



INSTITUT DE RECHERCHE EN ÉCONOMIE CONTEMPORAINE

*Noel Fagoaga  
Jonathan Ramacieri*


**NOTE D'INTERVENTION**

**La mise à l'échelle des méthodes de décontamination  
Un cadre d'analyse**

**Novembre 2021**

Économiste à l'IRÉC, Jonathan Ramacieri possède une maîtrise en économie de l'Université du Québec à Montréal ainsi qu'un baccalauréat en économie et finance de la même institution. Il est l'auteur de plusieurs travaux d'analyse dans le domaine de l'environnement et du transport.

Chargé de projets à l'IRÉC, Noël Fagoaga possède une maîtrise en génie des bioprocédés de l'EBI (École de biologie industrielle) en France et une maîtrise en environnement et développement durable de l'Université de Montréal. Il travaille sur les enjeux liés à l'énergie, l'environnement et le développement bioindustriel, notamment sur les filières de valorisation de la biomasse et traitement des matières résiduelles.



© Institut de recherche en économie contemporaine  
ISBN 978-2-924927-68-7

Dépôt légal — Bibliothèque nationale du Québec, 2021  
Dépôt légal — Bibliothèque nationale du Canada, 2021

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

## Table des matières

1. Introduction	4
2. Les scénarios	6
3. Méthodologie	6
4. Évaluation	7
<i>I. Scénario global du projet de banc d'essai</i>	7
<i>II. Scénarios de décontamination surfacique</i>	8
<i>III. Scénarios de décontamination en profondeur ;</i>	11
5. Conclusion	12

La relance et le redéveloppement industriel de l'Est de Montréal passent obligatoirement par la restauration et la réhabilitation des sites contaminés qui constituent actuellement un obstacle majeur à toute reconversion de la vocation économique du territoire. Pour maximiser les avantages stratégiques de l'Est, il faut un vaste plan de décontamination qui saura disposer de l'héritage toxique de son passé industriel et transformer son passif environnemental en avantage stratégique. Un tel plan permettra de réparer des dommages environnementaux, de rendre disponibles et sécuritaires de nouveaux sites industriels et, du coup, d'en améliorer la valeur foncière et les revenus qu'elle peut générer pour la Ville de Montréal. La bioremédiation et ses différentes sous-spécialités dont la phytoremédiation, peuvent contribuer à rendre moins coûteuses et plus socialement acceptables les opérations de décontamination dont les méthodes conventionnelles peuvent souvent engendrer des nuisances indésirables (bruits, poussières, transport lourd, lixiviats, etc.). Les récentes annonces concernant l'octroi de subventions pour la décontamination de l'est de Montréal<sup>1</sup> rendent plus pertinentes que jamais les analyses sur le potentiel et les avantages économiques de l'approche par phytoremédiation.

Le banc d'essai de l'Est de Montréal a été créé dans le but de tester différentes méthodes de décontamination par phytoremédiation adaptées au contexte du territoire. Les chercheurs de l'Institut de recherche en biologie végétale (IRBV) y mènent des travaux qui ont permis de constituer une base de données qui alimentent les analyses menées par les chercheurs de l'IREC, analyses touchant les divers enjeux économiques soulevés par l'application des divers scénarios d'intervention. Les chercheurs de l'IREC ont mis au point un instrument d'analyse (PhytoVan) capable de mesurer la portée des différentes approches et, surtout, de mieux définir les paramètres de mise à l'échelle. L'outil a servi à bien montrer l'importance d'une bonne analyse des services écosystémiques<sup>2</sup> (BSE) associés aux interventions de phytoremédiation pour juger du rendement et de la rentabilité économique de ces dernières. Des notes précédentes ont permis 1) de définir le processus de phytoremédiation<sup>3</sup>, 2) de

<sup>1</sup> <https://montreal.ca/programmes/subvention-pour-la-rehabilitation-de-terrains-contamines-dans-lest-de-montreal#pg-multi-volet-1>

<sup>2,3</sup> Réhabilitation des sols contaminés et phytoremédiation - Le modèle PhytoVan et la mesure des services écosystémiques (Note de recherche) Caroline Simard

décrire l'outil phytoVAN<sup>4</sup>; 3) de fournir l'analyse des premiers résultats des interventions menées sur le banc d'essai<sup>5</sup>. La compilation des données colligées au terme d'une cinquième année d'expérimentation, il est désormais possible et pertinent de jeter les bases d'une analyse des conditions de mise à l'échelle pour intervenir sur site industriel contaminé.

