

Le banc d'essai en phytoremédiation: premiers résultats partiels et perspectives économiques

Noël Fagoaga

Jonathan Ramacieri

JANVIER 2019

Notices biographiques

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.

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. Ses études de deuxième cycle ont porté notamment sur la comparaison de l'efficacité des systèmes de santé provinciaux canadiens.

© Institut de recherche en économie contemporaine

ISBN 978-2-924927-20-5 (PDF)

ISBN 978-2-924927-21-2 (version imprimée)

Dépôt légal — Bibliothèque nationale du Québec, 2019

Dépôt légal — Bibliothèque nationale du Canada, 2019

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

Mise en contexte

Cette note a pour ambition d'esquisser les éléments de base d'une démonstration de la viabilité économique de l'utilisation des phytotechnologies dans le cadre de la décontamination de terrains en plus de servir de base pour une nouvelle vocation bioindustrielle dans l'Est de Montréal.

Depuis 2016, l'Institut de recherche en biologie végétale (IRBV), avec le soutien de la Ville de Montréal, dispose d'un banc d'essai en phytoremédiation situé dans l'arrondissement Rivière-des-Prairies/Pointe-aux-Trembles. Cette infrastructure verte est un équipement technologique de pointe destiné à l'expérimentation et au transfert technologique. Son programme de travail vise à tester diverses avenues d'utilisation des plantes aux fins de décontamination et restauration des terrains, en particulier les terrains industriels. Le banc d'essai produira les connaissances essentielles qui permettront de transformer le passif environnemental de l'Est de Montréal en actif stratégique.

Les phytotechnologies peuvent, en effet, devenir la pierre angulaire d'une vocation bioindustrielle de remplacement des énergies fossiles par l'utilisation de molécules biosourcées. Sur des superficies qui atteindront l'an prochain quatre hectares, les chercheurs de l'IRBV mènent des travaux de recherche à la fine pointe de la science, qui portent en particulier sur les performances des plantations de végétaux pour la réhabilitation des sols contaminés. Le site a permis de transformer une friche urbaine, mal perçue par la population, en espace vert où se déploie, sous les allures d'un aménagement paysager, un équipement de haute technologie. Le banc d'essai poursuit un programme scientifique dont les résultats vont permettre de soutenir une relance industrielle par le développement d'une filière pouvant servir de point d'appui à une stratégie de diversification centrée sur la chimie verte. Dans une note de recherche publiée en 2018, Caroline Simard a tracé à grands traits les contours du développement des phytotechnologies¹.

Les protocoles expérimentaux suivis depuis la création du banc d'essai ont permis d'élaborer une base de données qui sert à la définition de divers scénarios d'utilisation des plantes en fonction de leur potentiel de décontamination. Ces résultats seront par la suite transposables aux terrains industriels de grande surface. Ce transfert

1. SIMARD, Caroline (2018). Réhabilitation des sols contaminés et phytoremédiation - Le modèle PhytoVan et la mesure des services écosystémiques., Note de recherche de l'IRÉC, avril 2018. https://irec.quebec/ressources/publications/Note_recherche_phyto-avril_2018.pdf

technologique vise à produire des données probantes pour établir la performance globale de méthodes d'intervention qui constituent des alternatives aux méthodes conventionnelles centrées sur l'excavation et le traitement hors site. Les données biologiques sont consignées selon une grille très élaborée d'indicateurs qui vont permettre de mesurer les performances de décontamination et d'établir les paramètres de base des régies de culture appropriées à l'état des sols et à la sélection des végétaux. La constitution de séries annuelles fournit le matériau de base à l'analyse des résultats et, éventuellement, à l'élaboration des critères d'optimisation des interventions de restauration et de décontamination.

Afin d'arriver à de premières estimations de la performance et du rendement économique de l'évaluation, la présente note se divise en deux parties :

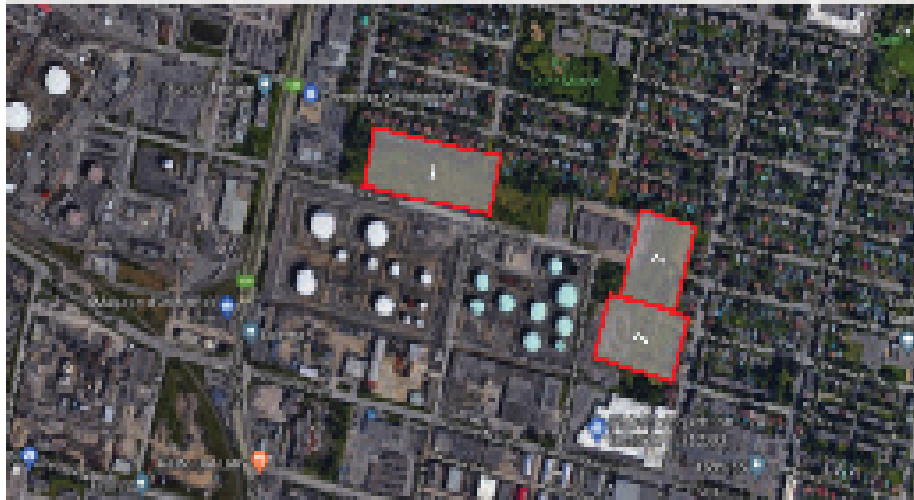
1. L'analyse des résultats partiels de phytoremédiation à l'aide du modèle d'analyse PhytoVan ;
2. Les estimations de rendement économique à partir de la valorisation des extrants des interventions de phytoremédiation, c'est-à-dire de la biomasse produite.

