

L'ENTRETIEN DES PHYTOTECNOLOGIES

FICHE TECHNIQUE

**IN
RS**

Institut national
de la recherche
scientifique



Date d'émission : 11 novembre 2024

Auteurs : Maha Boushabi, Louise Hénault-Ethier, Olivier Boucher-Carrier, Patrick Benoist, Maxime Fortin Faubert, Maxime Tisserant, Lise Gobeille et Sophie Duchesne

Les auteurs ont contribué à parts égales à la rédaction et à la révision du document

Experts et réviseurs : Albert Mondor, André Vézina, Chloé Frédette, Christian Dufresne, Gabriel Charbonneau, Hugo Degroote, Jacques Brisson, Jessica Champagne-Caron, Kathleen Paré, Marc André Laplante, Mélodie Desmarais, Nadia Lepage, Noémie Legault, Patrick Emond et Sixtine Hauchard

Remerciements : Cette fiche technique a été réalisée conjointement avec l'Institut national de la recherche scientifique et a reçu le soutien de Mitacs dans le cadre du programme Mitacs Accélération.

Illustrations :

Maha Boushabi et Philippe Villas

Photos : Agiro, Béatrice Gervais-Bergeron, Biopterre, Chloé Frédette, Institut de recherche en biologie végétale, Jacques Brisson, Jessica Champagne-Caron, Louise Hénault-Ethier, Maxime Fortin Faubert, Maxime Tisserant, OClair Environnement, Partenariat du Quartier des spectacles, Patrick Emond, Les Toits Vertige et Sébastien de Danieli

Comment citer :

Société québécoise de phytotechnologie. 2024. L'ENTRETIEN DES PHYTOTECHNOLOGIES, Fiches techniques de la Société québécoise de phytotechnologie. 47 pages. www.phytotechno.com.

Droits de reproduction à des fins non commerciales :

Les droits d'auteur appartiennent à la Société québécoise de phytotechnologie (SQP). L'information de cette fiche peut être reproduite à des fins personnelles ou publiques non commerciales sans autorisation de la SQP. Toutefois, les conditions suivantes s'appliquent :

-  La source de l'information doit être ainsi citée tel que mentionné précédemment.
-  L'utilisateur doit prendre soin de conserver l'exactitude des documents reproduits.
-  La copie ne peut être présentée en tant que version officielle originale.
-  La copie ne peut être présentée comme étant faite en affiliation avec la SQP ou avec son aval.

Droits de reproduction à des fins commerciales :

La reproduction à des fins commerciales, en tout ou en partie, de cette fiche et de tout autre document publié par la SQP est interdite sans la permission écrite de la SQP. Par cette autorisation, la SQP cherche à s'assurer de la diffusion des versions les plus exactes et actualisées des documents dont elle dispose. On peut obtenir une autorisation de reproduction à des fins commerciales en s'adressant à :

SOCIÉTÉ QUÉBÉCOISE DE PHYTOTECHNOLOGIE

3230, rue Sicotte, local E-300 Ouest
Saint-Hyacinthe QC J2S 2M2

PHYTOTECHNO.COM

Courriel :

info@phytotechno.com

Mise en garde :

La présente fiche technique est un instrument d'information. Son contenu ne constitue aucunement une recommandation, une liste exhaustive de procédés ou de règles en vigueur. Il demeure la responsabilité du lecteur de se référer aux recommandations, procédés et règlements en vigueur ainsi qu'à toutes autres normes applicables, le cas échéant.



TABLE DES MATIÈRES

1.0 INTRODUCTION	4
2.0 OBJECTIFS VISÉS	4
3.0 ENTRETIEN GÉNÉRAL DES PHYTOTECHNOLOGIES	4
3.1 Substrat et paillis	5
3.2 Irrigation	6
3.3 Fertilisation	8
3.4 Taille et gestion de la biomasse	9
3.5 Espèces végétales exotiques envahissantes	10
4.0 ENTRETIEN SPÉCIFIQUE	12
4.1 Toitures végétalisées	12
4.2 Murs végétalisés	16
4.3 Cellules de biorétention	21
4.4 Haies brise-vent	26
4.5 Plantations en bandes riveraines	29
4.6 Ouvrages de stabilisation des pentes et des berges	32
4.7 Marais filtrants	35
4.8 Phytoremédiation	38
5.0 CONCLUSION	43
6.0 RÉFÉRENCES	44

Préambule

L'ENTRETIEN DES PHYTOTECHNOLOGIES

La préparation des sols, l'irrigation, la taille, la lutte contre les maladies et les ravageurs ou encore le contrôle des adventices et des végétaux exotiques envahissants sont autant d'exemples d'entretien qu'il est nécessaire de pouvoir pérenniser pour garantir l'efficacité des phytotechnologies dans le temps. En outre, ce ne sont pas seulement les végétaux dont il faut assurer le maintien, mais l'ensemble des composantes de ces infrastructures. Étant donné les particularités de chacune d'entre elles, il est recommandé d'avoir recours aux conseils d'experts dans ce domaine pour établir des plans d'entretien appropriés. Un répertoire des entreprises québécoises œuvrant en phytotechnologies est mis à votre disposition sur notre site web (phytotechno.com).

L'objectif de cette fiche est de décrire l'entretien de phytotechnologies, qui est souvent le maillon faible de ces infrastructures sur longue échelle temporelle. Ainsi, cet aspect doit absolument être pris en considération durant leurs conceptions et l'évaluation de leur budget afin d'assurer la concrétisation de leurs différents services environnementaux et écologiques à long terme.

I.0 INTRODUCTION

Face aux changements climatiques, il est impératif d'élaborer des solutions résilientes et durables pour répondre aux défis environnementaux, sociaux et économiques du XXI^e siècle. Le biomimétisme, qui prend comme modèle la nature, est une voie d'inspiration pour relever de tels défis et aider à maintenir un équilibre biologique et climatique sur le long terme. Les phytotechnologies, qui s'inspirent des solutions fondées sur la nature, utilisent une approche régénérative globale pour répondre à la grande diversité de problèmes environnementaux auxquels l'humanité est confrontée.

Les phytotechnologies, lorsqu'elles sont basées sur des connaissances scientifiques et encadrées par des politiques et règlements, représentent des infrastructures rentables pour la société. Néanmoins, il ne faut pas négliger le fait qu'elles nécessitent des investissements financiers qui doivent couvrir non seulement les coûts d'installation, mais aussi ceux d'entretien.

2.0 OBJECTIFS VISÉS

La présente fiche technique détaille l'ensemble des interventions essentielles au bon entretien des phytotechnologies suivantes : toitures et murs végétalisés, cellules de biorétention, haies brise-vent, plantation en bandes riveraines, ouvrages de stabilisation de pentes et de berges, marais filtrants et phytoremédiation. Leur entretien a pour objectif de maintenir un fonctionnement adéquat au fil des ans. En l'absence d'interventions appropriées, leur performance peut être affectée, ce qui compromet les investissements engagés pour leur mise en place.

3.0 ENTRETIEN GÉNÉRAL DES PHYTOTECHNOLOGIES

Les bonnes combinaisons de végétaux permettent de créer des milieux équilibrés qui nécessitent moins d'entretien. Peu importe le type de phytotechnologie, une surveillance régulière de l'intégrité des différentes composantes est essentielle pour garantir son fonctionnement optimal. La nature de l'entretien varie selon le rôle, le dispositif de traitement mis en place, les plantes utilisées et les problématiques environnementales rencontrées. En conséquence, chaque phytotechnologie comporte des composantes distinctives pour assurer leur maintien, bien que certaines tâches soient communes à plusieurs d'entre elles. La section qui suit présente des éléments d'entretien qui sont généralisables à plusieurs catégories de phytotechnologie, soit la gestion du substrat, du paillis, de l'irrigation, de la fertilisation, de la taille des végétaux ainsi que la gestion de la biomasse et des adventices et des espèces végétales exotiques envahissantes (EVEE).

3.1 SUBSTRAT ET PAILLIS



PHOTO : LOUISE HÉNAULT-ETHIER

Figure 1 — Bien que les aires de fort débit aient avantage à être en enrochement, le paillis s'avère utile en zone d'infiltration pour limiter la croissance des adventices.

Il n'existe pas de substrats ni de paillis universel pour l'ensemble des phytotechnologies puisque les besoins varient en fonction du type et du système de culture déployés. Cependant, des principes de base peuvent s'appliquer à tous les types de phytotechnologies :

- La qualité du substrat de croissance et du paillis employé doit être appropriée à l'application spécifique souhaitée. Par exemple, il convient d'utiliser un paillis qui résiste à l'érosion éolienne pour les toitures végétalisées ou encore un autre type qui est adapté aux différents débits de ruissellement pour les biorétentions;
- L'utilisation d'un paillis permet de maintenir l'humidité du milieu en période estivale, réduire la propagation des adventices et promouvoir l'installation d'une microfaune qui participe à la vie du sol, notamment à la minéralisation de la matière organique et au cycle du carbone. Son recours est particulièrement important au moment de l'implantation de végétaux, notamment pour éviter que des adventices plus compétitives s'implantent dans le dispositif et parce que les jeunes plantes sont plus sensibles à la sécheresse du subs-

trat (Figure 1; Fang et Xiong, 2015; Leclercq-Dransart et al., 2020). L'utilisation de paillis devient moins critique au fil du temps, lorsque les plantes se déploient et couvrent le sol;

- Il doit avoir un ratio de carbone et d'azote (C/N) entre 15 et 20 pour éviter un phénomène appelé « soif d'azote » (Truong et Marschner, 2020). Par exemple, certains paillis peuvent entraîner une mobilisation de l'azote du substrat durant leur décomposition nuisant à la croissance des végétaux. Il est possible d'éviter ce phénomène en équilibrant la fertilisation par un amendement de terreau ou de compost;

- Dans certains cas, en milieu urbain, l'utilisation de types de paillis particulier peut être demandée par le service des incendies. Cette mesure vise à garantir la sécurité des habitants et des biens, en particulier dans les zones à risque élevé d'incendie.



Figure 2 — Le paillis, ici du bois raméal fragmenté, est utilisé dans plusieurs types de phytotechnologies pour ses nombreuses propriétés.

Le bois raméal fragmenté (BRF) est un type de paillis commun (Figure 2). Cependant, puisqu'il ne s'agit pas d'une appellation contrôlée, tous les BRF ne sont pas forcément équivalents. Les paillis forestiers, d'écorce ou de BRF disponibles sur le marché peuvent contenir un ratio C/N largement supérieur au seuil critique pour l'immobilisation de l'azote dans le sol durant la décomposition (85 à 1 720; Tissaux, 2002). Par ailleurs, étant donné que ces derniers n'ont pas nécessairement subi un processus d'hygiénisation normé (tel que l'autoéchauffement contrôlé du compost, qui assure l'inactivation des pathogènes), ils pourraient comporter des microorganismes ou des graines pouvant entraîner des problèmes, comme des maladies, une situation toutefois plutôt rare (Neher et al., 2022).

Dans un écosystème fonctionnel, la litière des végétaux contribue à réguler les caractéristiques du sol, telles que son pH, son aération et son drainage. Dans des phytotechnologies requérant un haut niveau d'intervention, le paillis peut aider à prévenir un déséquilibre des propriétés physicochimiques du sol, permettant une meilleure santé des plantes. Par exemple, les bio-rétentions captent beaucoup de sédiments et peuvent potentiellement être contaminées par les sels de déglacage. Un paillis adéquat peut participer à réguler le pH du sol et sa salinité, des paramètres critiques à suivre annuellement pour les phytotechnologies sensibles. De ce fait, ceux-ci sont parfois utilisés pour retenir des polluants qui pourraient autrement s'infiltrer dans le sol et ainsi les concentrer à la surface du substrat où l'intervention est plus facile et moins coûteuse à effectuer. Par ailleurs, le paillis peut aider à améliorer l'aération du sol et le drainage, évitant donc certains problèmes comme la pourriture des racines. En bref, cette composante joue un rôle de litière temporaire avec des propriétés favorisant l'équilibre du milieu, ce qui assurera

la progression de celui-ci vers un écosystème plus fonctionnel, nécessitant par conséquent moins d'interventions humaines.

3.2 IRRIGATION

Un système d'irrigation n'est pas requis si les phytotechnologies sont en relation directe avec une source d'eau permanente ou régulière, sauf pendant leur période d'implantation. Tandis que pour d'autres, particulièrement celles fortement exposées au rayonnement solaire incident et aux canicules, l'irrigation peut être nécessaire tout au long de leur cycle de vie. Le choix de la méthode dépendra des besoins spécifiques de la culture et des conditions environnementales. L'étude des exigences de chaque espèce guidera la sélection de la technique d'irrigation appropriée (Figure 3).



Figure 3 — Lors de la période d'implantation, l'irrigation peut être faite manuellement, mais elle devient rapidement laborieuse sur de grandes surfaces.

Le choix des végétaux et leur disposition spatiale sont critiques dans la composition d'un ouvrage de phytotechnologie, notamment en matière d'irrigation. Par exemple, les espèces situées en haut d'une butte ou d'un mur végétalisé seront souvent plus exposées au soleil, au vent et au manque d'eau que celles localisées en bas. En prenant en compte ces facteurs, il est possible de créer un aménagement paysager harmonieux et durable, où chaque plante trouve sa place en fonction de ses besoins spécifiques.