Dans l'objectif d'un transfert des connaissances et d'une évaluation de la portée des meilleures pratiques élaborées par les chercheurs de l'IRBV dans le cadre des travaux réalisés à l'échelle du banc d'essai, nous proposons une analyse économique de différentes méthodes d'intervention dans le contexte d'un passage à l'échelle réelle dans le contexte de l'Est de Montréal.

La présente note vise donc à évaluer différents scénarios d'intervention à grande échelle capables de répondre aux besoins de décontamination de terrains industriels, des scénarios applicables aussi bien dans l'Est de Montréal qu'ailleurs au Québec.

Chaque scénario proposé renvoie à l'utilisation de différentes techniques de décontamination mises à l'essai par l'équipe de Michel Labrecque de l'IRBV. L'utilisation de l'outil Phytovan permet l'analyse comparative de la viabilité économique des différents types de méthodes proposées.

<sup>4</sup> Le banc d'essai en phytoremédiation : premiers résultats partiels et perspectives économiques (Note de recherche) Fagoaga et Ramacieri

<sup>5</sup> PhytoVan : Pour l'évaluation économique d'une infrastructure verte, le banc d'essai en phytoremédiation (Fiche technique) Fagoaga et Ramacieri

De manière à pouvoir mieux différencier chaque pratique selon les types de décontamination rencontrées sur le terrain, plusieurs voies de traitement ont été explorées. Nous avons donc identifié cinq scénarios qui seront comparés selon que les interventions reposent sur l'utilisation de méthodes manuelles ou sur l'utilisation de machinerie.

### **I. Scénario global du projet de banc d'essai ;**

### **II. Scénarios de décontamination surfacique**

*A. Par microboutures (0 - 0,5 m) ;*

*B. Par macroboutures horizontales (0 – 0,75 m) ;*

*C. Par méthode classique (0 – 1 m) ;*

### **III. Scénarios de décontamination en profondeur ;**

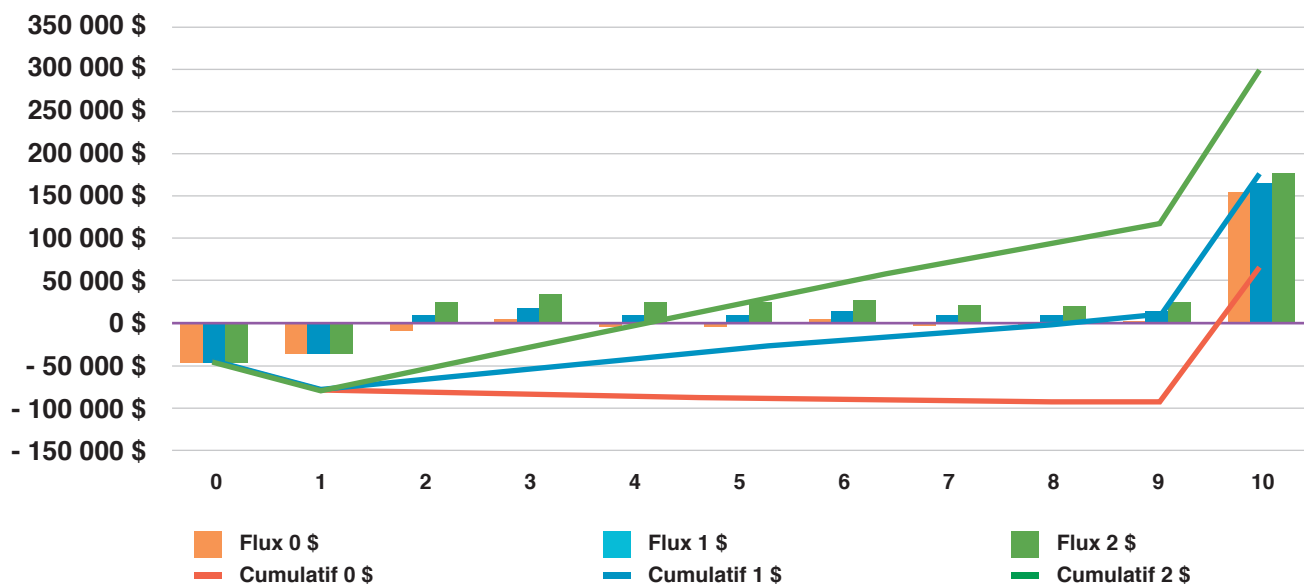
Les données récoltées et utilisées dans l'outil phytoVAN sont définies selon le type de bouture utilisé, ce qui rend possible l'analyse puis la mise à l'échelle des 16 000 arbres par hectare du terrain. Au bout de 10 ans, on s'attend qu'une nouvelle analyse du terrain (quel que soit le type de bouture utilisé) permette de modifier la classification du terrain, le faisant passer à une catégorie correspondant à la baisse du niveau de décontamination observé, ce qui engendre un gain en valeur foncière et en taxes afférentes.