LE BANC D'ESSAI EN PHYTOREMÉDIATION

À terme, le banc d'essai aura une superficie totale de quatre hectares qui permettra éventuellement à la Ville de Montréal de se positionner comme un des chefs de file dans le domaine de l'économie verte et des technologies environnementales.

LES SITES

Les sites se trouvent dans l'arrondissement Rivière-des-Prairies/Pointe-aux-Trembles. À la limite entre zones résidentielles et industrielles.

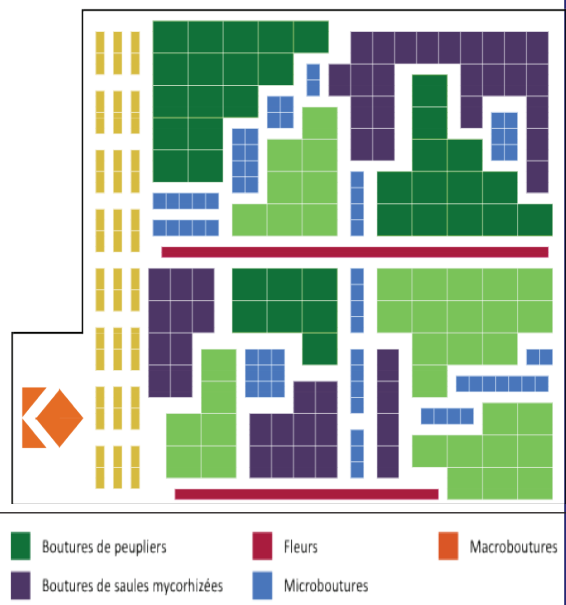


LES ACTIVITÉS

Pour la mise en œuvre et le suivi du banc d'essai, l'IRBV effectue :

1. La préparation du terrain ;
2. La collecte d'échantillons de sol pour la caractérisation ;
3. La délimitation de parcelles expérimentales ;
4. La plantation d'espèces végétales ;
5. La récolte de données : production de biomasse, densité de plantation, mesures morphométriques et la capacité de phytoextraction.

Les parcelles expérimentales donnent lieu à de nombreuses pratiques innovantes concernant l'utilisation de plusieurs types de plantations (saules, peupliers, herbacées), de modes de plantations (micro et macroboutures) et l'utilisation de mycorhizes.



LES PREMIERS RÉSULTATS

Les résultats, bien qu'encore préliminaires, semblent indiquer que les différentes variétés de plantes utilisées se soient bien établies, que l'extraction de contaminants inorganiques (éléments traces) par les plantes soit effective et répond aux objectifs fixés. Le projet jouit d'une grande acceptabilité auprès des résidents.

Table des matières

Mise en contexte	i
CHAPITRE 1	
Évaluation économique de projets de phytoremédiation	1
1.1 La méthodologie	1
1.2 Les scénarios	5
1.3 Les enseignements	7
CHAPITRE 2	
La biomasse, un extrait valorisable	9
2.1 Les voies de valorisation	10
2.2 Le potentiel économique	11
CONCLUSION	
Perspectives	13



CHAPITRE 1

Évaluation économique de projets de phytoremédiation

Dans des travaux précédents, l'IRÉC a mis au point un instrument d'analyse et d'aide à la décision qui permet de mesurer la performance économique corrélative à l'efficacité et au rythme de décontamination des divers protocoles. Le modèle PhytoVan rend possible la construction de scénarios mesurant la rentabilité des investissements réalisés en recourant aux phytotechnologies et ce, en fonction des vitesses de décontamination et des seuils de restauration recherchés.

Les données recueillies à ce jour ne donnent que des résultats partiels, mais ils sont suffisamment étoffés pour rendre possible l'élaboration de premiers scénarios mesurant la rentabilité de projets d'intervention. Cela s'effectue en tenant compte des premières compilations de coûts réels des opérations réalisées, des volumes de biomasse produite et en se référant à la littérature scientifique disponible. Le modèle permet également de mesurer et d'utiliser la valeur économique des biens et services écosystémiques (BSE) rendus par les plantations en cours de croissance de même que l'effet d'appréciation de la valeur foncière produit en cours de décontamination. Aux fins de l'exercice, un horizon de dix ans a été déterminé, la phytoremédiation pouvant produire une grande part de ses effets dans sur échelle temporelle allant de quatre à plus de dix ans.