De plus, la maintenance régulière des systèmes d'irrigation est très importante pour s'assurer que l'eau est distribuée au bon moment, en bonne quantité et de façon adéquate. Il est recommandé d'examiner fréquemment les tuyaux, les goutteurs, les vannes et les programmeurs pour vérifier qu'ils ne fuient pas, qu'ils ne sont pas bouchés et qu'ils fonctionnent correctement. Pour certaines phytotechnologies, il convient de s'assurer que le dispositif d'irrigation et les substrats d'enracinement ne se colmatent pas avec le temps en raison de la dureté de l'eau. Par ailleurs, certains réservoirs ou tubulures doivent d'être périodiquement nettoyés et désinfectés pour limiter la prolifération

bactérienne ou algale. Cet entretien s'avère crucial dans les phytotechnologies hors sol comme les murs végétalisés. L'irrigation doit donc être bien planifiée et effectuée de manière efficace (Weill et Duval, 2009).

3.2.1 SYSTÈMES D'IRRIGATION

Il existe plusieurs types de systèmes d'irrigation (Figure 4) ayant chacun leurs propres avantages et inconvénients. Il est important de choisir celui qui convient aux besoins de la végétation, aux conditions climatiques et environnantes et à la phytotechnologie mise en place.

Goutte à goutte : Il se fait par distribution directement aux racines des plantes à l'aide de tuyaux et de goutteurs. Cette méthode est efficace pour économiser l'eau en évitant les pertes par évaporation et ruissellement, toutefois ces systèmes peuvent se boucher si l'eau qui y circule est riche en minéraux, notamment le calcaire;

Tuyau suintant : Il est réalisé par l'installation d'un tuyau doté de minuscules trous par lesquels l'eau se diffuse sous forme de gouttelettes lorsque la pression dans le boyau y est suffisante. Cette technique est encore plus sensible au colmatage de ses pores que l'irrigation goutte à goutte. Elle est souvent utilisée dans les murs végétalisés pour son débit régulier;

Aspersion : Elle consiste à projeter de l'eau sur les plantes à l'aide de buses ou de tuyaux à aspersion. Cette technique est fréquemment utilisée pour les grandes surfaces de culture qui ont besoin d'un arrosage récurrent. Contrairement aux systèmes d'irrigation automatisés, cette approche nécessite une surveillance pour s'assurer que la bonne parcelle est arrosée et ainsi éviter les pertes. Par ailleurs, l'aspersion est une méthode qui peut gaspiller davantage d'eau que les précédentes en raison de la forte évaporation lorsque la radiation solaire et le vent sont importants;

Irrigation manuelle : Elle se fait localement avec un boyau d'arrosage. Cette technique est fréquemment utilisée lors de la période d'établissement des végétaux ou pour les bacs de plantation en hauteur. Elle peut être coûteuse à long terme, en particulier sur de grande surface, puisqu'une personne doit être présente régulièrement pour réaliser ce travail;

Gicleurs à microjets : Ils ont comme objectif de pulvériser de l'eau à basse pression sur la surface des plantes à l'aide de petits gicleurs. Cette méthode est efficace pour économiser l'eau et éviter les pertes par évaporation, tout en offrant une couverture uniforme. Par contre, son efficacité se trouve diminuée en situation de fort vent et lorsque la pression dans le système n'est pas suffisante.



Figure 4 — Les différents types de systèmes d'irrigation utilisés dans le cadre d'ouvrages de phytotechnologies.
 A) Tuyau d'irrigation goutte à goutte, B) Tuyau suintant,
 C) Gicleur d'un système d'irrigation par aspersion,
 D) Irrigation manuelle, E) Gicleur à microjets.

PHOTOS : PATRICK ENOND ET PARTENARIAT DU QUARTIER DES SPECTACLES

3.2.2 PLANIFICATION ET CONTRÔLE DE L'IRRIGATION

La planification de l'irrigation se fait en fonction des besoins hydriques des végétaux et des conditions climatiques auxquelles ils sont exposés. Les facteurs importants à prendre en considération sont le choix des végétaux, le climat, le type de sol, la méthode de distribution de l'eau (Pepin et Bourgeois, 2012). Le matin ou le soir sont souvent des périodes recommandées pour minimiser l'évaporation et éviter de brûler les feuilles avec les gouttelettes qui peuvent s'y déposer. Ce phénomène est négligeable avec le goutte à goutte et par tuyau suintant (Weill et Duval, 2009). Il est également important de surveiller la météo pour s'assurer que l'irrigation est suffisante en cas de sécheresse prolongée. L'installation d'un détecteur d'humidité du substrat optimise la planification selon les exigences en eau réelles et non simplement en fonction de la pluie (Kansara *et al.*, 2015).

Un arrosage excessif risque de causer des problèmes majeurs aux plantes, l'asphyxie des racines entraînant leur pourriture et favorisant l'apparition de ravageurs fongiques. On doit donc surveiller régulièrement l'état des végétaux pour savoir si l'irrigation est adaptée et ajuster, au besoin, les volumes et les débits des systèmes.

Voici quelques éléments clés à connaître pour une surveillance efficace de l'irrigation :

 **Contrôle de la qualité de l'eau :** Si elle varie dans le temps, elle doit être vérifiée périodiquement pour s'assurer qu'elle n'est pas contaminée ou qu'elle n'a pas stagné trop longtemps, si elle est dans un réservoir. Dans certains cas, elle peut avoir un pH inadéquat, être sulfureuse, ferreuse, saline ou contenir d'autres impuretés;

 **Surveillance régulière :** Il est crucial pour assurer le bon fonctionnement des différents systèmes d'irrigation, de réaliser des suivis périodiquement, toutefois leur récurrence dépend de nombreux facteurs, notamment la technique utilisée, la dureté de l'eau, l'homogénéité du débit, la fréquence des gels et dégels, etc. Plus de détails vous seront donnés sur cette fréquence pour chaque phytotechnologie à l'étude dans ce document;

 **Surveillance et ajustement :** Des capteurs d'humidité du substrat devraient être employés pour faire un suivi en temps réel, et ainsi irriguer en fonction des conditions météorologiques et des besoins des végétaux.

3.3 FERTILISATION

La fertilisation, pour certaines phytotechnologies, est un élément clé dans leur entretien puisqu'elle est nécessaire pour maintenir une croissance végétale optimale. Cependant, les besoins en nutriments varient en fonction de la culture, de l'emplacement et des conditions environnementales (Figure 5; Schvartz *et al.*, 2005).

Dans ce document, le terme fertilisant réfère aux engrais conventionnels, qu'ils soient minéraux ou de synthèse, tandis que le terme fertilisant organique renvoie à des engrais contenant des matières organiques favorisant la structure du sol, ce qui

diminue sa vulnérabilité à l'érosion (Hotte, 2022). La première catégorie étant issue d'un gisement minéral, sa composition en azote (N), phosphore (P) et potassium (K) y est clairement indiquée et les nutriments sont rapidement disponibles pour les végétaux, mais ils sont passablement sensibles au lessivage (Leclerc *et al.*, 1995). La seconde est d'origine animale ou végétale, ce qui fait que ces mêmes nutriments et minéraux sont plutôt sous forme organique, ainsi ils doivent être dégradés, également appelés minéralisés, par les microorganismes du sol avant d'être biodisponible pour les végétaux. Il faut donc compter un laps de temps plus important avant que ceux-ci soient assimilables dans leur totalité par les plantes.

Pour enrichir les sols, il est aussi possible d'y mélanger des amendements afin d'améliorer sa structure et ses propriétés physiques, telles que la rétention hydrique, l'infiltration, l'aération, etc. (Davis et Whiting, 2013). Les amendements organiques comme le compost, la tourbe de sphagnum et le fumier font partie de la catégorie de fertilisants organiques. Ils sont toutefois plus pauvres en N-P-K, mais plus riches en matière organique et oligoéléments. Ainsi, ils sont majoritairement utilisés avec d'autres types d'engrais plus riches en ces trois nutriments (Hotte, 2022). Il existe également des amendements inorganiques qui aident eux aussi à la structure du sol : perlite, vermiculite, sable, etc. (Davis et Whiting, 2013).

Il existe une dernière catégorie de composés qui sont employés pour aider à la croissance des végétaux, il s'agit des biostimulants comme les mycorhizes, les substances humiques, les extraits d'algues et de plantes, les bactéries bénéfiques, etc. L'addition de celles-ci a pour but d'augmenter la tolérance aux stress abiotiques, l'absorption des nutriments et la qualité générale des végétaux (Du Jardin, 2015).

La fertilisation fait aussi face à certains défis. Par exemple, pour les toitures et les murs végétalisés, elle doit être adaptée aux contraintes d'espace et de poids des structures utilisées. D'autre part, la fertilisation des haies brise-vent, des plantations en bande riveraine, des ouvrages de stabilisation des pentes et des berges n'est effectuée que lors de leur établissement à l'aide d'amendement pour améliorer la structure du sol et éviter la contamination des plans d'eau. Cependant, si ces mêmes phytotechnologies sont implantées en milieu agricole, elles pourraient simplement intercepter le ruissellement des engrais appliqués aux cultures et n'exiger aucun apport direct supplémentaire (Hénault-Éthier *et al.*, 2019). Enfin, la phytoremédiation et les biorétentions ont besoin de nutriments pour assurer une croissance optimale des végétaux et ainsi remplir leur fonctionnalité. Par exemple, le potentiel de phytoremédiation des espèces à croissance rapide comme les saules et les peupliers pourrait être influencé par le type de fertilisant utilisé (Brunette, 2023). De plus, pour les marais filtrants, elle n'est effectuée que lorsqu'une carence est détectée puisque tous les éléments nécessaires à la survie des végétaux doivent normalement provenir des affluents que ceux-ci décontaminent. Finalement, si une fertilisation fréquente est requise, la mise sur pied d'un calendrier d'entretien et de fertilisation est essentielle.



Figure 5 — En contexte de phytoremédiation de terrains contaminés, le sol manque souvent de matières organiques ou de nutriments, et les apports en compost ou autres fertilisants issus de l'économie circulaire peuvent réduire les besoins en fertilisants conventionnels.

Enfin, pour les phytotechnologies conçues pour recréer un écosystème fonctionnel, l'ajout d'engrais pourrait être superflu. En effet, dans les sols naturels, la fixation de l'azote et la décomposition des feuilles sénescentes peuvent suffire à combler les besoins nutritionnels, surtout si l'objectif n'est pas la récolte, ni sur l'exportation des parties aériennes des végétaux (Tegeder et Masclaux-Daubresse, 2018). L'usage de biostimulants, c'est-à-dire toutes les formulations qui stimulent la croissance des végétaux autrement qu'en apportant uniquement des nutriments comme dans les engrais traditionnels, pourrait être une option pour parvenir à cette autonomie.

3.4 TAILLE ET GESTION DE LA BIOMASSE

La forme et la hauteur des végétaux et des arbustes sont normalement choisies lors de la conception du dispositif. Si la gestion de la biomasse est un élément d'entretien commun à tous les types de phytotechnologies, elle est moins cruciale en ce qui concerne celles qui visent à recréer des écosystèmes autonomes (stabilisation de pentes et berges, marais filtrant, plantation en bande riveraine, haie brise-vent et phytoremédiation). La taille de plantes et sa fréquence varient énormément selon les espèces utilisées et le type de phytotechnologie mise en place. La gestion de la biomasse peut également être nécessaire pour préserver leur équilibre écologique et leur fonctionnalité dans le temps. Dans certains cas, notamment pour les murs végétalisés, la taille régulière est essentielle pour maintenir leur forme et leur hauteur. De plus, dans le cas des milieux contaminés, elle peut permettre d'exporter les nutriments ou contaminants inorganiques captés par les végétaux et ainsi éviter leur relargage dans l'environnement. Ce processus est indispensable dans la phytoremédiation, surtout en ce qui concerne l'extraction des éléments-traces métalliques. Parallèlement, cette taille, aussi appelée recépage, favorise une croissance soutenue des plantes en plus de rendre possible l'intégration de la biomasse contaminée dans des chaînes de valeur, comme la fabrication de produits biosourcés ou la biomasse énergétique (Hénault-Éthier et al., 2017).

La taille permet également de réduire les risques de maladies en optimisant la circulation d'air ou de freiner la maturation des graines chez les adventices herbacées et, conséquemment, limiter les invasions. Dans le cas des biorétentions en bordure de route ou des toitures végétalisées, certaines réglementations peuvent exiger qu'une hauteur maximale de déploiement soit respectée pour des raisons de sécurité, telles que la visibilité, le risque de feu, etc. (Québec Vert, 2023). Pour se conformer à ces règles, des végétaux plus petits peuvent être choisis.

Par exemple, pour limiter les besoins de taille des végétaux sous les lignes hydroélectriques, une façon d'utiliser les phytotechnologies consiste à sélectionner des plantes de dimensions acceptables qui empêcheront l'implantation d'espèces arbustives à trop grand déploiement ou d'EVEE (Brown, 1995; De Blois et al., 2004). La surveillance demeure toutefois de mise pour éviter la croissance qui pourrait compromettre l'intégrité des infrastructures électriques. Une attention particulière doit aussi être portée lors des interventions de taille des espèces ligneuses, car elles peuvent avoir des impacts négatifs comme favoriser la propagation de maladies fongiques (ABC jardins et services, 2022). En général, il faut minimiser l'usage de plantes qui exigent un effort de taille important, afin de réduire les risques de contaminations des végétaux par des pathogènes au cours de ces interventions.