Pour chaque scénario, des biens et services écosystémiques de 0\$, 1\$ et 2\$ par arbre sont utilisés pour démontrer la variabilité de la rentabilité selon l'importance que l'on accorde aux biens et services écosystémiques. Également, nous utilisons un taux d'actualisation de 4 % pour actualiser les flux monétaires futurs.

L'implantation des boutures et leur croissance se transforment en définitive en biomasse. Pour chacun des scénarios, les revenus de la récolte et les coûts afférents en machinerie sont comptabilisés, et ce, à chaque 3 ans.

## I. Scénario global du projet de banc d'essai

Avant de caractériser et d'analyser les différentes approches en phytoremédiation, nous mettons à jour notre scénario global qui implique l'ensemble des boutures plantées jusqu'à présent. L'ajout d'une année supplémentaire de données – on se retrouve désormais à la moitié du terme du banc d'essai – va nous permettre de préciser les résultats des simulations passées.



En ne prenant pas en compte les valeurs attribuées aux Biens et services écologiques (BSE), la rentabilité du processus passe obligatoirement par l'amélioration de la valeur foncière du terrain. À quelques centaines de dollars près d'être rentable une année plus tôt, la rentabilité lors de la prise en compte des BSE à 1\$ est atteinte officiellement à la 9e année. Ces résultats sont semblables aux précédents, malgré un léger allongement pour les BSE à 1\$, qui s'explique par la mise à l'échelle du terrain à 16 000 arbres plutôt que 20 000 comme prévu auparavant.

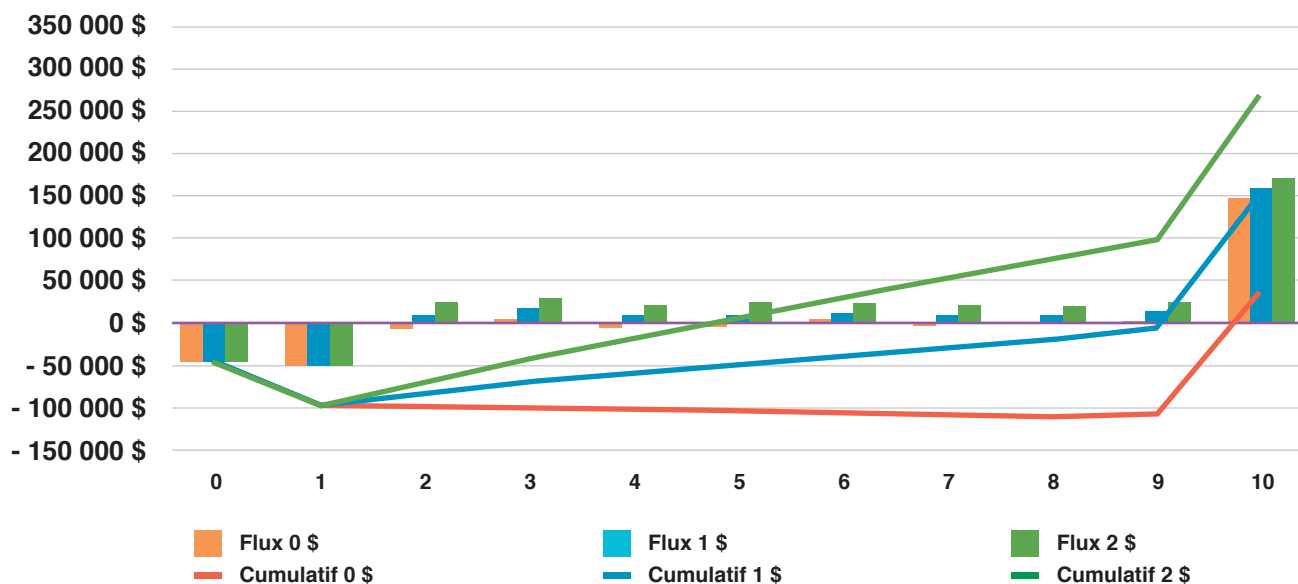
Lorsque l'on prend compte d'une évaluation des biens et services écosystémiques de 2\$ par arbre, la rentabilité du processus est atteinte comme lors des évaluations antérieures, en 4 ans, malgré une réduction de 4 000 arbres. L'importance que nous accordons aux biens et services de la nature (énergie, réduction de CO2, air, eau, esthétisme, etc.) est un élément qui définit la vitesse à laquelle on rentabilise le processus.