1.1 La méthodologie

Mis au point dans le cadre d'un mandat réalisé pour le compte du Service de développement économique de Montréal, l'instrument d'aide à la décision PhytoVan², est un modèle d'analyse économique mis au point pour évaluer la portée des divers projets réalisés au banc d'essai. Le modèle repose sur une comptabilisation fine des coûts associés à un projet de décontamination et sur les revenus que celle-ci génère, aussi bien par la biomasse produite que par l'amélioration de la valeur foncière du terrain à décontaminer de même que sur la valeur économique des biens et services écosystémiques rendus par la plantation.

La base des données d'expérimentation étant encore trop récente – trois années – le rythme et les niveaux de décontamination ne peuvent être établis avec précision. Il faudra des séries plus longues pour les établir avec certitude. Les coûts sont cependant établis avec précision et connus

2. Ibid.

dans le détail. Le niveau de revenus prévisible peut être estimé avec des projections réalistes. Dans une approche conservatrice basée sur diverses indications fournies par la littérature scientifique, une durée de dix ans sera donc ici retenue afin de faire ressortir les premières tendances appuyées sur les données empiriques d'estimation des coûts. Cela nous permettra de tirer des conclusions préliminaires et de mieux comprendre le poids des facteurs à maîtriser pour passer des tests à une véritable mise à l'échelle industrielle.

SCHÉMA 1 : AVANTAGES ET COÛTS PRIS EN COMPTE PAR LE MODÈLE PHYTOVAN



1.1.1 Valeur actuelle nette

La valeur actuelle nette (VAN) est un outil permettant de calculer la rentabilité d'un projet d'investissement en procédant à la sommation des flux de trésorerie actualisés. Pour le cas qui nous intéresse, on cherche à savoir si les divers bénéfices que l'on peut tirer de la phytoremédiation sont assez importants pour couvrir les investissements initiaux et subséquents.

La particularité de cet outil demeure l'actualisation, permettant de prendre en compte la valeur relative de l'argent dans le temps. À l'aide d'un taux d'actualisation, on peut ainsi calculer l'importance relative des sommes qui seront mobilisées tout au long du processus. La formule est la suivante :

$$VAN = \sum_{t=0}^T \frac{(Recettes - dépenses)_t}{(1 + \text{taux d'actualisation})^t}$$

où t est l'année en cours et T la dernière année du projet (ici 10 ans). Le taux d'actualisation, qui doit représenter le coût du capital, est de 4 % pour notre étude. Lorsque la valeur actuelle nette est positive, le projet est rentable et on considère qu'il doit être entrepris. Cette méthode est celle qui est utilisée pour le modèle PhytoVan.

1.1.2 Estimation des coûts

La mise en place du projet engendre des coûts fixes et d'exploitation. Les coûts fixes comprennent au préalable l'analyse du sol pour déterminer les niveaux de contamination et la mise en norme du site pour l'implantation de boutures. On ajoute également les coûts d'acquisition et d'utilisation de matériel servant à préparer le terrain pour la remédiation (équipement lourd et de terrain). Ces coûts sont dits fixes puisque leur occurrence est unique et ne dépendent pas du niveau d'activité sur le site.

Les coûts d'exploitation sont établis sur les étapes de préparation, d'implantation et d'entretien de la plantation et sur ceux de la récolte 1) La préparation du terrain qui comprend le nettoyage des allées, la délimitation des parcelles et le cordage. 2) L'implantation et la plantation de boutures ou de semences. 3) L'entretien comprend l'arrosage et le désherbage du terrain. 4) La récolte comporte deux opérations : le fauchage et la collecte de la biomasse.

1.1.3 Revenus fonciers

Un des effets économiques les plus directs de la décontamination des sols porte sur le changement du niveau de classification des usages autorisés. Le processus de décontamination s'étend dans le temps et produit donc un effet progressif qui a pour conséquence le changement de la cote attribuée au terrain selon son degré de contamination. En passant d'un degré de classification (il en existe au moins quatre) à un autre, ce terrain change de statut et produit des niveaux de revenu foncier différents. Une des caractéristiques de PhytoVan est de mesurer l'augmentation de la valeur foncière et des nouveaux revenus de taxes foncières qui lui sont associés en fonction de la vitesse et du degré de décontamination produit selon les différentes solutions de phytoremédiation. Aux fins d'expérimentation et pour tenir compte de la très courte période d'accumulation des données concernant la décontamination, nous avons posé l'hypothèse où la classification d'un terrain soumis à un processus de phytoremédiation par plantation de saules passerait de C (passablement contaminé) à B (faiblement contaminé). Selon les critères en usage sur le territoire de l'Est de Montréal, nous avons considéré une valeur foncière de 270 000 \$ pour un terrain d'un hectare comme c'est le cas actuellement pour une telle classification³.