En conclusion, la fréquence et la méthode de taille ou les pratiques de gestion de la biomasse doivent être adaptées à chaque phytotechnologie et espèce implantée; le choix du moment de la taille est aussi essentiel. Le respect des périodes de repos végétatif ainsi que l'évitement de l'entretien pendant des périodes critiques comme la floraison ou la saison de nidification sont de mise. Enfin, la réalisation des interventions selon la norme BNQ

sur l'entretien arboricole et horticole est recommandée (BNQ, 2020).

3.5 ESPÈCES VÉGÉTALES EXOTIQUES ENVAHISSANTES

Le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) présente une liste des EVEC reconnues au Québec comme étant prioritaires (MELCCFP, 2024a). Les environnements urbains, perturbés et proches des voies de circulation, favorisent l'établissement des EVEC, qui peuvent coloniser les environnements xériques, mésiques ou hydriques selon leurs préférences écologiques. Outre les phytotechnologies visant à recréer des écosystèmes naturels fonctionnels, plusieurs de ces ouvrages sont en quelque sorte des milieux anthropisés et ils sont souvent en relation avec l'eau. Ainsi, certaines de ces espèces peuvent s'y installer et devenir excessivement difficiles à éradiquer.

La renouée du Japon (*Reynoutria japonica* var. *japonica*, syn. *Fallopia japonica*) est l'une des espèces problématiques pour les phytotechnologies puisqu'elle peut rapidement coloniser une grande variété de sols, principalement en milieux ouverts ou près de points d'eau (Figure 7). Le roseau commun (*Phragmites australis* subsp. *australis*) est aussi une espèce à surveiller pour les ouvrages situés dans un corridor de vent, dans un milieu humide, à proximité d'une source d'eau ou d'une friche ou lorsque le sol est mis à nu. Le nerprun cathartique (*Rhamnus carthartica*) et le nerprun bourdaine (*Frangula alnus* syn. *Rhamnus frangula*) peuvent également s'introduire rapidement, par le biais des oiseaux par exemple, dans les projets en habitats anthropisés, à faible distance de friches ou de boisés ou dans les phytotechnologies où le sol est dénudé pendant une certaine période. Finalement, bien que les espèces spécifiées soient les principales problématiques dans les ouvrages phytotechnologiques, d'autres EVEC peuvent s'y retrouver; voir le site du MELCCFP pour plus d'informations (MELCCFP, 2024a).



PHOTO : LOUISE HÉNAULT-THÉRIER

Figure 6 — L'entretien de la végétation dans les gazons renforcés implique une tonte qui n'affecte pas les matériaux structurants ou les sursemis dans les cellules du tapis moins fournies.



Figure 7 – L'établissement d'espèces exotiques envahissantes dans un projet de phytotechnologie peut avoir des répercussions importantes. Il est donc primordial d'en faire la surveillance pour détecter la présence de la renouée du Japon (*Reynoutria japonica* var. *japonica*).

La prévention est la meilleure tactique de gestion des EVEC, car une fois implantées les méthodes de contrôle et d'éradication sont coûteuses, souvent dommageables et leur succès n'est pas assuré (Sébire, 2015). Les techniques utilisées varient selon les espèces, mais quelques approches générales permettent d'éviter leur introduction (Comité ZIP des Seigneuries, 2018; Prince George's County, 2007) :

- ❧ Évaluer la composition des communautés végétales environnantes;
- ❧ Lorsque les EVEC se répandent à l'aide de rhizomes, il se doit de préparer le terrain de façon à créer une discontinuité physique entre le sol de l'ouvrage de phytotechnologie et les milieux adjacents colonisés;
- ❧ Utiliser un substrat non contaminé par des semences ou des propagules (rhizome, racines, tige avec entre-nœud, etc.) pour l'aménagement du projet, lorsqu'applicable;
- ❧ Arracher les adventices au minimum annuellement, cela est encore plus valable dans le cas des espèces qui se disséminent par le vent ou les oiseaux;
- ❧ Planter des végétaux à croissance rapide pour qu'elles compétitionnent avec les EVEC pour la lumière et les nutriments;

❧ Couvrir promptement le sol à nu en plantant ou semant des herbacés, en général indigènes, entre les arbres et arbustes principaux suite à l'implantation de la phytotechnologie. Cette technique est plus souvent utilisée dans le cadre de la phytoremédiation, de la stabilisation de pentes et de berges et des plantations en bande riveraine.

Ensuite, la fréquence de la surveillance et du dépistage est ajustée selon le type de phytotechnologie et le risque d'invasion. Un suivi deux fois par année durant la période d'établissement, soit au printemps et à l'automne, est recommandé. Lorsque la présence d'EVEC est détectée, il est nécessaire de mettre sur pied un protocole de contrôle ou d'éradication ainsi qu'un suivi documenté. Les méthodes de contrôle et d'éradication sont toutefois spécifiques à chacune des espèces. Pour plus d'informations, nous vous recommandons de consulter le site web de Nature-Action Québec (Nature-Action Québec, s. d.), le site web du MELCCFP pour plus de détail sur la renouée du Japon et le roseau commun (MELCCFP, 2024b, 2024c) et le site web du Comité Écologique du Grand Montréal pour le nerprun cathartique et le nerprun bourdaine (CEGM, 2021).

4.0 ENTRETIEN SPÉCIFIQUE

4.1 TOITURES VÉGÉTALISÉES

Une toiture végétalisée est une structure permettant de recouvrir une partie ou la totalité d'un toit, que l'infrastructure soit souterraine ou en hauteur, avec de la végétation. Les bienfaits environnementaux des toitures végétalisées sont multiples, notamment l'amélioration de l'esthétique des bâtiments, la réduction des îlots de chaleur urbains, l'augmentation de la biodiversité, l'accroissement de la qualité de l'air et la diminution des coûts énergétiques en abaissant les besoins de climatisation et de chauffage (Québec Vert, 2023). En été, le feuillage assurera la climatisation naturelle de l'édifice grâce au processus d'évapotranspiration et d'ombrage (Lawlor et al., 2006).

Il existe plusieurs types de toits végétalisés, à savoir : extensifs (mince couche de substrat variant de 5 à 15 cm d'épaisseur), semi-intensifs (5 à 30 cm) et intensifs (> 30 cm). La pente des toits peut aussi être variable sachant qu'une inclinaison d'au moins 2 % est requise pour favoriser l'écoulement de l'eau, mais qu'un dénivelé plus important (6, 15 ou 25 %) pourrait réduire la rétention du ruissellement (Getter et al., 2007; VanWoert et al., 2005) 2007; VanWoert et al., 2005 et du substrat en plus de compliquer l'entretien. Au Québec, aucun toit végétalisé ne peut être érigé sur un édifice de plus de 46 m du niveau du sol (Régie du bâtiment du Québec, 2024).

L'entretien des toitures végétalisées est essentiel pour assurer leur survie et leur croissance et maximiser la durabilité et la performance du système. Ce ne sont pas tous les bâtiments qui peuvent supporter une telle structure. Le document « Critères techniques visant la construction de toits végétalisés de la Régie du bâtiment du Québec » contient des informations pertinentes à la conception selon les règles de l'art (Régie du bâtiment du Québec, 2015a). Les architectes, ingénieurs ou architectes paysagistes ayant conçu des projets doivent généralement remettre des renseignements et un programme d'entretien au propriétaire de l'infrastructure.

Certains ouvrages de toitures végétalisés sont plutôt implantés au niveau du sol ou presque, par exemple, pour recouvrir un stationnement souterrain ou une route souterraine. Dans la présente fiche technique, ce sont les toitures végétalisées situées en hauteur qui seront examinées puisqu'ils nécessitent des interventions plus spécialisées. Toutefois, comme leur entretien est semblable, la plupart de ces conseils peuvent aussi être appliqués à celles se trouvant sur des infrastructures souterraines.

4.1.1 IRRIGATION

En général, les végétaux choisis sont peu exigeants en eau pour minimiser les besoins en irrigation à long terme. C'est la raison pour laquelle les sédums sont souvent utilisés, mais plusieurs autres espèces peuvent être sélectionnées. Malgré un choix avisé des espèces, l'irrigation reste l'un des éléments clés de l'entretien pour cette phytotechnologie qui peut être exposée à des températures très élevées. Il est aussi possible de conserver l'eau de

pluie pour faire l'arrosage et ainsi diminuer encore plus la quantité d'eau qui est rejetée lors d'épisodes de précipitations majeurs.

L'arrosage par aspersion est efficace pour les toits plats ou à faible pente et ceux où la force du vent n'est pas trop grande. Toutefois, comme les vents sont souvent plus forts en hauteur qu'au niveau du sol, elle est peu utilisée. Le goutte à goutte ou l'irrigation par tuyau suintant, avec un système de valve et un répartiteur de zone, sont particulièrement performants pour les toits avec une inclinaison importante ou ayant des aires de plantation ayant des exigences hydriques différentes. En général, l'irrigation est automatisée. Ils intègrent notamment un détecteur de pluie pour faciliter la gestion des périodes d'arrosage, minimiser la main-d'œuvre nécessaire et la consommation d'eau.

4.1.2 FERTILISATION

L'objectif principal de l'utilisation de fertilisant est d'assurer la croissance et la santé des espèces et ainsi maintenir le couvert végétal sur le toit. Ceux-ci doivent être choisis en fonction des exigences des végétaux qu'ils sont en plein sol ou dans des bacs.

 **Fréquence :** Une fois par an au printemps toutefois, cette temporalité peut changer selon les besoins des végétaux et les conditions climatiques. C'est pourquoi un calendrier d'entretien qui inclut une surveillance régulière est nécessaire;

 **Types :** En général, des engrais à diffusion lente sont utilisés pour minimiser la fréquence des interventions tout en assurant la présence sur une longue période des éléments nutritifs. L'ajout d'amendements, comme le compost, peut être fait au printemps pour apporter de la matière organique en plus. Par contre, appliqué en trop grande quantité, il augmente trop le poids à la structure. Dans le cas des toits végétalisés qui comportent de nombreuses espèces, il est important d'avoir un calendrier de fertilisation plus détaillé afin de prendre en compte les différents besoins;

 **Méthodes d'application :** Les fertilisants granulaires à dégradation lente sont disposés au sol. Généralement, ceux ayant une durée de relâchement entre 3 ou 6 mois sont privilégiés. Certains engrais liquides ou chimiques peuvent affecter l'intégrité des membranes d'étanchéité (Régie du bâtiment du Québec, 2015b). Pour cette raison, il est essentiel de respecter le dosage recommandé par le fabricant dans les systèmes de fertilisation automatisés. Cela permet aussi d'éviter l'excès de nutriments et leur lessivage, ce qui peut avoir des effets négatifs sur l'environnement et sur la santé des végétaux;

4.1.3 NETTOYAGE

Le nettoyage des toitures végétalisées garantit la longévité et le bon fonctionnement du système. Ceci implique d'enlever les sédiments et la matière organique dans les pierres et le gravier qui recouvrent les zones de drainage.



Figure 8 — La sécurité des travailleurs en hauteur sur les toits végétalisés est primordiale pour leur entretien.

Voici les éléments clés à considérer pour le nettoyage des toitures végétalisées :

-  **Fréquence** : Généralement effectuée 3 à 6 fois par an, voire plus souvent, cette fréquence dépend du type de végétation, des conditions climatiques et de l'environnement local. Par exemple, les feuilles et les semences des arbres à grand déploiement qui parfois les surplombent peuvent germer et s'accumuler causant des problèmes s'ils ne sont pas enlevés régulièrement;
-  **Méthode** : Les outils à main adaptés au travail en faible profondeur permettent de rester vigilant afin de préserver l'intégrité des membranes sous-jacentes;
-  **Nettoyage du système d'irrigation** : Il rend possible l'élimination des débris et dépôts qui peuvent l'obstruer, réduisant ainsi son efficacité.
-  **Drainage automnal** : L'élimination des eaux de pluie automnales est nécessaire pour éviter la formation de glace, qui pourrait transformer le toit en une véritable patinoire.
-  **Sécurité** : Le respect des normes de sécurité lors des opérations en hauteur est essentiel et peut nécessiter des équipements de protection et de sécurité appropriés (Figure 8; CNESST, 2021). Certaines tâches devraient être confiées à des professionnels formés et qualifiés dans ce domaine d'expertise, surtout sur les toits difficilement accessibles. Au besoin, des systèmes de sécurité temporaires doivent être mis en place pour assurer la protection des intervenants.

4.1.4 CONTRÔLE DE LA VÉGÉTATION

Certaines espèces, telles que les sédums, sont faciles d'entretien. Ils permettent de minimiser la quantité de matériel nécessaire et la période consacrée à cette tâche. Ces espèces seront particulièrement intéressantes sur un toit végétalisé à accès limité. Les autres, quant à elles, peuvent être transformées en de véritables aménagements paysagers et incorporer une plus grande biodiversité, offrant ainsi de nombreux avantages environnementaux, esthétiques et au niveau du bien-être. Cependant, pour assurer une pérennité de ces aménagements, ils doivent être bien planifiés, car ils exigeront plus d'interventions, d'équipement, et de temps d'entretien.