## II. Scénarios de décontamination surfacique

### A. Par microboutures (0 - 0,5 m) ;

Notre premier scénario renvoie à une décontamination surfacique qui s'effectue grâce au système racinaire développé par les microboutures de saules (5 cm) et de peupliers (15 cm). La technique est très exigeante lors de l'implantation car les boutures doivent être immergées dans un lit de compost de 15 cm d'épaisseur.

L'approche par microboutures peut être optimisée avec l'utilisation de trèfles ou de BRF (Bois Raméal Fragmenté) ainsi qu'au coût d'utilisation de la machinerie.



Les résultats nous montrent une rentabilité pour l'intervention en phytoremédiation à l'horizon de 10 ans peu importe que l'on ignore la valeur des BSE ou qu'on les évalue à 1\$. Les coûts plus importants en début de cycle ont raison du décalage de 1 an (évaluation des BSE à 1\$) par rapport à notre scénario global.

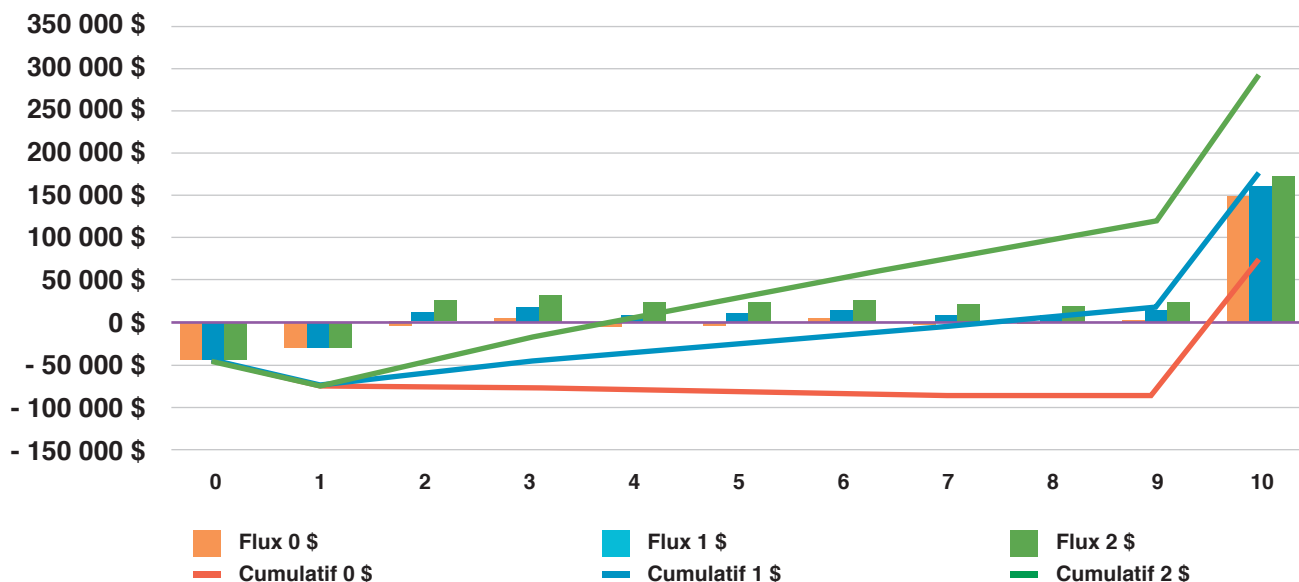
La rentabilité avec évaluation des BSE à 2\$ survient à la 5e année, soit 1 an plus tard que pour le scénario global compte tenu des coûts fixes plus importants à l'implantation seulement (la récolte ne détruit pas le système racinaire en place).