3. Selon des données fournies par le Service de développement économique de la Ville de Montréal

1.1.4 Revenus de la biomasse

Il existe peu de littérature scientifique établissant le prix de vente de la biomasse issue de la phytoremédiation et ses variations. Toutefois, une récente étude de SUNY portant sur l'analyse techno-économique d'une production de saule à croissance rapide (comme c'est le cas pour le banc d'essai), le prix de vente minimum médian est estimé à 75,21 \$US/T (avec une déviation de 11,88 \$/T), ce qui nous donne un prix de 94,09 \$CAN/T⁴. Pour l'évaluation des revenus de la biomasse nous prendrons un rendement de 15 t/ha/an, soit des revenus de 940,9 \$CAN/ha/an. À des fins de simulation, nous estimerons ces revenus tous les 3 ans, soit pour chaque récolte.

1.1.5 Revenus issus des biens et services écosystémiques (BSE)

L'activité économique peut également avoir des effets externes (positifs ou négatifs) sur le bien-être d'autrui. On peut inscrire la dégradation de la qualité des sols par la contamination comme le résultat d'une externalité négative résultant d'une activité économique passée. Cela porte aujourd'hui préjudice au milieu (perte d'activité économique liée à la non-utilisation du terrain). À l'inverse, le processus de phytoremédiation provoque des externalités positives. Outre le verdissement et l'amélioration du paysage, on peut également dégager des bénéfices observables dans plusieurs domaines : la lutte contre les îlots de chaleur, la mitigation de la pollution urbaine, la séquestration du carbone, la restauration et l'amélioration de la biodiversité. Ces illustrations sont des exemples des biens et services écosystémiques. Leur valeur est non négligeable et doit être comptabilisée étant donné que sans leur apport, l'environnement est privé d'un bénéfice écologique supplémentaire. Les externalités sont de cette façon internalisées et cela permet de calculer à sa juste valeur l'impact économique d'un projet, ici la phytoremédiation. Une étude récente établit à 2,2 milliards de \$CAN⁵ la valeur des services écosystémiques rendus par diverses mesures d'aménagement. Dans sa note sur la phytoremédiation, se basant sur une étude sur la canopée urbaine de New York⁶, Caroline Simard (2018) fait référence à une fourchette de prix variant de 1 à 10 \$ par arbre pour la valeur des services rendus à la communauté. Pour les fins de notre simulation, nous prendrons la valeur la plus conservatrice, soit celle de 1 \$ par arbre. Elle peut être ramenée à 20 000 \$/ha sachant que toutes les combinaisons étudiées pour la construction de la base de données ont une densité supérieure à 20 000 arbres/ha.

4. En utilisant le taux de parités de pouvoir d'achat (ici 1,251 pour le Canada en 2017) <https://data.oecd.org/ft/conversion/parites-de-pouvoir-d-achat-ppa.htm>

5. Dupras, J., Alam, M. and Révéret, J. (2015), Economic value of Greater Montreal's non-market ecosystem services in a land use management and planning perspective. *Can. Geogr.*, 59: 93-106. doi:10.1111/cag.12138

6. Hamstead, Z., Kremer, P. et Mcphearson, T. (2015). *Advancing urban ecosystem service assessment for urban planning*. New York.