La taille régulière des vivaces installées sur les toits végétalisés est nécessaire pour contrôler la croissance et maintenir leur aspect esthétique. Le risque d'incendie lié à la biomasse morte sèche laissée sur les toits végétalisés doit également être pris en considération (Régie du bâtiment du Québec, 2024). La fréquence de taille dépend des besoins spécifiques des espèces présentes, mais il est primordial de la faire minimalement une fois au printemps pour éliminer les parties sénescents.

La taille en automne doit être réalisée, selon les espèces, de façon à maximiser la rétention de la neige. Toutefois, celle des herbacés et des graminées doit être effectuée de préférence au printemps. La neige agit comme isolant, et améliore ainsi la conservation de la chaleur des édifices (Trottier, 2007), tout en protégeant le système racinaire contre le froid. En principe, le toit devrait être conçu afin de ne pas avoir besoin d'installer de protections hivernales. Le choix des végétaux et leur taille contribuent aussi à la conserver de la neige sur celui-ci.

Les éléments clés de la taille des espèces comprennent :

-  **Outils** : Ils doivent être propres et bien aiguisés pour ne pas endommager les végétaux. La taille se fait souvent manuellement. Cela peut inclure des cisailles, des sécateurs, des tondeuses à gazon, des débroussailluses, etc.;
-  **Hauteur de taille** : Elle dépend des espèces présentes et de leur fonction. Toutefois, les interventions les plus communes sont une taille de rajeunissement au printemps ou à l'automne et une autre de structure en saison de croissance. Le maintien de la hauteur des végétaux à l'automne peut servir à maximiser la rétention de la neige sur le toit en hiver; quoiqu'il puisse aussi être utile de diminuer la hauteur des graminées pour ne conserver que les parties rigides des tiges;
-  **Enlèvement des résidus organiques** : Il permet d'empêcher la chute de débris du toit du bâtiment et l'obstruction des canaux de drainage, ce qui perturberait le flux hydrique par rapport à celui calculé lors de la conception;
-  **Gestion des adventices** : Il est primordial de le faire régulièrement pour éviter leur dissémination et assurer la prédominance des végétaux sélectionnés. Les plantules d'arbres, en particulier, doivent être arrachées rapidement avant qu'elles ne prennent racine et impactent l'intégrité et les membranes de la toiture.

4.1.5 SURVEILLANCE

La surveillance des toits végétalisés aide à prolonger leur durée de vie puisque la détection hâtive des problématiques facilite leur résolution avant que des dommages plus importants n'apparaissent, évitant ainsi des coûts de réparation ou de remplacement inutiles (Figure 9). Tout d'abord, celle-ci vise à déceler rapidement des difficultés potentielles pour les végétaux. L'excès d'humidité du sol ou la sécheresse peuvent indiquer un souci concernant l'irrigation, le substrat ou le drainage. La croissance ralentie ou exagérée des plantes peut révéler des enjeux de fertilisation ou elle peut signifier la nécessité d'analyser le substrat. Finalement, la surveillance permet d'apprécier l'état général de la

toiture, de valider le fonctionnement des systèmes et l'intégrité de leurs composantes pour assurer, notamment, l'absence de dommages causés par des fuites. Enfin, elle contribue à la sécurité des personnes circulant à proximité du toit, en vérifiant qu'il n'y ait pas d'objets qui pourraient tomber du toit avec le vent. C'est aussi au travers de la surveillance que l'on peut repérer les enjeux de santé et de sécurité pour les travailleurs afin de prévenir les risques de glissades, de chutes ou d'autres accidents.

Toutes ces observations devraient être consignées avec l'historique des interventions faites et planifiées. Ces notes doivent inclure toutes activités, que ce soit l'irrigation, la fertilisation, le nettoyage, la taille, l'inspection, etc.



Figure 9 — Deux secteurs du même toit végétalisé, à gauche, une zone où la croissance est satisfaisante et à droite une zone où le substrat est dénudé et la végétation desséchée. Une surveillance régulière permet d'éviter ce type de difficulté avant qu'elles ne deviennent complexes à corriger.

4.1.6 RÉPARATION

La réparation rapide des différents dommages observés sur le toit végétalisé est essentielle :

Évitement des dégâts : Cela permet de protéger le toit, mais aussi le bâtiment qui le supporte. Ils incluent les fuites, les problèmes de drainage, les dommages causés par les tempêtes ou les intempéries, etc.;

Maintien de la santé des plantes : Les réparations peuvent aider à conserver la vitalité des végétaux en fournissant un milieu plus favorable à leur croissance. Celles-ci peuvent comprendre le remplacement du substrat ou des plantes, la correction du drainage, la taille régulière, etc.;

Afin d'atteindre ces objectifs, plusieurs éléments sont à prendre en considération :

Évaluation de l'étendue des dommages : Cela permet de déterminer si les réparations sont nécessaires sur une superficie restreinte ou si elles touchent l'ensemble du toit;

Scellement des fuites : Bien que rares, elles doivent être colmatées pour éviter de dégrader le bâtiment sous-jacent. Il faut tout d'abord retirer et conserver les végétaux, puis le substrat. Par la suite, les différentes couches de la toiture sont enlevées méthodiquement par des spécialistes afin d'arriver à la membrane d'étanchéité;

Rénovation de la surface : Le substrat du toit végétalisé, si dégradé, devra potentiellement être remplacé pour assurer la bonne croissance des végétaux. Ce remplacement est réalisé notamment lorsqu'il est considérablement envahi par des adventices. Il faut alors, dans bien des cas, faire appel à une grue pour descendre l'ancien substrat et monter le nouveau dont le poids ne dépasse pas la charge portante de l'édifice.

4.1.7 RÉCAPITULATIF

Les tableaux suivants présentent un récapitulatif des outils nécessaires, la fréquence et la saison des différentes opérations d'entretien des végétaux (Tableau 1) et des infrastructures (Tableau 2) des toitures végétalisées.

Tableau 1 : Entretien des végétaux d'un toit végétalisé au fil des saisons. Contenu adapté de Ville Éponge (2024)

Opérations d'entretien	Outils	Fréquence	Printemps	Été	Automne
Nettoyer les déchets et les résidus de végétaux	Gants de jardinage, râteau, binette et sacs pour les ordures ou les résidus compostables	À chaque visite	✓	✓	✓
Inspecter les maladies et les insectes ravageurs	Loupe entomologique	À chaque visite	✓	✓	✓
Désherber, retirer les plantes envahissantes et nuisibles	Gants de jardinage, truelle ou pelle, houe, sarcloir, binette	À chaque visite	✓	✓	✓
Retirer les végétaux morts	Sécateur, pelle, sacs pour les résidus compostables	Au besoin, mais s'assurer de vérifier la cause	✓	✓	✓
Replanter pour maintenir le couvert végétal	Semoir, plantoir, truelle, pelle	Au besoin	✓	✓	✓
Tailler les graminées	Sécateur, cisaille, débroussailluse, coupe-bordure et dans quelques cas, tondre	1 fois par an, au printemps. Parfois en automne pour favoriser l'accumulation de la neige	✓		✓
Tailler les arbustes, selon les espèces	Sécateur, couteau-scie, tronçonneuse	1 fois par an, au besoin	✓	✓	✓
Tailler les vivaces	Sécateur à main	1 fois par printemps, au besoin. En automne, selon l'espèce et pas trop court favoriser l'accumulation de la neige	✓		✓
Retirer les plantes annuelles	Truelle	1 fois par an			✓
Fertiliser les végétaux	Arrosoir pour la fertilisation liquide ou disperser de granules	1 à 2 fois par an, généralement au printemps ou à l'été	✓	✓	
Arroser	Système d'arrosage manuel (arrosoirs, boyaux d'arrosage) ou système d'irrigation	Au besoin ou en tout temps, selon la végétation	✓	✓	
Renouveler le substrat	Pelles, conteneurs de vrac souple (<i>big bag</i>), grue. Contacter un spécialiste.	Au besoin, le renouvellement peut être partiel	✓		
Protection hivernale	Toile de jute, attacher les branches de certains végétaux	1 fois par an, au besoin			✓

Tableau 2 : Entretien de l’infrastructure d’un toit végétalisé. Contenu adapté de Ville Éponge (2024)

Opérations d’entretien	Outils	Fréquence	Printemps	Été	Automne	Hiver
Dégager les drains	Gants de jardinage et sacs de poubelle	À chaque visite	✓	✓	✓	✓
Remettre le système d’irrigation		1 fois par an, au besoin	✓			
Inspecter les drains	Par un spécialiste	Au besoin	✓	✓	✓	
Inspecter le système d’irrigation	Par un spécialiste	Au besoin	✓	✓	✓	
Vidanger le système d’irrigation	Par un spécialiste	1 fois par an	✓			✓
Vérifier et enlever l’accumulation excessive de neige sur les végétaux		Au besoin			✓	✓

4.2 MURS VÉGÉTALISÉS

Les murs végétalisés, également appelés murs verts, sont des structures verticales recouvertes de végétaux qui peuvent être installés à l’intérieur ou à l’extérieur (Société québécoise de phytotechnologie, 2022). Certains sont mis en place principalement pour leur esthétique qui prodigue du bien-être aux individus qui le côtoient (biophilie). D’autres visent à fournir différents services écologiques et offrent donc des bénéfices environnementaux (Francis, 2011) comme : la purification de l’air, la rétention des eaux de pluie, qui engendre le ralentissement du ruissellement et une diminution du risque d’inondations et l’amélioration de l’isolation des bâtiments dans le cas des murs extérieurs (Francis, 2011 ; Medl et al., 2017).

On distingue deux types de murs végétalisés : les façades avec plantes grimpantes et les murs auxquels il est ajouté du substrat, aussi appelés murs vivants. Ces deux catégories se divisent en plusieurs sous-catégories (Figure 10) et leur entretien peut différer.

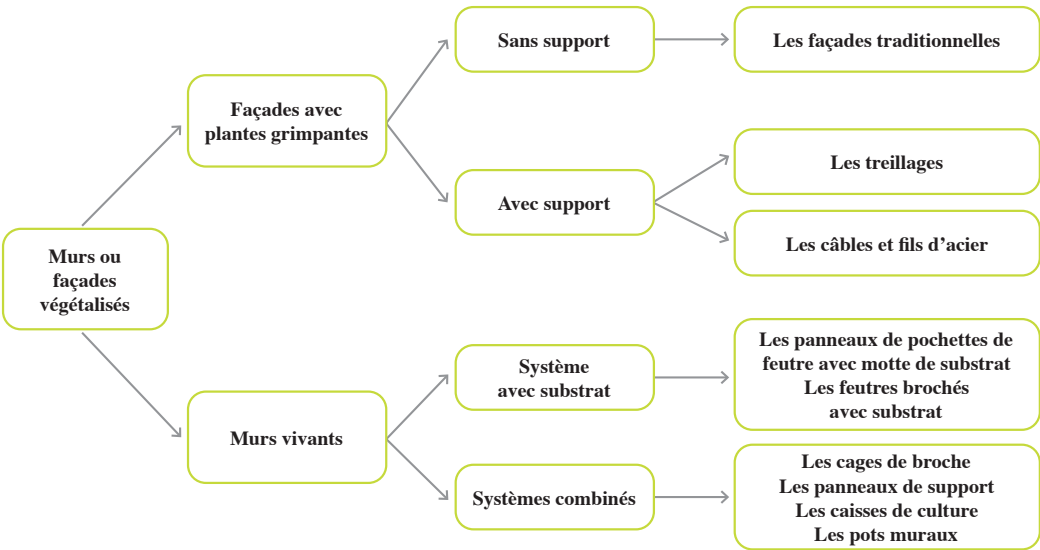


Figure 10 – Organigramme des types des murs végétalisés. Adapté par Maha Boushabi de Claude Vallée (2016) et de Manso et Castro-Gomes (2015).

L'entretien des murs végétalisés, en particulier pour les murs vivants, est différent de celui des autres phytotechnologies pour les raisons suivantes :

🍃 **Densité de plantation :** Souvent élevée pour pouvoir camoufler les structures de support. Cela peut ainsi rendre l'entretien des végétaux plus difficile;

🍃 **Verticalité :** Elle est rendue possible grâce à une structure (treillis, câble de métal, etc.) qui doit pouvoir soutenir le poids des végétaux dans le cas des murs grimpants. Pour les murs vivants, s'ajoute le poids de la membrane d'étanchéité, du substrat, de l'eau qu'il contient, du système d'irrigation et du système de support pour soutenir la structure, mais aussi pour permettre l'entretien. Celui-ci doit d'ailleurs être fait avec des équipements spéciaux afin de pouvoir atteindre de façon sécuritaire les zones plus élevées, le tout effectué par des personnes formées;

🍃 **Types de végétaux :** Pour les murs vivants, ils doivent être résistants au stress hydrique et aux maladies. Pour les murs extérieurs, les végétaux doivent également être résistants à la pollution, aux intempéries et au climat hivernal québécois. Pour les murs végétalisés intérieurs, le changement de température, d'humidité et d'ensoleillement durant toute l'année doit aussi être pris en compte. Si le mur grimpant est composé d'espèces annuelles, elles doivent avoir une croissance rapide de leurs tiges, puisque ces dernières doivent être remplacées tous les ans (ex. *Mandevilla* sp.). Il en va de même pour les vivaces qui perdent leur biomasse aérienne durant l'hiver (ex. *Apios americana*). Le mur grimpant peut également être composé de plantes pérennes qui conservent leurs tiges (ex. *Parthenocissus quinquefolia*). Il est aussi possible d'y intégrer des plantes potagères lorsque l'accès y est facile et que la capacité de support le permet (Figure 11);

🍃 **Substrat :** Dans le cas des murs vivants, un substrat spécifique est utilisé pour sa légèreté, pour sa grande capacité de rétention d'eau et pour sa richesse en éléments nutritifs pour soutenir la croissance des végétaux.

