique dans quelle mesure les différents acteurs de la phytoremédiation sont concernés différemment par les niveaux de bénéfices. Par exemple, le propriétaire n'est affecté que par les gains liés à la décontamination alors que les résidents sont concernés également par les co-bénéfices environnementaux et sociaux. L'implantation de mécanismes de transfert entre les acteurs²⁶ pourrait permettre de corriger les failles de marché liées aux externalités. Mais ces transferts seront pertinents seulement si les bénéfices sociaux dépassent les coûts totaux. Seule une quantification complète, que l'on peut réaliser via une analyse avantages-coûts, permet de valider ce postulat.

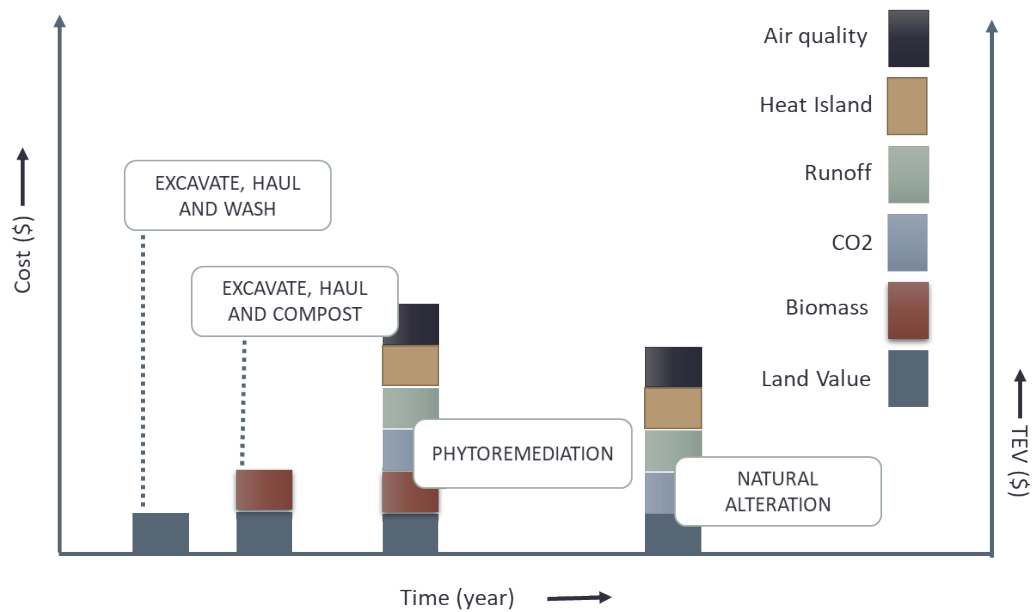
Tableau A1. Catégories d'acteurs affectés par la phytoremédiation et bénéfices potentiels

Acteurs	Pré-requis	Bénéfices tirés de la phytoremédiation
Propriétaire	Possède le terrain	Décontamination du terrain qui pourra alors être utilisé pour divers projets
Autorité publique	Doit déterminer la façon de gérer les sites contaminés	La phytoremédiation est une méthode peu coûteuse de décontamination. La production de biomasse est facile à mettre en place et fournit une source d'énergie renouvelable. La combinaison de la production de biomasse et la décontamination de terrains permettant le développement de projets urbains ou péri-urbain fournit des bénéfices économiques pour la région ou la municipalité.
Industriel	A causé la contamination et est intéressé ou contraint à décontaminer	La phytoremédiation est une méthode peu coûteuse de décontamination. La production de biomasse est facile à mettre en place et fournit une source d'énergie renouvelable.
Résidents	Prêts à payer pour l'amélioration de la qualité de l'environnement et du voisinage	Développement (immobilier ou espace public) qui augmente l'attractivité de la zone Source d'énergie propre Sols et environnement propres

26. L'idée de ce mécanisme de transfert a été développée par l'économiste Ronald Coase, qui proposait qu'un système de compensation pouvait solutionner les problèmes d'externalités. Mais un tel système peut voir le jour seulement si les coûts de mise en place du mécanisme de compensation, les coûts de transaction, ne dépassent pas les gains liés à l'internalisation. L'État peut jouer un rôle dans la réduction des coûts de transaction afin de favoriser la mise en place de tels mécanismes de compensation.

La figure 1 ci-dessous montre la relation qui existe entre le coût de la technologie et la durée du processus. Ainsi, on constate que les techniques conventionnelles sont très rapides, mais aussi très chères. Une étude québécoise réalisée par la firme Ventix avait quant à elle fait état de coûts de décontamination s'élevant à 85\$-140\$/m², soit environ dix fois moins cher que les technologies douces de remédiation. Les procédés de décontamination biologiques quant à eux sont moins chers mais sont généralement plus longs. Les recherches de l'IRÉC (Selmi et coll., 2017) ont permis de mettre en relief cependant une seconde relation. Les technologies de décontamination biologiques produisent davantage en termes de bénéfices sociaux et environnementaux, ici quantifiés via l'approche de la valeur économique totale (VET). L'outil SCORE, développé en Suède, avait d'ailleurs démontré que les technologies dites douces présentent un ratio bénéfices/coûts supérieur au ratio des techniques conventionnelles.

Figure 1. Coûts, durée et valeur économique totale des méthodes de décontamination



Adaptation of Reynolds et al. (1999)

Source : Simard et coll. 2017