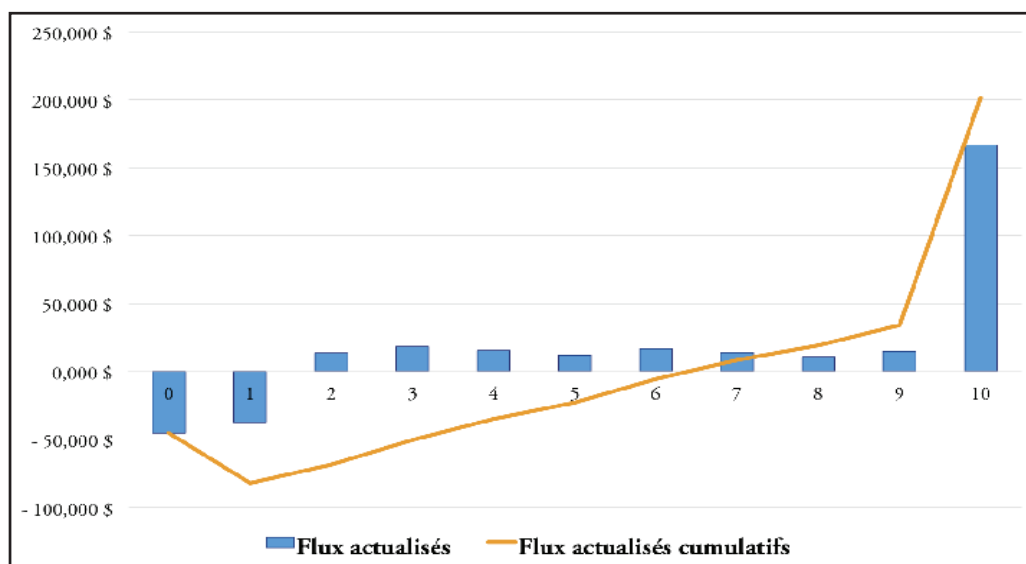
1.2 Les scénarios

Afin de pouvoir faire une évaluation économique du projet de décontamination, nous proposons 2 scénarios. Pour chacun, nous avons pu compiler, à même la base de données réalisée grâce au banc d'essai, les premiers coûts d'implantation et de préparation d'un peuplement de saules sur un hectare de terrain à décontaminer. La base de données permet de distinguer les coûts qui sont imputables aux travaux d'expérimentation et ceux qui sont attribuables aux travaux d'exploitation courante. Les coûts de récolte sont, pour leur part, associés aux revenus de la vente de biomasse qui, comme les revenus fonciers et les biens et services écosystémiques, sont évalués de manière conservatrice.

Chaque scénario repose sur l'hypothèse d'un calcul d'une durée de dix ans. Le scénario de base prend en considération les coûts directement associés à l'établissement de la plantation, de la récolte de la biomasse qu'elle produit (récoltée aux trois ans) ainsi que les revenus issus des BSE. Le deuxième scénario est construit en excluant les BSE du calcul des revenus rendus par la plantation.

Scénario 1 : Base

Pour le scénario 1⁷, nous avons donc considéré les coûts liés à l'établissement et à l'entretien de la plantation. Ceux-ci sont plus élevés à l'an 1 (pour considérer les frais de préparation de terrain, d'aménagement et de plantation). Pour les années subséquentes, ces frais ne sont plus requis, ce qui explique qu'ils sont plus faibles par la suite. Seuls les frais d'entretien perdurent.



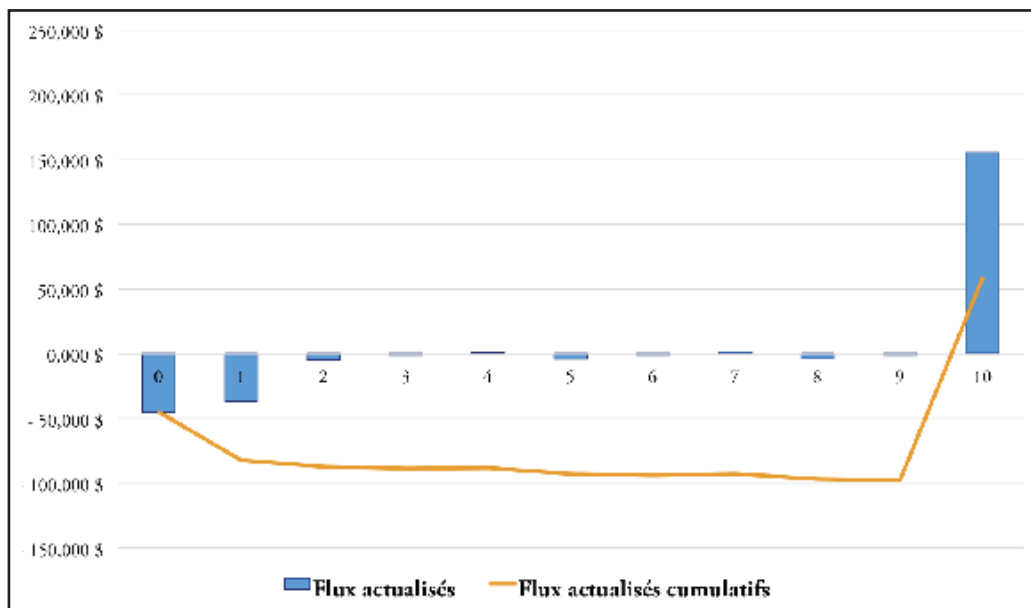
On peut noter que le flux actualisé cumulé arrive à l'équilibre en année 7. Cela signifie qu'à partir de ce moment, la somme des revenus tirés de la biomasse produite et des services écosystémiques rendus est assez importante pour rembourser les investissements réalisés en cours d'exploitation. Le projet atteint donc sa rentabilité au bout de 7 ans, **avant que ne se réalise la pleine valorisation foncière du projet**. On peut donc remarquer que dans l'optique d'un réajustement au bout de

7. Les bandes bleues correspondent aux flux (revenus moins les coûts) de chaque année. Ils sont actualisés afin de tenir compte de l'importance relative des sommes mobilisées dans le temps; La ligne orange correspond à la sommation des flux actualisés de l'année en cours et des années antérieures.