4.2.1 IRRIGATION

Le choix de la méthode d'irrigation varie en fonction de plusieurs facteurs, notamment le type de mur (murs vivants ou façades grimpantes), le type de végétaux, les conditions environnementales et la dimension de l'ouvrage. Voici les éléments essentiels à retenir :

🍃 **Choix du système :** Même si les plantes grimpantes rustiques ne nécessitent parfois aucune irrigation, les murs vivants comportent fréquemment un système goutte à goutte ou par tuyau suintant;

🍃 **Automatisation :** Les systèmes automatisés sont pratiques pour irriguer de manière régulière sans nécessiter une présence physique constante. Ils sont indispensables pour les murs vivants. Ils sont programmables pour répondre à leurs besoins hydriques à des moments précis;

🍃 **Uniformité :** Il faut s'assurer que l'eau soit distribuée à travers le mur, en considérant les variations de la hauteur des

cellules, des exigences spécifiques de chaque espèce, de la saison et de la densité foliaire et de plantation (Figure 12). Avec le temps, des canaux préférentiels d'écoulement de l'eau dans le substrat ou des blocages se créent conséquemment à l'accumulation de calcaire et ils peuvent perturber l'uniformité de l'irrigation;

🍃 **Accessibilité :** Elle est importante à prendre en compte avant de choisir une méthode d'irrigation ou un système d'automatisation, en particulier pour les murs à grand déploiement vertical;

🍃 **Équipement essentiel :** Des pompes, des tuyaux et des régulateurs de pression peuvent être requis pour une distribution efficace à travers l'infrastructure. L'arrosage de façades grimpantes, s'il est nécessaire, est fait au niveau du sol et exige très peu de matériel.



PHOTO : PARTENARIAT DU QUARTIER DES SPECTACLES

Figure 11 – Les murs végétalisés peuvent aussi être composés de plantes potagères et leur récolte peut faire office de taille pour assurer leur croissance optimale.

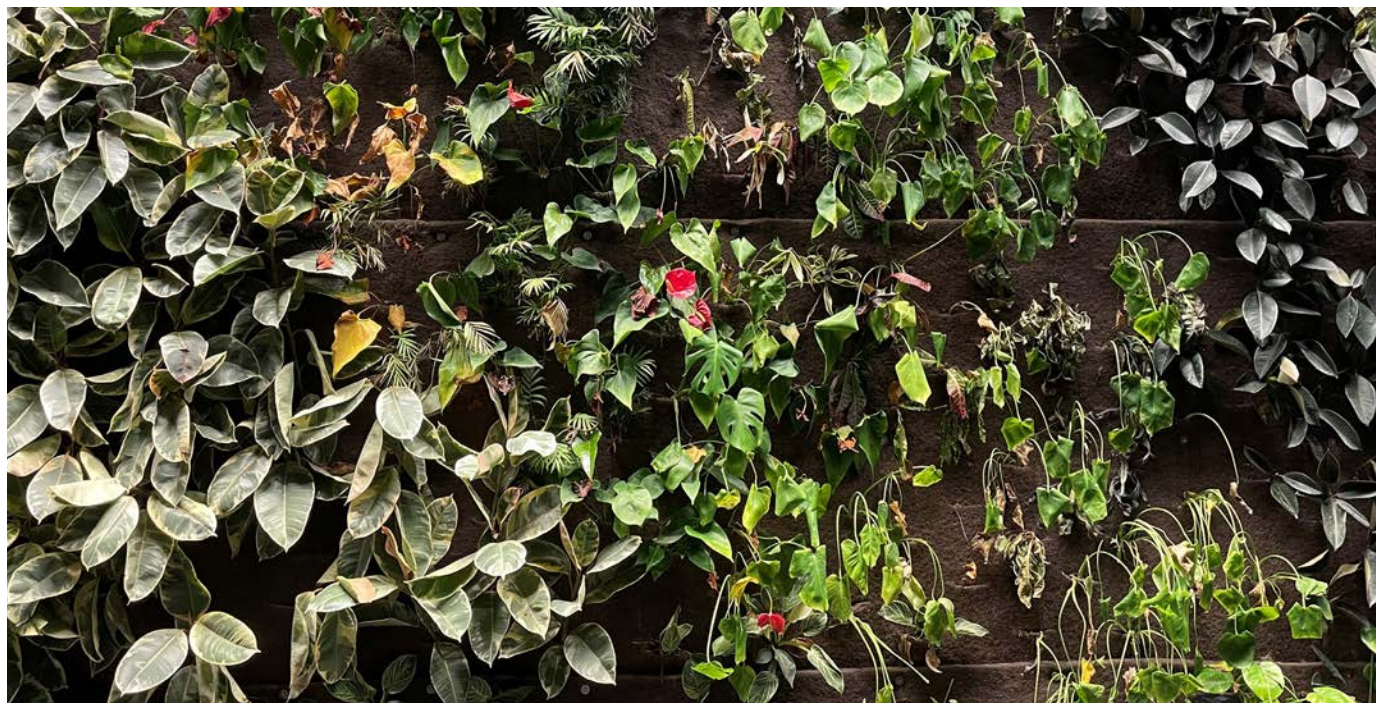


Figure 12 – L'irrigation des murs végétalisés doit être uniforme pour assurer un couvert végétal continu et dense. Le flétrissement des plantes est à surveiller dès l'implantation mais peut aussi devenir un problème sur les murs plus âgés si les tubulures ne sont pas régulièrement entretenues.

4.2.2 FERTILISATION

La fertilisation des murs végétalisés vivants est particulière en raison de la nature verticale du système. Dans le cas des murs vivants, la technique utilisée est la fertigation, c'est-à-dire que la fertilisation est faite au travers du système d'irrigation. Pour les façades végétalisées avec des plantes grimpantes rustiques en plein sol, il est probable qu'aucune fertilisation ne soit nécessaire après la période d'établissement. Autrement l'emploi d'engrais à libération lente est recommandé.

4.2.3 NETTOYAGE

Le nettoyage des murs végétalisés est un élément important de l'entretien régulier et peut fluctuer en fonction du type de mur, de son emplacement (extérieur ou intérieur) et de la saison. Les façades grimpantes peuvent ne nécessiter qu'un ou deux nettoyages annuels, par exemple, pour empêcher les tiges de rejoindre l'entretoit et la toiture ou retirer les débris amassés après la sénescence des feuilles. De leur côté, les murs vivants demanderont un nettoyage et une surveillance pouvant aller jusqu'à une fois par semaine dépendamment des espèces implantées.

Les murs végétalisés peuvent être exposés à la pollution de l'air et aux poussières, ce qui peut entraîner l'accumulation de débris, de biomasse morte et de saleté à la surface des plantes qui freinent la photosynthèse. Cela peut nuire à leur croissance et à leur santé et ainsi, réduire leur valeur esthétique et leurs autres bénéfices. À l'extérieur, la pluie permettra généralement de net-

toyer les murs végétalisés qui sont exposés aux intempéries, quoiqu'au printemps en bordure de routes ou d'infrastructures, il pourrait être essentiel de nettoyer pour enlever la poussière. La brumisation plusieurs fois par jour aidera à maintenir en santé les plantes qui nécessitent un fort apport en humidité (comme les fougères), bien que dans ces cas, un bon système de ventilation doit être installé pour éviter le développement de maladies fongiques. Un arrosage avec un jet d'eau déchlorée et tempérée peut être requis pour contrôler l'accumulation de résidus sur les végétaux des murs à plus grand déploiement. La fréquence de ces entretiens dépendra de la qualité de l'air intérieur, pouvant aller jusqu'à une fois par saison. Pour les murs végétalisés de petite échelle, le dépoussiérage manuel est souvent préconisé.

Des équipements spécialisés pourraient être indispensables pour atteindre de façon sécuritaire les zones difficiles d'accès. Dans certains cas, une simple extension sur un boyau d'arrosage peut suffire, mais dans d'autres cas, il faudra installer les travailleurs sur des nacelles (Figure 13). Il est fortement recommandé de faire appel à des professionnels lorsque les murs sont très hauts ou situés dans des endroits difficilement accessibles.

4.2.4 TAILLE DE LA VÉGÉTATION

Pour cette phytotechnologie, le contrôle de la végétation est essentiel afin de maintenir son esthétisme, qui est un aspect important de celle-ci. La taille influence également la quantité de lumière reçue par les végétaux avoisinants, de même que la circulation de l'air et de l'humidité ambiante dans la structure. Cet

aspect affecte donc leur progression et leur santé. Pour l'optimiser, il faut prendre en considération :

Fréquence : Elle dépend de plusieurs facteurs comme la vitesse et la direction de croissance des végétaux, leur densité foliaire et l'exposition aux conditions environnementales. Si le taux de croissance est important, une taille pourrait être nécessaire toutes les 3 à 4 semaines. Autrement, plusieurs mois pourraient s'écouler entre ceux-ci. Les façades grimpantes requièrent un entretien moins récurrent durant la saison de croissance. Cette fréquence sera déterminée par les types de végétaux et de mur (vivant ou grimpant) choisis, le positionnement des espèces sur la structure et les conditions ambiantes. Ces conditions étant variables et influencées par les saisons, elles sont plus homogènes à l'intérieur. De ce fait, pour maintenir l'apparence et la santé des végétaux, l'entretien extérieur variera selon la période de l'année;

Méthode : Elle change en fonction du type de croissance des plantes et de la forme désirée : pinçage, taille de formation, élagage, etc. Les outils utilisés se limitent principalement au sécateur pour ce type d'ouvrage;

Hauteur du mur : Peut affecter la quantité de lumière reçue par les végétaux s'il y a obstruction par une autre structure. Cela impacte donc leur taux de croissance et, par conséquent, la fréquence de la taille. Elle peut aussi influencer l'exposition du mur aux intempéries s'il est à l'extérieur. Pour les façades grimpantes, il faudra les tailler régulièrement lors de la saison de croissance pour s'assurer qu'elles n'atteignent pas les gouttières ni les toitures, quel que soit le matériau (Figure 14);

Structure de support : Les murs végétalisés vivants composés de plusieurs cellules ont des systèmes de soutien spécifiques. La taille des plantes doit être réalisée de manière à ne pas abîmer ces structures. La même règle s'applique aux murs grimpants qu'ils soient sur fils de fer, sur treillis, etc. Si les végétaux poussent directement sur un mur extérieur, il faut vérifier la condition du mortier puisque les végétaux pourraient l'endommager davantage. Ainsi, pour favoriser leur croissance et éviter les problèmes d'humidité (moisissure, pourriture, etc.), il est préférable de les faire grimper sur un support fixé à une distance d'au moins 5 cm du mur pour assurer une bonne circulation d'air.

4.2.5 SURVEILLANCE

La surveillance régulière des murs végétalisés permet de détecter rapidement les dommages et les maladies. Ceux-ci peuvent être causés par différents facteurs tels que des fuites d'eau pouvant provenir des joints qui cèdent ou des installations mal construites. La source du problème peut être externe, comme dans les cas de la contamination croisée ou d'une coupure d'électricité, qui peut entraîner un dérèglement de la programmation et, donc, un dysfonctionnement du système d'irrigation. La dureté de l'eau peut boucher les trous des buses et des tuyaux, ce qui peut occasionner des problématiques de substrat ou de drainage.