## B. Par macroboutures horizontales ( 0 – 0,75 m ) ;

La deuxième approche de décontamination surfacique utilise cette fois-ci le système racinaire développé par des macroboutures horizontales. L'implantation nécessite le creusage de plusieurs tranchées, d'environ 15 cm de profondeur et séparées de 1 m, où doivent être déposées les unes à la suite des autres les macroboutures. Le tout doit être recouvert de compost. À maturité, les tiges atteignent une hauteur de 1,5 à 2,5 m.

L'optimisation s'effectue ici aussi avec l'utilisation de la machinerie et du trèfle ou BRF. Le processus est toutefois facilement mécanisable, mais demande beaucoup de désherbage et arrosage les 2 premières années.

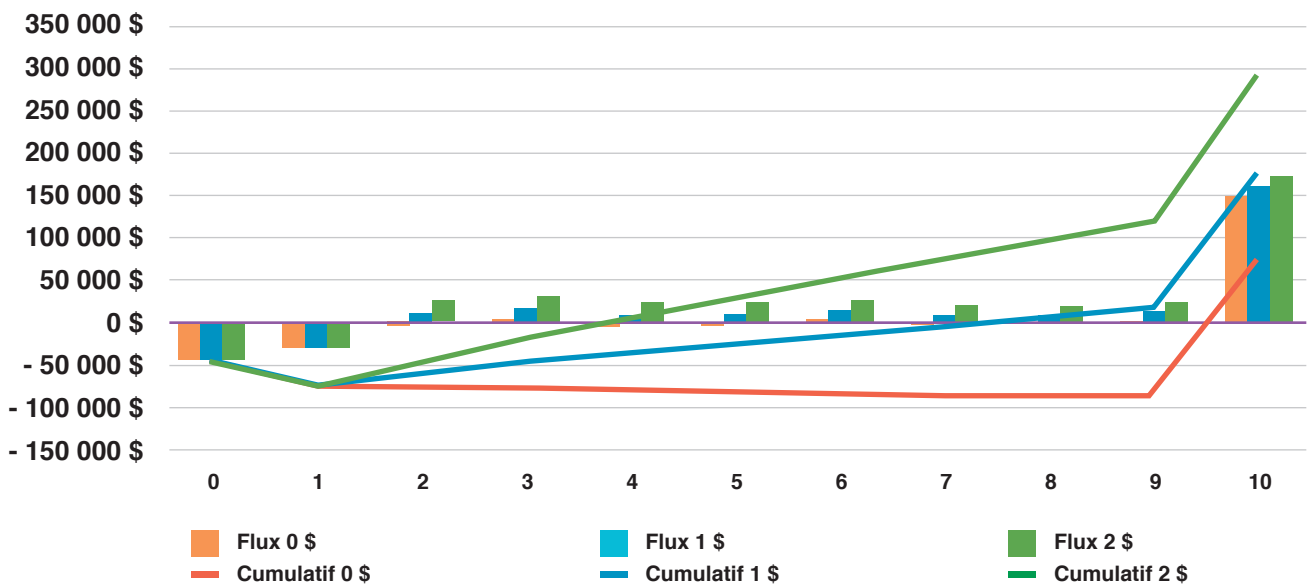


En n'accordant aucune valeur aux biens et services rendus par les arbres plantés, on doit attendre ici aussi l'augmentation de la valeur foncière du terrain à la 10e année. La rentabilité survient cependant à la 8e année en prenant compte de biens et services écosystémiques à 1\$, soit 2 ans avant le scénario précédent (microbouturage), en raison des coûts d'entretien plus faibles lors de la première année pour les macroboutures horizontales.