10 ans de la classification du terrain sous l'effet du traitement de phytoremédiation, la rentabilité augmente considérablement. La valeur actuelle nette, qui correspond aux flux actualisés cumulatifs de l'an 10, atteint 200 000\$.

Scénario 2 : Sans biens et services écosystémiques

Pour pouvoir bien comprendre l'importance des BSE dans le calcul de la rentabilité du traitement d'un hectare de terrain contaminé, nous avons élaboré un scénario où seuls les revenus de la biomasse et de la valeur foncière seraient pris en compte. Ce scénario pose donc par hypothèse que la plantation n'apporte aucun service pour la communauté (traitement de l'air, de l'eau et du sol, captation de CO₂, valorisation du paysage, etc.).



Dans ce scénario on constate que la valeur actuelle nette de l'hectare sous plantation devient positive dès que le terrain peut être reclassé avantageusement pour sa valeur foncière, soit, ici, au bout de 10 ans. Le bénéfice de la reclassification du terrain permet donc de rembourser les investissements réalisés au cours des neuf premières années en plus de créer une nouvelle valeur de 50 000\$ comme le démontre les flux actualisés cumulatifs à l'an 10. Le temps de rentabilisation du projet est totalement **dépendant de la valorisation foncière apportée par le traitement et donc de la vitesse de décontamination**. La raison étant qu'en l'absence de BSE, les revenus (issus de la production de biomasse) sont équivalents aux coûts d'entretien. Néanmoins, le projet demeure rentable à terme.

1.3 Les enseignements

Le principal enseignement de cette analyse met en évidence l'importance des biens et services écosystémiques (BSE) dans le calcul des effets du traitement par phytoremédiation. Cela permet de bien comprendre la portée de ce type d'infrastructure verte et de mieux tenir compte des externalités qui sont généralement ignorées dans les calculs de rendement. L'activité de décontamination n'est pas neutre et ne se résume pas à la seule fonction de dégrader ou d'extraire les contaminants. Les services écosystémiques rendus par la phytoremédiation (qualité de l'air, séquestration du carbone, réduction du ruissellement, régulation de la température, paysage, biodiversité) doivent donc être considérés dans le calcul de rentabilité, ce que fait notre démonstration.

Le passif environnemental que représentent les terrains contaminés pour la société montréalaise et québécoise est le résultat de la non-prise en compte des externalités négatives résultant d'une activité ayant affecté la qualité de ces sols. Bien que les données soient encore partielles et préliminaires, la méthode et le modèle PhytoVan permettent de faire ressortir que ce sont les effets du traitement sur la modification du classement (et donc de la valeur foncière) ainsi que les biens et services écosystémiques et non pas la production de biomasse qui déterminent l'efficacité économique de la phytoremédiation. Il ressort de l'analyse que l'intervention de phytoremédiation est en quelque sorte auto-portante. Son potentiel structurant pour l'économie peut s'accroître de manière considérable si on considère cette biomasse produite comme **un extrait valorisable**, ce qui est le cas. La production de biomasse reste un revenu complémentaire mais qui ouvre la possibilité de développer de nouvelles filières biosourcées susceptibles de fournir l'intrant de diverses chaînes de valeur pour remplacer les molécules issues des énergies fossiles. Traitée et prise en charge dans un dispositif industriel adapté, cette biomasse permet d'envisager de véritables alternatives aux usages du pétrole et de ses molécules dérivées. Produite en quantité et qualité appropriées, elle peut servir au déploiement d'un ensemble d'entreprises de valorisation susceptible de former à terme un tissu industriel riche et diversifié doté de la force et des synergies d'une ou plusieurs grappes industrielles. C'est en ce sens que la phytoremédiation peut servir d'assise à la construction d'une filière bioindustrielle dans l'Est de Montréal.

La biomasse, un extrant valorisable

La décontamination des terrains industriels peut donc servir à faire d'une pierre deux coups. Les plantations, en plus de modifier la qualité des sols, produisent un extrant qui rend possible une activité économique complémentaire : la valorisation de la biomasse issue de la croissance des végétaux. Il a déjà été prouvé que celle-ci peut atteindre de hauts rendements dans les bonnes conditions⁸ et qu'elle peut faire l'objet d'une grande variété de valorisations industrielles produisant toutes sortes de molécules à forte valeur ajoutée^{9,10}. C'est un avantage notable conférant aux approches de phytoremédiation un potentiel de développement économique exceptionnel. Elles permettent en effet l'ouverture de multiples avenues de développement industriel qui peuvent devenir autant de voie de renouvellement de l'activité économique.