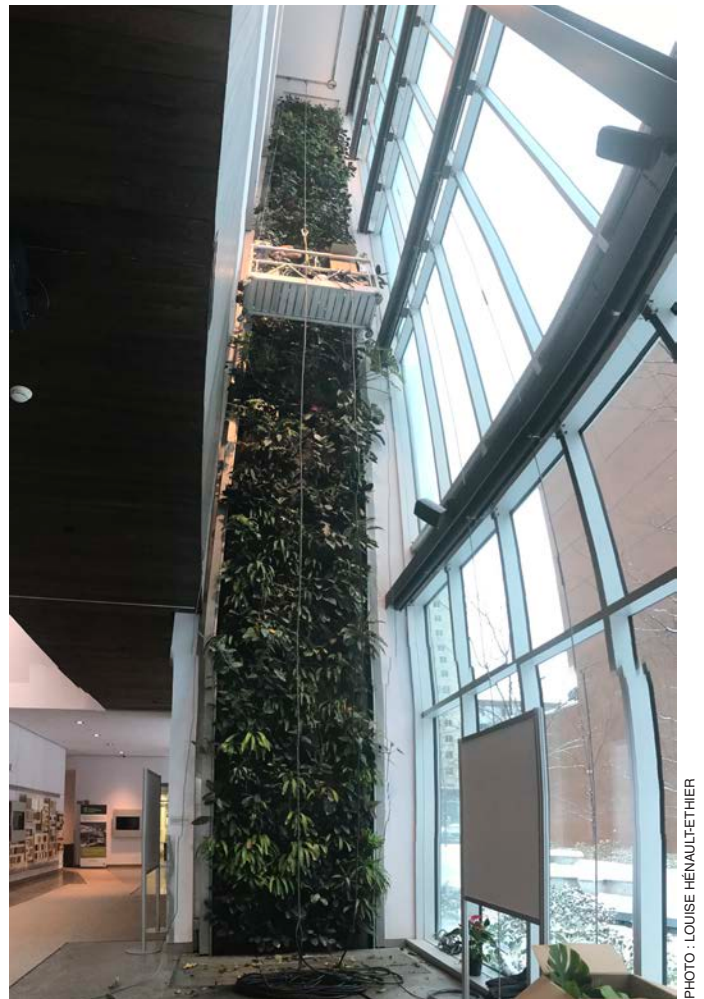


PHOTO : LOUISE HÉNAULT-ETHIER

Figure 13 – Entretien d'un mur végétalisé de quatre étages de hauteur à l'aide d'une nacelle dans la Maison du développement durable de Montréal.

Si l'équipe d'entretien de ces derniers est externe à l'endroit où est installé le mur, il est recommandé d'avoir une ou des personnes-ressources, fréquemment présentes sur les lieux, qui peuvent informer la compagnie d'entretien de problèmes tels qu'un flétrissement ou encore de l'apparition de signes de carence. Il est souvent judicieux de contacter directement une entreprise experte pour détecter et résoudre les difficultés liées aux composantes structurelles et imperméabilisantes. Pour assurer la santé et la durabilité des murs végétalisés, il est important d'être à l'affût plusieurs éléments clés, notamment :

Vérification de la qualité du substrat : Elle implique d'examiner s'il est suffisamment aéré ainsi que drainé et s'il contient les bonnes concentrations des nutriments nécessaires à la croissance des végétaux;

Irrigation : Sa quantité et sa fréquence doivent être surveillées pour éviter l'excès ou le manque d'eau. Dans le cas des murs vivants, ce processus est souvent automatisé à l'aide d'hygromètre dans le sol, tandis que les murs grimpants en pleine terre sont généralement arrosés manuellement;

Fertilisation : Elle concerne principalement les murs vivants, pour lesquels il est primordial de s'assurer que la solution de fertigation ait les quantités adéquates de nutriments en fonction des exigences des végétaux ou encore des différentes étapes de leur cycle de vie (floraison, fructification, etc.);

Contrôle des insectes et des maladies : Les ravageurs et les maladies peuvent affecter la croissance des végétaux aussi bien des murs végétalisés intérieurs qu'extérieurs. Des traitements doivent être faits aussitôt qu'une infestation est constatée pour éviter sa transmission. Les stress hydriques peuvent également les affaiblir et les rendre plus sensibles;

Sécurité : Pour les murs vivants cet enjeu peut être relié à l'édifice, notamment par rapport aux membranes qui le protègent de l'humidité du mur. Cependant, ces membranes ont généralement une durée de vie très longue. Du côté des

façades grimpantes, les végétaux peuvent, avec le temps et leur propre poids, se décrocher de leur support. Pour éviter cette situation, il serait judicieux de placer un dispositif de sécurité, tel qu'un filet transparent fixé au mur, au-dessus des endroits passants pour diminuer le risque des dommages. Il offre également un soutien supplémentaire aux végétaux, réduisant ainsi la menace de rupture ou de déracinement.

Les murs grimpants ne nécessitent pas une surveillance étroite, une inspection par saison pourrait suffire. A contrario, les murs vivants nécessitent une surveillance régulière. Les travaux de réparation des murs végétalisés nécessitent souvent une bonne coordination entre plusieurs intervenants dépendamment de l'importance et de la nature des opérations à réaliser : architectes, paysagistes, ingénieurs, horticulteurs, etc.



PHOTOS : LOUISE HÉNAULT-ETHIER

Figure 14 – Les murs grimpants doivent être taillés périodiquement notamment pour empêcher la pénétration de la végétation dans l'entretoit.

4.3 CELLULES DE BIORÉTENTION

La biorétention est une technique de gestion des eaux pluviales qui consiste à ralentir, infiltrer, absorber, filtrer et traiter les eaux de ruissellement à travers des zones végétalisées et un substrat perméable. Elle permet principalement de réduire le volume et la vitesse des eaux de ruissellement ainsi que de prévenir la pollution des eaux de surface et souterraines. Les dispositifs de biorétention peuvent être installés dans des milieux urbains et périurbains, tels que des stationnements, des trottoirs, des terrains de sport et des espaces verts (Figure 15). Pour plus de détail, il est possible de consulter notre fiche technique sur les biorétentions (Société québécoise de phytotechnologie, 2018). Il s'agit d'une solution durable et écologique qui peut contribuer à :

- Améliorer la qualité de l'eau sortant du système pour se diriger dans les environnements hydrologiques avoisinants;
- Protéger les écosystèmes locaux des épisodes de précipitations extrêmes et diminuer les volumes d'eau de ruissellement;
- Retarder le flux hydrique qui est acheminé vers les systèmes de collecte des eaux pluviales, réduisant ainsi le risque de surverses, dans le cas des réseaux unitaires, et d'inondations des surfaces urbaines.



PHOTO : LOUISE HÉNAULT-ETHIER

Figure 15 — Plantation de végétaux dans une nouvelle biorétention aménagée en bordure de rue.

L'entretien des cellules de biorétention est unique pour plusieurs éléments :

Substrats : Ils doivent être spécifiques pour permettre un bon taux d'infiltration et être adaptés à la croissance des végétaux, à la filtration et au traitement des eaux de ruissellement, ils peuvent nécessiter un remplacement périodique en fonction de la quantité de sédiments et de contaminants accumulés. Pour prévenir le remplacement prématuré, il est possible de mettre en place des méthodes telles que le ramassage de la biomasse, à l'automne ou au printemps. Certains gestionnaires d'entretien décideront de faire la taille des vivaces à l'automne pour prendre de l'avance et augmenter l'acceptabilité sociale du projet en évitant les critiques des élus et des citoyens à ce sujet (Ville de Montréal, 2022). Toutefois, il est préférable qu'elle soit réalisée au printemps, car le feuillage protège les plantes du froid et accumule les abrasifs, les contaminants et les sédiments. Il est aussi possible de prévenir l'apport de sédiments en installant des trappes en amont, également nommées caniveau de décantation;

Végétaux : Les espèces choisies doivent pouvoir supporter une large gamme de conditions édaphiques, notamment les grandes variations d'humidité du sol, les niveaux de nutriments élevés et la présence de contaminants. Il faut prendre en considération :

1. L'inclinaison du sol à l'endroit où il y a plantation puisque certaines espèces tolèrent mieux que d'autres les pentes dans le contexte des biorétentions;
2. L'adaptation des végétaux face à l'humidité variable du sol selon leur localisation au sein de la biorétention. Le substrat du bas de la cellule sera saturé sur de plus longues périodes que le reste de système. Toutefois, l'eau ne s'y accumulera pas en permanence et donc les espèces implantées devront tolérer ce contexte sans être nécessairement des plantes de milieux humides. Les positions plus hautes auront tendance à être plus sèches. En complément, les espèces doivent pouvoir supporter les périodes de stress hydrique. En cas de mort d'un ou des végétaux en raison de conditions édaphiques, il n'est pas recommandé de replanter la même espèce;
3. La tolérance aux sels de déglacage, aux nutriments et à l'impact des volumes de ruissellement entrants. Les cellules de biorétentions doivent aussi être fréquemment entretenues, et ce principalement pendant la période d'établissement des végétaux, soit pendant 2 à 3 ans, pour éviter des adventices et ainsi garantir leur croissance et leur survie sur le long terme;

Gestion de l'eau : Les systèmes de drainage et d'évacuation doivent être nettoyés et vérifiés régulièrement pour prévenir l'accumulation de sédiments et de débris et, *in fine*, d'eau à l'intérieur et à l'extérieur des cellules qui ne peut plus s'infiltrer. Cela permet également d'éviter l'émergence de conditions anoxiques dans les sols, ce qui peut survenir si ces derniers restent submergés pendant une durée prolongée;

Contaminants : La grande majorité des contaminants organiques (hydrocarbures, huile, etc.) ou inorganiques (métaux, nutriments, sels de déglacage, etc.) est retenue dans le substrat. Une certaine quantité est absorbée par les végétaux et une autre est dégradée par les microorganismes dans la rhizosphère. Pour plus de détails, vous pouvez consulter notre fiche technique sur la phytoremédiation (Société québécoise de phytotechnologie, 2016). Cette phytotechnologie requiert donc une attention particulière dans le but d'éviter que les eaux de surface et souterraines ne soient polluées;

Emplacement : Les cellules situées dans des zones à forte circulation piétonnière ou automobile peuvent demander un nettoyage des débris plus récurrent. Le volume entrant et le débit de ruissellement, qui est spécifique à chaque cellule de biorétention, peuvent également avoir un impact sur la fréquence d'entretien (en apportant plus ou moins de nutriments, plus ou moins de sédiments, etc.). À noter que pour un même emplacement, les biorétentions recevant une grande quantité d'eau ne sont pas nécessairement celles qui occasionnent un entretien plus important.

4.3.1 IRRIGATION

Elle peut être nécessaire jusqu'à deux ans après l'implantation, selon les espèces, le volume d'eau entrant dans le système, la saison de plantation et les conditions météorologiques. À titre indicatif, cette période peut être de 3 à 4 mois pour les vivaces, de 6 mois ou plus pour les arbustes et de deux ans pour les arbres. Certaines municipalités arrosent ces derniers jusqu'à cinq ans suivant leur plantation. Puisque l'irrigation y est peu fréquente, elle sera ponctuellement effectuée à l'aide d'un camion-citerne ou grâce à une source locale d'eau, comme une borne-fontaine. Après la période d'implantation, l'irrigation reste une pratique marginale dans la mesure où les végétaux mis en place doivent s'adapter aux épisodes de sécheresse (Figure 16). Si ce n'est pas le cas, cela signifie que les plantes n'ont probablement pas été sélectionnées correctement. Un suivi de la survie, de la croissance ou du stress hydrique des espèces devrait être fait régulièrement dès leur plantation.

4.3.2 FERTILISATION

Les substrats de plantation des biorétentions sont habituellement pauvres en nutriments, pour éviter le lessivage avec les précipitations. Ils peuvent être amendés de compost, riche en matières organiques, microorganismes et nutriments. Toutefois, à long terme, c'est généralement le ruissellement qui amène les éléments nutritifs essentiels à la croissance des végétaux. Cela signifie qu'ils ne sont pas toujours pour autant présents à des concentrations appropriées. Les signes de carence chez la plante peuvent indiquer un enjeu de biodisponibilité de ce nutriment, sans nécessairement que le substrat soit appauvri.



PHOTO : LOUISE HÉVAULT-THÉRIER

Figure 16 – Les végétaux dans les biorétentions ou les noues végétalisées doivent être irrigués en période d'implantation. Ils doivent être sélectionnés pour résister à la sécheresse une grande partie du temps mais aussi pour résister aux conditions submergées suivant les précipitations.

4.3.3 NETTOYAGE

Il consiste principalement à retirer les débris et les sédiments, tels que des matières organiques (feuilles, branches, boues organiques, etc.) et des matières inorganiques (graviers, sédiments, objets anthropiques, etc.) pour éviter qu'ils ne bloquent le trop-plein ou les tuyaux de communication entre les cellules de biorétention (Figure 17).

La planification des activités de nettoyage, en amont de la construction, est essentielle pour gérer adéquatement la cellule de biorétention. Dans cette planification, il faut tenir compte des conditions météorologiques, de l'obtention des permis et des réglementations locales en vigueur. Il est recommandé qu'il soit fait une fois toutes les deux semaines lorsque l'ouvrage est encore assez récent et mensuellement quand les végétaux sont bien établis pour assurer l'efficacité du système. Le nettoyage de l'enrochement doit être fait 2 à 3 fois durant la saison de croissance, tandis que celui du caniveau de sédiment est fait au besoin.



PHOTOS : LOUISE HÉNAULT-ETHIER ET JESSICA CHAMPAGNE-CARON

Figure 17 – L'entretien des biorétentions implique le nettoyage des grilles d'égout de même que celles des caniveaux de sédimentation empêchant le colmatage du substrat.

Au printemps, il est recommandé d'enlever les matières organiques (feuilles mortes, branches, excréments d'animaux, etc.), les matières inorganiques (roches, sédiments, déchets, etc.) et tailler les vivaces. Plus tard, durant la période végétative, il est important d'effectuer un suivi du taux de mortalité et de croissance des végétaux, des adventices et ramasser les débris présents.