La prise en compte des BSE à 2\$ accélère encore ici la rentabilité du processus à 4 ans, comme pour notre scénario global.

### C. Par méthode classique (0 – 1 m) ;

La dernière approche de décontamination surfacique fait intervenir le système racinaire développé par les boutures de saules (20-50 cm) et de peupliers (15 cm). Lors de l'implantation, les boutures doivent être immergées de moitié verticalement dans du compost de 15 cm d'épaisseur. Cette technique de plantation est mécanisée au Québec et dans les pays scandinaves.



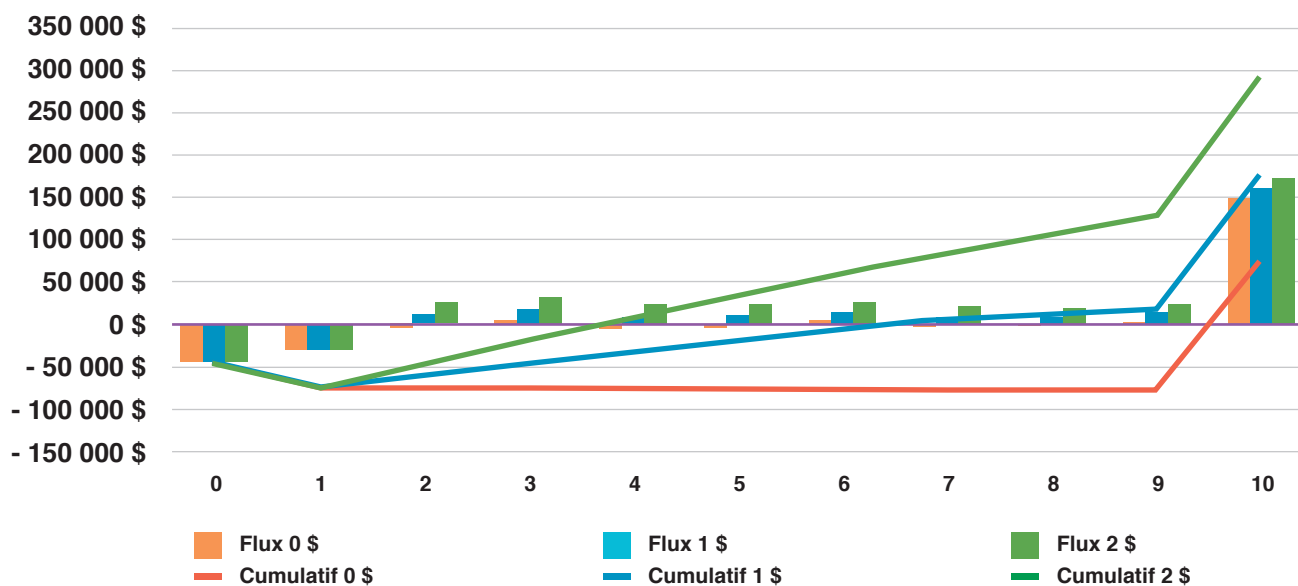
Les résultats nous montrent des résultats semblables à notre scénario global, démontrant une rentabilité pour l'intervention en phytoremédiation à l'horizon 10, 8 et 4 ans selon que l'on prenne en compte une évaluation des biens et services écosystémiques de 0\$, 1\$ ou 2\$ par arbre planté.

Cette technique est plus coûteuse lors de la première année par rapport au scénario précédent (macrobouturage horizontal) mais la somme des coûts actualisés est moins élevée au terme des 10 ans.

### III. Scénarios de décontamination en profondeur ;

Le processus de décontamination en profondeur (1 à 2,5 m) est une technique prometteuse qui fonctionne bien lorsque le sol est bien meuble et peu rocheux. L'implantation nécessite le forage de trous de 1 à 1,2 m de profondeur, où l'on glisse une longue tige de 1,5 m avant de remplir le trou de compost.

Cette technique n'est cependant pas applicable si le sol contient trop de grosses roches ou si la dalle rocheuse affleure trop.