C'est la raison pour laquelle le banc d'essai doit être considéré comme un outil qui permet d'amorcer le développement de nouveaux modèles d'affaires pour la construction d'une chaîne de valeur biosourcée. Les connaissances qu'il produit peuvent permettre de concevoir des scénarios de développement industriel susceptible d'inscrire l'Est de Montréal dans un modèle de développement inédit, répondant de manière unique aux exigences du développement durable. Les sections suivantes esquissent quelques-unes des avenues possibles.

Celles-ci, toutes complémentaires, font appel aux industries chimiques locales à la recherche - ou susceptibles de le devenir - d'un approvisionnement alternatif fiable pour leur développement. Cette approche permet ainsi un effet de levier pour la mise en place d'un écosystème industriel dans l'Est de Montréal. Les impacts du développement de telles avenues peuvent s'évaluer, en particulier, par l'augmentation du chiffre d'affaires de la chaîne de valeur, leurs effets sur la hausse des valeurs foncières et, du coup, des taxes ainsi que par la création de nouveaux emplois qualifiés.

Notre évaluation se fait en prenant en considération plusieurs avenues réalistes de valorisation de la biomasse. Ainsi, nous nous concentrerons sur les voies de valorisation des extractibles, de la cellulose et de la valorisation énergétique des résidus faisant appel à des technologies relativement connues. Pour ce faire nous allons réaliser des estimations pour une superficie de 100 ha en prenant en compte les effets de dispersion des sites de culture jusqu'à concurrence de 10 sites de 10 ha. Il est important de tenir compte de ces effets puisqu'en zone urbaine, il est exceptionnel de trouver de telles superficies d'un seul tenant.

8. Labrecque, M., & Teodorescu, T. I. (2003). High biomass yield achieved by Salix clones in SRIC following two 3-year coppice rotations on abandoned farmland in southern Quebec, Canada. *Biomass and Bioenergy*, 25(2), 135-146.

9. Berthod N, Brereton NJB, Pitre FE and Labrecque M (2015) Five willow varieties cultivated across diverse field environments reveal stem density variation associated with high tension wood abundance. *Front. Plant Sci.* 6:948. doi: 10.3389/fpls.2015.00948

10. Serapiglia, M. J., Cameron, K. D., Stipanovic, A. J., Abrahamson, L. P., Volk, T. A., & Smart, L. B. (2013). Yield and woody biomass traits of novel shrub willow hybrids at two contrasting sites. *BioEnergy Research*, 6(2), 533-546.

2.1 Les voies de valorisation

Les estimations présentées ci-dessous sont réalisées en référence à un processus industriel reposant sur une ou des bioraffineries intégrées, c'est-à-dire des équipements de production de molécules à forte valeur ajoutée tirées d'une biomasse issue des plantations cultivées à des fins de phytoremédiation. Au moins quatre éléments constituant de cette biomasse peuvent être valorisés industriellement et devenir autant de composantes d'une chaîne de valorisation à haut potentiel économique : les extractibles, la cellulose, l'hémicellulose et la lignine.

2.1.1 La valorisation des extractibles

Quand on évoque les extractibles issus du bois, on pense à de nombreux produits que l'on retrouve plus communément autour de nous comme les tannins ou huiles essentielles. On retrouve ainsi un large éventail de molécules (phénols, terpènes, quinones, etc.) avec des applications bien différentes. On vise, ici, la substitution d'usage ou le développement de nouveaux usages sur la base de propriétés propres des molécules¹¹. Les prix de vente d'extractibles sont très variables selon les marchés, la disponibilité et les coûts de production. La fourchette de prix se situe donc approximativement entre 5 et 200 \$US/kg. C'est un flux de revenu intéressant dans le but de valoriser au maximum la production de biomasse issue de la phytoremédiation.

2.1.2 La valorisation de la cellulose

La cellulose est au fondement des chaînes de valorisation vers des bioproduits que l'on appelle plus communément molécules plateformes. On a déjà identifié 12 molécules d'avenir¹² dont certaines ont récemment fait l'objet d'une demande en forte croissance. Ce sont des composés intermédiaires qui permettent de produire des produits chimiques plus usuels (polyuréthane, PET, PES, etc.). Pour y parvenir, elles doivent se substituer à des chaînes d'approvisionnement déjà existantes basées sur la valorisation de chaînes fossiles. Pour cela, les molécules plateformes doivent être produites pour un coût avoisinant 1 à 5 \$US/kg.

2.1.3 La valorisation de l'hémicellulose et la lignine

Comme la cellulose, l'hémicellulose peut être valorisable par fermentation pour la production d'intermédiaires industriels, la complexité de l'hémicellulose et les enjeux de développement technologique ne permettent pas de bien évaluer sa valorisation économique, à l'heure actuelle. Il en est de même pour la lignine. Néanmoins, même si de nouvelles technologies de valorisation font leur apparition pour les fins de notre démonstration, nous prendrons l'hypothèse conservatrice d'une valorisation énergétique.