4.3.4 CONTRÔLE DE LA VÉGÉTATION

La taille a pour objectif de contrôler la hauteur et la densité des végétaux, évitant ainsi qu'elle ne gêne la circulation de l'eau dans la cellule de biorétention. D'un point de vue pratique, pour celles situées le long de rue, il est important que la biomasse ne dépasse pas un mètre de hauteur afin de permettre une bonne visibilité aux usagers de la route. Cet entretien est souvent moins considérable pour des cellules naturalisées.

La taille des arbustes est essentielle pour stimuler leur croissance et retirer les parties mortes, ce qui améliore la capacité des plantes à absorber les nutriments et les polluants présents dans l'eau de pluie et de ruissellement. Dans le cas des vivaces non ligneuses, leur biomasse est récoltée au printemps ou à l'automne. Finalement, il est important de tailler régulièrement un arbre tout au long de son développement afin de lui donner une forme structurée et solide, de l'entretenir pour éliminer les

branches mortes ou faibles et ainsi, éviter qu'il ne devienne un danger à long terme pour les utilisateurs de ce milieu.

La taille dépend de plusieurs facteurs, notamment :

🌿 **Type de végétation :** La nature et la fréquence diffèrent en fonction de la rapidité de croissance des végétaux sélectionnés. La fréquence pour les arbustes est variable selon l'espèce, elle se fait au besoin. Dans les cas des vivaces non ligneuses, elle se fait de préférence au printemps, ainsi la biomasse isole cette phytotechnologie pendant l'hiver en plus de créer un tapis qui facilite le ramassage des abrasifs. Néanmoins, elle est parfois faite à l'automne pour remédier aux contraintes de temps de la main-d'œuvre, souvent très occupée pendant la période printanière, ou aux critiques des citoyens;

🌿 **Condition environnementale :** La quantité de lumière, d'eau et de nutriments disponibles ainsi que la salinité du milieu impacte le développement des plantes. De plus, en cas de trop forte densité de plantation, une compétition intraspécifique ou interspécifique peut avoir des impacts négatifs sur leur croissance respective. Il est donc important d'implanter les bonnes espèces au bon endroit pour pérenniser le système et diminuer la nécessité des efforts d'entretien.

Le contrôle des adventices peut favoriser le maintien de certaines espèces pouvant apporter des fonctions additionnelles au dispositif de biorétention. Par exemple, le trèfle blanc, le méliot, et l'oxalis possèdent des propriétés intéressantes : la floribondité, l'esthétisme, l'attrait pour les pollinisateurs ou la faune. En fonction de leur cycle de vie, certaines adventices sont bénéfiques dans les biorétentions, car elles contribuent à la couverture végétale du sol et l'augmentation de la biodiversité.

4.3.5 SURVEILLANCE

Comme pour plusieurs autres phytotechnologies, il est important de réaliser une surveillance et un suivi rigoureux particulièrement durant les premières années d'implantation afin de préserver le bon fonctionnement hydraulique du système et du développement optimal des végétaux en plus d'anticiper de potentiels problèmes (Tableau 3).

La surveillance est généralement effectuée 1 à 2 fois par an. Les paramètres observés sont les niveaux d'eau accumulés lors d'épisodes pluvieux et le temps nécessaire à leurs infiltrations, soit 48 h pour des précipitations de 25 mm selon la norme CSA W200:18 (Canadian Standards Association, 2018), la santé et la bonne croissance de la végétation ainsi que l'état des zones de sédimentation. Il est aussi possible d'analyser les débits et les caractéristiques physicochimiques de l'eau dans les biorétentions, par contre ces tests sont réalisés très rarement, surtout dans le cadre de projets de recherche (Figure 18). C'est le cas de la ville de Calgary (2016) qui a étudié ces facteurs dans un contexte de suivi de la performance de leurs biorétentions.

Les données de surveillance doivent être documentées pour permettre l'examen des tendances sur une longue période afin de vérifier son efficacité et sa pérennité. Cet historique peut également s'avérer utile dans l'identification des problèmes de fonctionnement de cette phytotechnologie.

4.3.6 RÉPARATION

Elle doit être effectuée dès qu'une déficience est constatée sur le système. Il est préférable de planifier les travaux en période sèche. Il faut d'abord évaluer l'étendue des dégâts et la cause du dysfonctionnement avant d'y remédier. Une inspection visuelle peut aider à identifier les problèmes, tels que des végétaux et des structures abîmés ou encore des zones de sédimentation obstruées. Par la suite, la remise en état inclut la substitution des végétaux endommagés, la réfection des zones de sédimentations, le remplacement du substrat et du paillis, la réparation de la structure et la restauration de la pente et de la forme d'origine des biorétentions.

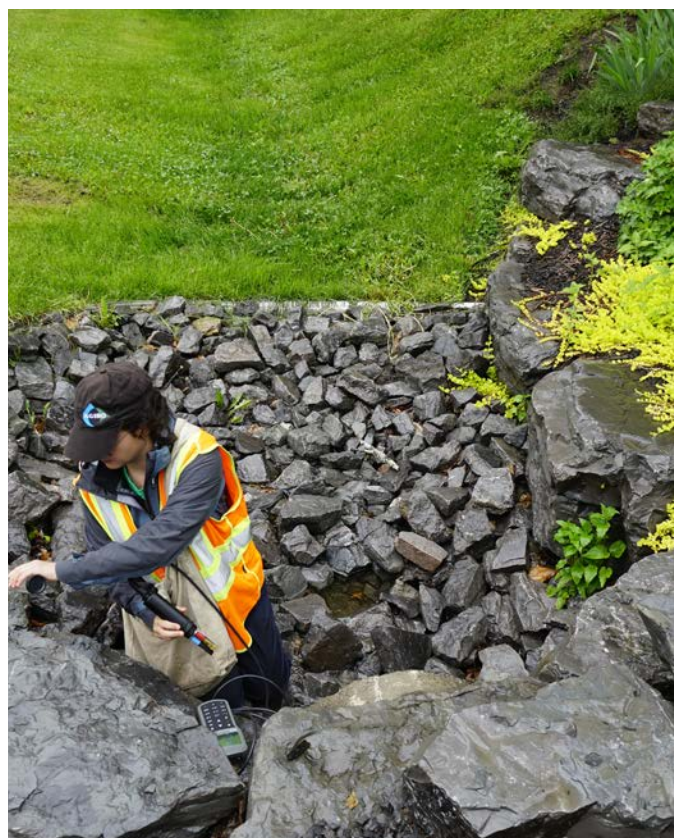


Figure 18 – Analyses physicochimiques de l'eau entrant dans la zone de décantation d'une biorétention.

4.3.8 RÉCAPITULATIF

Tableau 3 : Activités et calendrier de l'entretien des biorétentions. Contenu adapté de STEP (2018), Calgary (2016) et Dugué (2022)

Activités	Calendrier
Inspecter la santé et la densité des végétaux	Après chaque événement de pluie majeur (> 25 mm), chaque trimestre durant les deux premières années, par la suite deux fois par année
Détecter la présence potentielle de dommages engendrés par le passage des piétons et des automobiles; Vérifier les canalisations, les structures de systèmes de prétraitement et l'accumulation de débris, de déchets et de sédiments.	Au moins 3 fois par an. Plus fréquemment, au besoin, pour des raisons esthétiques
Retirer les déchets et les débris des systèmes de biorétention et des structures d'entrée et de sortie d'eau; Retirer les sédiments accumulés des systèmes de prétraitement ainsi que des structures d'entrée et de sortie d'eau.	Au besoin, détecté lors de la surveillance
Émonder les arbres, tailler les arbustes et les vivaces	La gestion des espèces ligneuses se fait au besoin tandis que les vivaces sont taillées annuellement
Remplacer les végétaux morts	Au besoin
Retirer les végétaux envahissants et les adventices	2 à 3 fois en saison de croissance
Réparer les zones érodées ou faiblement végétalisées; Retirer les sédiments accumulés sur le substrat lorsque ceux-ci sont secs et dépassent 25 mm d'épaisseur; Si des rigoles sont visibles à la surface, un nivelage et une revégétalisation pourraient être nécessaires.	Au besoin, détecté lors de la surveillance

4.4 HAIES BRISE-VENT

Les haies brise-vent sont des rangées d'arbres ou d'arbustes plantés dans le but de protéger des zones spécifiques ou des infrastructures contre les vents forts. Elles ont plusieurs fonctions et avantages, les principales étant les suivantes (Borin *et al.*, 2010; Hamel, 2010; Lacoste *et al.*, 2015; Vézina, 2001; Vézina, 2008) :

- 🍃 Protéger les cultures agricoles, les jardins, les parcs, les aires résidentielles, le bétail ou tout autre élément exposé aux vents, au bruit et à la poussière;
- 🍃 Augmenter le rendement agricole;
- 🍃 Freiner la dérive aérienne des pesticides;
- 🍃 Lutter contre l'érosion des sols;
- 🍃 Limiter la pollution des eaux de surface;
- 🍃 Intercepter les odeurs;
- 🍃 Améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments en réduisant les coûts de chauffage;
- 🍃 Accroître la sécurité routière.

Une composition spatiale avisée d'espèces d'arbres, d'arbustes et d'herbacées diversifiées assure le bon fonctionnement des haies brise-vent, au cours des années. Les espèces choisies doivent être en mesure de résister aux rafales, aux maladies et aux ravageurs pour assurer leur croissance optimale et ainsi le maintien des services rendus à long terme. Cette phytotechnologie peut aussi jouer un rôle important dans la conservation de certaines espèces fauniques en servant d'habitat, de corridor ou, au contraire, de barrière au déplacement (Davies et Pullin, 2007). Pour préserver ces avantages, il est important de planifier soigneusement l'entretien des haies brise-vent en adoptant des pratiques durables.

L'entretien des haies brise-vent se résume principalement à l'irrigation lorsque nécessaire, au remplacement des végétaux morts, au désherbage, à la taille au besoin et à la protection contre les rongeurs et les brouteurs (Figure 19). Cette phytotechnologie devrait normalement nécessiter très peu d'interventions, surtout après les premières années d'implantation.

4.4.1 IRRIGATION

Pour que les haies brise-vent restent saines et efficaces, il est primordial de leur fournir une quantité d'eau suffisante durant les 2 ans suivant leur établissement. Le choix des systèmes d'irrigation se fait en fonction des besoins spécifiques de l'assemblage de végétaux, des préférences des propriétaires ou des gestionnaires de terrains et, surtout, des conditions locales. Les plus utilisés sont le goutte à goutte, l'aspersion et les microjets.

Lors de la planification de l'irrigation, il est essentiel de prendre en compte que le taux d'évapotranspiration des végétaux est plus grand en présence de forts vents. Néanmoins, il est déterminant que l'irrigation soit minimale afin qu'ils puissent s'adapter aux conditions édaphiques et climatiques locales. Le choix des espèces est donc très important pour cette phytotechnologie.



PHOTO : BIOPTERRE

Figure 19 – L'ajout de protection contre le broutage augmente le taux de survie des végétaux dans les haies brise-vent lors de leur période d'établissement.

4.4.2 FERTILISATION

Elle n'est normalement pas nécessaire si les espèces ont bien été choisies, toutefois un amendement tel que du compost peut y être ajouté. De plus, en contexte agricole, les végétaux des haies brise-vent sont exposés indirectement aux fertilisants par leur proximité des cultures.

4.4.3 CONTRÔLE DE LA VÉGÉTATION

La taille des haies brise-vent peut commencer à partir de la deuxième année suivant l'implantation et continue jusqu'à ce que le tronc soit assez fort, soit pendant 10 à 30 ans (Vézina, 2008). Elle a pour objectif de contrôler leur hauteur et leur porosité. Près des routes, elle vise aussi à limiter l'obstruction visuelle des automobilistes et des piétons afin de réduire les risques d'accident. Cependant, si sa densité est trop faible, l'importance de leur effet brise-vent diminue.

La taille doit être effectuée conformément à la norme d'entretien arboricole et horticole BNQ 0605-200 (BNQ, 2020). Elle a lieu pour éliminer les branches mortes, malades ou endommagées ou encore pour former la haie. Cette action est primordiale dans l'évolution de cette phytotechnologie, puisqu'elle vise à lui donner la forme et la densité/porosité souhaitées, soit une porosité hivernale de 60 % à 70 % dans le contexte agricole et un de

50 % tout au long de l'année pour la protection des bâtiments (Figure 20; Prime Vert, 2021; Vézina, 2008). Cette étape est cruciale pour assurer le développement adéquat de la haie et une protection efficace contre les vents.

Afin que la taille soit réalisée de façon optimale, il est important de tenir compte de :

Fréquence : Elle dépend de plusieurs facteurs tels que l'objectif de cette phytotechnologie, le taux de croissance des végétaux, la saison et la hauteur recherchée. En général, elle est recommandée 1 à 2 fois par an, soit au printemps et à l'automne;

Outils : Les plus couramment employés sont les taille-haies électriques ou à essence, les cisailles à haie manuelles, les sécateurs et les ébrancheurs. Il est important de s'assurer qu'ils soient tranchants et propres pour éviter de contaminer ou de blesser les végétaux. Pour plus de détails, consultez la norme d'entretien arboricole et horticole BNQ 0605-200 (BNQ, 2020);

Techniques : Elles varient selon l'objectif de la mise en place de cette phytotechnologie et la forme souhaitée (Figure 21). Lorsque nécessaire, il est généralement recommandé de tailler la haie pour que les espèces présentes dans les strates inférieures puissent bénéficier d'une luminosité suffisante à leur croissance.