La rentabilité du processus avec BSE à 1\$ survient à la 7e année, étant donné les coûts initiaux plus faibles par rapport aux autres approches, et survient 1 an avant notre scénario global. La rentabilité avec prise en compte de BSE à 0\$ et 2\$ survient encore une fois ici au bout de 10 et 4 ans.

Cette technique s'est révélée la moins coûteuse d'après le banc d'essai et s'avère la plus rentable au bout de 10 ans.

## Des enseignements pour le développement de projets de phytoremédiation

À la lumière des derniers résultats, il apparaît que la prise en compte et le niveau attribué à la valeur des biens et services écosystémiques et la valeur foncière sont toujours déterminants en ce qui concerne l'impact de l'intervention sur les changements affectant la valeur foncière. Les coûts d'entretien et d'installation diffèrent selon les scénarios et font varier les coûts et le rythme de récupération des investissements. Les résultats confirment néanmoins que quelle que soit la profondeur de contamination, jusqu'à une limite de 2,5 m, la phytoremédiation est une voie viable et intéressante pour les futurs projets de décontamination au Québec.

Avec une mise à l'échelle et de nouveaux projets ambitieux, tels que le projet de décontamination de l'Est de Montréal, la phytoremédiation pourrait ainsi devenir une solution économiquement et environnementalement viable. Les différents types de méthode d'intervention permettent également de répondre par des solutions différenciées et adaptées spécifiquement aux différents contextes et degrés de contamination. Ces différentes méthodes peuvent être complémentaires à d'autres interventions plus conventionnelles comme le « dig & dump » ou d'autres voies biologiques comme l'usage de bactéries ou la mycoremédiation pour une réelle approche intégrée de bioremédiation.

Contrairement aux autres méthodes d'établissement des coûts et de calcul de rentabilité dans l'évaluation des méthodes conventionnelles, PhytoVAN établit les calculs sans incorporer aucune forme de soutien public ou subvention directe. Cet outil ne considère que les revenus tirés de la valorisation de la biomasse, ceux issus des biens et services écosystémiques et de l'accroissement de la valeur foncière. Cela ouvre donc la porte, pour les collectivités et les entreprises polluantes, à trouver des voies de mise en valeur des territoires post-industriels altérés par l'activité humaine qui peuvent se financer à des conditions qui ne grèvent pas les finances publiques.

Le recours à la phytoremédiation est envisageable et rentable sans subventions directes. Elle peut en outre devenir une solution d'aménagement et de verdissement, remplissant ainsi deux fonctions urbaines importantes. La valorisation du terrain en vue d'en faire un endroit paysager nécessite des investissements initiaux correspondant entre autres au nivelage du terrain, à l'ajout de terreau, à l'emploi de main-d'œuvre et des matériaux. Les coûts varient en fonction des aménagements paysagers voulus (en infrastructure de parcs et mobilier), en verdissement (semences et arbres), selon la présence d'une desserte piétonne ou autre,

l'ajout d'une clôture, etc. La somme des coûts pour la municipalité peut rapidement dépasser<sup>6</sup> ceux des premières années de phytoremédiation en analyse de terrain, implantation et entretien initial et demeure dans un contexte de non-décontamination et de renonciation à des revenus économiques et fonciers futurs. Le recours à la phytoremédiation dans ce cas permet en quelque sorte de faire une opération jumelée : transformer un site détérioré en espace vert et en espace de recomposition d'un actif foncier.

Étant conscient que le type de contamination peut être différent et qu'une mise en œuvre massive de ce type d'intervention demanderait des capitaux initiaux pour permettre une intervention ciblée, il est important de trouver des solutions capables, pour la collectivité, de réduire le fardeau environnemental et économique tout en captant un maximum la valeur créée par une telle intervention.

## Des pistes de solution

Le gouvernement du Québec et la Ville de Montréal souhaitent aller de l'avant en investissant 100 millions de dollars pour la décontamination de terrains essentiellement situés dans l'Est montréalais<sup>7</sup>. Ces fonds publics pourraient être utilisés pour renforcer la capacité de décontamination et mener des actions d'envergure s'ils étaient confiés à une structure hybride, sans but lucratif, impliquant acteurs locaux et usagers de ces territoires. Elle permettrait une intervention ciblée capable de répondre aux différentes contraintes de contamination et de développement du territoire. Cette structure aborderait l'ensemble des terrains à décontaminer avec une vision globale qui modulerait les choix technologiques à privilégier en fonction des caractéristiques de chacun des sites et selon les préoccupations des différentes parties prenantes en cause.