11. ADEME (2015), Marchés actuels des produits biosourcés et évolutions à horizons 2020 et 2030.

12. DOE (2004), Top Value-Added Chemicals From Biomass. <http://ascension-publishing.com/BIZ/HD49.pdf>

2.2 Le potentiel économique

Afin de mieux cerner le potentiel de diversification et d'optimisation des sources de revenus qu'il est possible de tirer de la biomasse issue des plantations, nous évaluerons un **scénario A conservateur** avec la production d'un extractible à bas prix (5 \$US/Kg) et une simple valorisation en bioénergie (250 \$CAD/t) et un **scénario B, plus optimiste**, où les extractibles seraient valorisés en vue de capter une plus forte valeur ajoutée (200 \$US/Kg). En ce sens, 24% de la biomasse serait valorisée en bioproduits à 5 \$US/Kg et le reste, soit 740 Kg/t, serait valorisé en bioénergie (250 \$CAD/t). Ces deux scénarios peuvent être vus comme conservateurs sachant que seulement 25% de la biomasse produite est valorisée dans des filières à valeur ajoutée pour le scénario le plus optimiste.

	Scénario A		Scénario B	
Extractibles valorisés	1 %	5 \$/Kg	1 %	200 \$/Kg
Valorisation de la cellulose			24 %	5 \$/Kg
Bioénergie	99 %	250 \$/t	75 %	250 \$/t

Pour évaluer les impacts économiques, nous nous baserons sur les paramètres d'études d'impacts réalisées dans le cadre de travaux internes antérieurs portant sur une simulation pour la production de bioéthanol. Ainsi en prenant, une mise en culture de 100 ha de terrains marginaux à décontaminer, nous pouvons estimer les chiffres d'affaires et revenus fiscaux potentiels suivants :

	Scénario A	Scénario B
Chiffre d'affaires	0,47 M\$	6,29 M\$
Taxes municipales	15 723 \$	212 520 \$
Taxes provinciales	28 537 \$	385 707 \$
Taxes fédérales	18 652 \$	252 117 \$
Emplois	1	13

La différence entre ces deux scénarios est essentiellement liée à la capacité de réalisation du milieu socio-économique et à sa volonté de faire lever des filières de valorisation de la biomasse au service de la transition bioindustrielle. En rappelant que dans le scénario B seulement 25% de la biomasse est évaluée sur des sources de revenus à plus forte valeur ajoutée, la capacité de profiter de cette source de biomasse est un élément clé pour amplifier les retombées en termes d'emploi, de taxes et d'activité économique. Un écosystème financier et réglementaire adapté est ainsi un élément clé de la capacité à faire lever une nouvelle filière biosourcée

CONCLUSION

Perspectives

1. Ces premières simulations permettent de constater que l'approche de décontamination par les phytotechnologies est rentable à court et moyen terme ;
2. On peut aussi montrer que la biomasse issue de la phytoremédiation a un potentiel qui peut amorcer une nouvelle chaîne de valeur biosourcée avec des retombées fiscales et d'emplois à forte valeur ajoutée sur le territoire montréalais.

L'Est de Montréal possède tous les acteurs et de nombreux atouts pour porter de tels projets :

- Des organismes de recherche et de transfert technologique tels que l'IRBV ou le CEPROCQ ;
- De nombreux terrains industriels contaminés et de nombreuses zones mixtes résidentielles/industrielles ;
- Des acteurs industriels, tels que les membres de l'AIEM, la chaîne du polyester, Énergir ;
- Des infrastructures municipales telles que le centre de traitement des eaux usées Jean-R. Marcotte ou le futur centre de compostage et de biométhanisation ;
- Des institutions telles que la chambre de commerce, PME MTL ou le Port de Montréal.

Le banc d'essai est une infrastructure verte de développement des phytotechnologies et de valorisation de la biomasse qui commence d'ores et déjà à produire des connaissances utiles à l'élaboration d'une stratégie économique prometteuse pour l'Est de Montréal. Transformant le passif environnemental en actif stratégique pour le développement d'une industrie verte adossée à un effort de remise en état d'un domaine foncier considérable, cette stratégie gagnerait à être approfondie.

Des avenues de recherche se dessinent déjà pour amorcer le travail dans au moins cinq dimensions :

1. La sélection de plans d'expérience afin d'améliorer les techniques et les délais de décontamination ;
2. L'augmentation de superficies de décontamination et de production de biomasse permettant le développement de projets pilotes et de mise à l'échelle ;
3. Détailler un plan de transfert technologique et de diversification des débouchés permettant de renforcer les démarches d'innovation ;
4. Le développement d'outils financiers et réglementaires capables d'accompagner les entreprises innovantes désireuses de se développer au sein d'une filière bioindustrielle ;
5. Le développement de filières d'approvisionnement en biomasse.