Une telle approche et une telle organisation permettraient de réunir les divers acteurs pour élaborer des réponses adaptées et valoriser les meilleures pratiques. Le choix pourrait être fait des meilleurs moyens à prendre pour répondre aux enjeux de contamination des terrains (en surface ou en profondeur) et les adapter à des aménagements spécifiques à chaque contexte local. Il s'agirait de traiter des enjeux en privilégiant la meilleure technologie pour le contexte, bref en appliquant une approche d'optimisation multifactorielle. Une telle approche d'ensemble nécessite certainement un plus grand investissement initial de caractérisation et de planification mais elle permettra un meilleur usage des ressources et l'établissement d'attentes de résultats adaptées à chaque projet.

<sup>6</sup> Par exemple, selon un coût de 1\$ par pied carré ou environ 100 000\$ par hectare

<sup>7</sup> [http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?\\_pageid=5798,42657625&\\_dad=portal&\\_schema=PORTAL&id=32291](http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=5798,42657625&_dad=portal&_schema=PORTAL&id=32291)

### *Pour chaque site,*

1. Une **enquête** sur l'historique du site devra être réalisée afin de mieux identifier les contaminants potentiels. Connaissant l'histoire du site, il est plus simple et plus économique de définir les analyses nécessaires.
2. Une **analyse agronomique** du site (texture, fertilité, pH) permettant d'identifier les améliorations pédologiques nécessaires à la croissance des végétaux. Les sols de friches industrielles sont souvent minéralisés, lourds et pauvres en matière organique.
3. Un **criblage** du terrain basé sur l'historique de chaque site afin de bien quadriller le site et de faire les analyses de contaminants ciblés sur plusieurs niveaux de profondeurs.
4. Une **planification de l'intervention** selon la localisation des poches de contamination et privilégiant la technologie la plus économique, environnementalement adaptée selon les caractéristiques du site et à sa problématique de contamination.
5. Une **mise en œuvre** du plan de décontamination et l'optimisation par des techniques de phytogestion pour les phytotechnologies. Il sera nécessaire de chercher sans cesse à optimiser la croissance des plantes afin d'améliorer leurs capacités phytoremédiatrices : recépages cycliques, fertilisation, densité de plantation.

### *Au niveau du territoire d'intervention,*

1. Un **plan de valorisation de la biomasse** pour définir les conditions à réunir pour fournir une biomasse à un coût réduit pour des marchés locaux comme cela a déjà été évoqué dans une note précédente<sup>8</sup>.
2. Un **plan d'approvisionnement en fertilisants et amendements (compost, etc.)** afin de valoriser les matières organiques produites au niveau municipal, commercial ou industriel.
3. Un **plan de verdissement** capable de pouvoir identifier les besoins en verdissement du territoire et d'évaluer les biens et services écosystémiques d'une telle intervention pour la communauté visée.
4. Un **plan de transformation foncière** capable d'évaluer les revenus potentiels pour la structure créée.

<sup>8</sup> Le banc d'essai en phytoremédiation : premiers résultats partiels et perspectives économiques (Note de recherche) Fagoaga et Ramacieri

Un plan de décontamination d'un territoire se ferait donc par le biais d'une agence indépendante dont l'objectif serait à la fois de réaliser une décontamination adaptée au plan de développement du territoire concerné mais aussi de réaliser des choix soutenables économiquement et environnementalement afin de pérenniser son action en minimisant le besoin d'intervention du gouvernement.

## **Une approche transposable et exportable**

Si le banc d'essai répond à une question très montréalaise de la décontamination de terrains industriels, cette approche pourrait être un atout pour d'autres contextes territoriaux. Ainsi, de nombreuses localités sont aux prises avec des terrains contaminés hérités d'activités industrielles passées et dont l'état de détérioration constitue un obstacle d'aménagement important. L'approche ici proposée permettrait d'ajuster les solutions de bioremédiation capables de mieux correspondre aux enjeux environnementaux locaux.