Figure 20 – La taille de formation des jeunes feuillus dans une haie brise-vent permet de contrôler la forme à maturité et de donner une structure maximisant la résistance aux fortes bourrasques.

En ce qui concerne la gestion des adventices, il est important d'éliminer pendant les trois premiers mois toutes les plantes herbacées pouvant entrer en compétition avec les arbres et les arbustes implantés, d'autant plus s'il s'agit d'EVEE. En fonction

des végétaux choisis, le désherbage ou la tonte peuvent se poursuivre jusqu'à ce qu'ils surplombent la végétation à proximité.

4.4.4 SURVEILLANCE

Effectuée régulièrement, elle permet d'inspecter les végétaux et de remédier promptement aux problèmes avant qu'ils ne causent des dommages importants (Cogliastro, 2022). Elle doit tenir compte des éléments clés spécifiques tels que :

Suivi de la croissance : Un ralentissement de la croissance peut indiquer la présence de ravageur, de carence, le mauvais choix des espèces, etc. Le remplacement rapide des végétaux morts ou en état de dépérissement évite l'apparition de trouées dans celle-ci. Le taux de mortalité dans les premières années est de l'ordre de 5 à 10 % lorsque les végétaux sont plantés sur un paillis de plastique (Vézina, 2008). Ce taux peut être supérieur en l'absence de celui-ci;

Lutte contre les insectes et les maladies : Lors des inspections de surveillance, la personne doit être en mesure de détecter et d'identifier des anomalies comme des feuilles enroulées, anormalement colorées ou perforées, des blessures aux branches ou au tronc ou un nombre excessif d'insectes. Des traitements phytosanitaires peuvent être requis selon les seuils d'intervention. L'utilisation des principes de lutte intégrée est alors recommandée. Les parties détériorées, mortes et malades doivent être éliminées correctement. Les matières organiques peuvent être compostées, transformées en paillis ou disposées de façon appropriée. Il est important de ne pas laisser de grande quantité de biomasses végétales se décomposer autour de la haie, car ils peuvent dans certains cas être la source d'apparition d'autres pathologies.

Protection contre les rongeurs : À titre préventif, il est recommandé en septembre, de faucher les adventices, en bordure du paillis ou dans un rayon de 60 cm du tronc pour dissuader les rongeurs de s'approcher des arbres et arbustes. Il est aussi possible d'installer des spirales de plastique ou de métal autour des troncs afin de les empêcher de les endommager. Parfois permanentes, ces spirales peuvent également être mises en place à l'automne et retirées au printemps;

Protection contre le cerf de Virginie : La pression de cet animal sur les haies brise-vent est forte dans certaines régions de l'est du Canada. Ainsi, des protecteurs mécaniques individuels autour des espèces d'arbres les plus susceptibles d'être broutées peuvent être ajoutés.

4.4.5 RÉNOVATION ET RÉCOLTE DE HAIES BRISE-VENT NATURELLES MATURES

Dans le cas de haies qui agissent naturellement comme brise-vent, il est parfois nécessaire de modifier certaines de leurs propriétés afin de conserver et de maximiser leur efficacité et leurs avantages pendant une longue période; le terme rénovation est utilisé dans cette situation. On procède généralement à une réduction de la largeur des haies et à un ajustement de leur porosité en fonction des besoins de protection.



PHOTOS : BIOTERRRE

Figure 21 – Les espèces d'arbres choisies doivent tenir compte du port de l'arbre à maturité, toutefois une taille de formation peut permettre d'éviter l'obstruction du passage de la machinerie agricole.

Il est aussi possible de procéder à la récolte de végétaux matures et à leur remplacement, il s'agit notamment d'un aspect primordial de l'agroforesterie. Cependant, la récolte de matière ligneuse est une perturbation considérable de la haie et peut être la cause de l'introduction d'EVEE ou du développement trop important de végétaux déjà présents.

4.5 PLANTATIONS EN BANDES RIVERAINES

Les bandes riveraines sont des zones tampons de végétation définies par un cadre réglementaire, souvent implantées en milieu agricole, dans les lieux de villégiature ou même en contexte forestier (Figure 22). Ce sont des plantations d'espèces ligneuses (arbres et arbustes) ou non ligneuses (herbacées et graminées) qui bordent les plans (lacs, étangs, etc.) et cours d'eau douce. Le choix des espèces implantées varie en fonction des conditions environnementales et climatiques, des végétaux naturellement présents sur le site et du niveau de perturbation humaine. En plus de leur importance écologique, ces zones peuvent également jouer un rôle substantiel dans la protection contre l'érosion et la régulation de la qualité de l'eau. De plus, il est désirable

d'y créer des écosystèmes autonomes avec le moins d'intervention possible. À ce sujet, toutes activités effectuées dans le littoral ou la rive sont assujetties à l'obtention d'une autorisation du MELCCFP, pour plus d'informations, voir l'aide-mémoire produit par le MELCC (2022), le Règlement sur les activités dans des milieux humides, hydriques et sensibles (*Règlement sur les activités dans des milieux humides, hydriques et sensibles*, RLRQ, c Q-2, r. 0.1.) et le Régime transitoire de gestion des zones inondables, des rives et du littoral (*Règlement concernant la mise en œuvre provisoire des modifications apportées par le chapitre 7 des lois de 2021 en matière de gestion des risques liés aux inondations*, RLRQ, c Q-2, r. 32.2.).

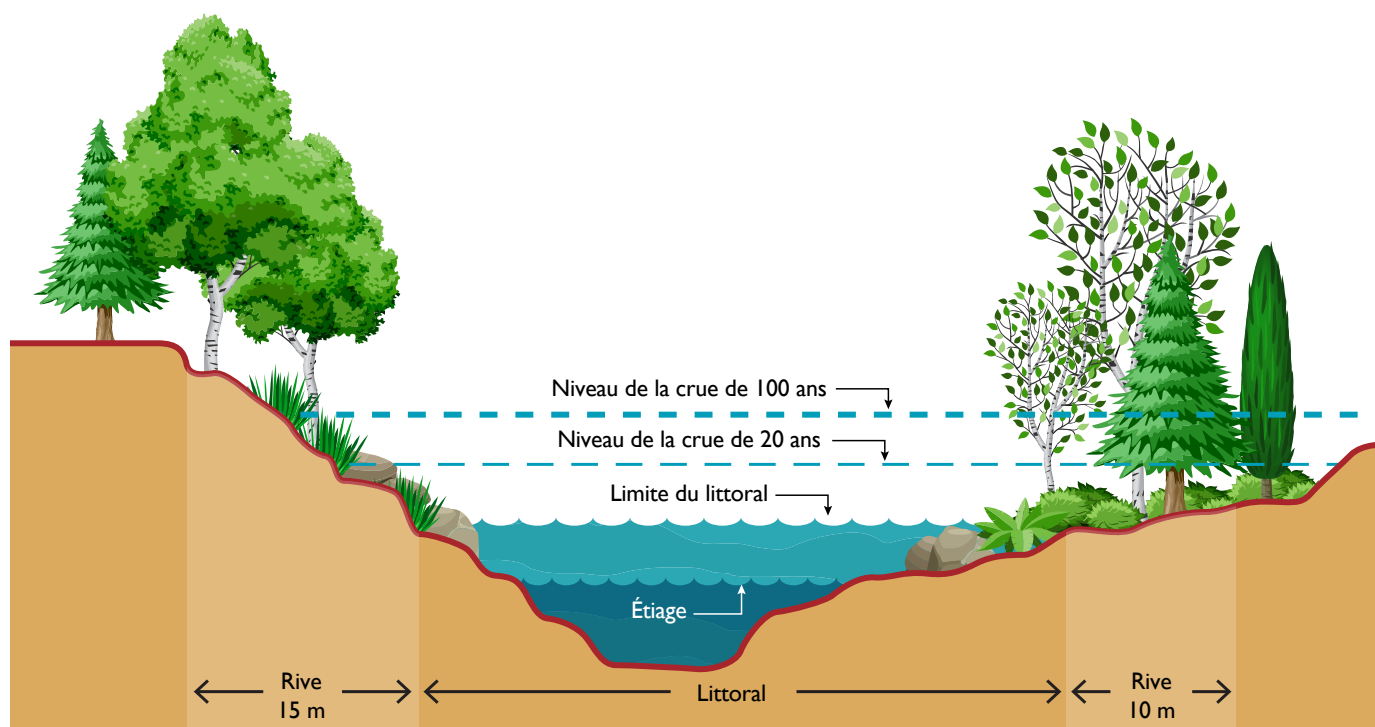


Figure 22 — Délimitation du littoral, des rives et des zones inondables, telle que définie dans le Règlement transitoire de gestion des zones inondables, des rives et du littoral entré en vigueur depuis le 1^{er} mars 2022. Adapté du MELCCFP (2023).

Les bandes riveraines sont d'une importance cruciale pour le maintien de l'équilibre et de la fonctionnalité de l'écosystème intermédiaire entre la zone terrestre et aquatique. Leurs principaux avantages sont les suivants :

Protection contre l'érosion et filtration des eaux de ruissellement : Elles sont des zones tampons naturelles qui stabilisent les berges des plans et cours d'eau douce contre l'érosion causée par les vagues et les courants qui peut engendrer des glissements de terrain, la détérioration de la qualité de l'eau, etc. Les réseaux racinaires absorbent aussi les nutriments et certains polluants présents, diminuant ainsi la quantité qui atteint les plans et cours d'eau (Hénault-Ethier et al., 2019);

Conservation de la biodiversité : L'aspect unique et fragile de ces zones d'interface est également un habitat pour une faune et une flore spécifique, différentes des milieux aquatiques et terrestres adjacents. La végétation surplombante des bandes riveraines crée également un effet d'ombrage qui participe à la réduction de la température de l'eau.

4.5.1 IRRIGATION

Les plantations en bandes riveraines, par définition, sont à proximité des plans et cours d'eau douce, ce qui fait qu'elles sont plus rarement exposées à des stress hydriques importants si les végétaux qui y sont implantés ont eu le temps d'étendre leur système racinaire en profondeur. En minimisant l'irrigation de surface, le développement de leurs racines est favorisé, ce qui est un bon indicateur de l'autonomie de ces milieux à long terme. Il est à noter toutefois que la disponibilité de l'eau varie selon le gradient de pente de la berge et que le haut de berge peut être un milieu relativement xérique. Ainsi, l'irrigation des bandes riveraines est uniquement primordiale au début de la période d'implantation, soit durant la première année de croissance et l'année suivante pour des interventions ponctuelles. Cela permet de minimiser l'érosion des sols par ruissellement qui peut être causé par une irrigation trop importante. Dans ce contexte, il est généralement recommandé d'installer des systèmes provisoires de gicleur amovible ou de tuyaux suintants enfouis dans la partie supérieure de la bande riveraine ou selon la dynamique de sa pente.

4.5.2 FERTILISATION

Puisque les bandes riveraines ont pour principale fonction la protection des plans et cours d'eau qu'ils bordent, il est primordial que la fertilisation ne participe pas à l'eutrophisation de ces derniers. La sélection du type de fertilisant et un dosage adéquat limiteront leur ruissellement, car l'infiltration d'une trop grande quantité de nutriments peut entraîner le lessivage de ceux-ci dans les plans et cours d'eau douce. Il est à noter que la plantation d'espèces végétales adaptées aux conditions présentes (submersion temporaire, anoxie du sol, etc.) ne devrait pas nécessiter de fertilisation. Des amendements peuvent toutefois être utilisés lors de sa mise en place.

4.5.3 NETTOYAGE

Le nettoyage de ces ouvrages consiste à retirer tout matériel pouvant limiter l'établissement et la croissance des végétaux. Ce ramassage manuel des déchets et des débris est généralement effectué suite à une crue ou un événement météorologique important (Figure 23). Un des objectifs de cette phytotechnologie est de créer un écosystème fonctionnel et autonome. Dans cette optique, il est à préciser que les feuilles mortes et les petits débris organiques, faisant partie de ce milieu riverain, doivent être laissés en place. De manière générale, la litière du sol est essentielle pour la fonctionnalité des écosystèmes :

Raison du nettoyage : L'objectif est de retirer les débris et autres matériaux qui peuvent obstruer les plans et cours d'eau ou empêcher la croissance des plantes. Il peut également être effectué pour réduire les risques d'inondations et de débordements en enlevant les obstacles. Les travaux sur le littoral sont interdits sans permis et octroyés au niveau municipal par les paliers supérieurs (*Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables*, RLCQ, c Q-2, r 35, art. 3.1) ;

Fréquence : Elle dépend de la situation de la bande riveraine et des espèces présentes. Il est important de ne pas nettoyer trop souvent ou trop peu pour ne pas trop perturber l'écosystème et pour éviter une accumulation excessive de déchets ;

Types de résidus : S'ils sont organiques, ils peuvent être compostés ou employés pour la fertilisation, tandis que les autres doivent être éliminés adéquatement ;

Outils : Les outils manuels tels que les râteaux et les pelles peuvent être utilisés pour enlever les débris et minimiser l'impact environnemental, tandis que faire appel à de la machinerie doit être limitée pour éviter la compaction du sol.



PHOTO : CHLOÉ FRÉDETTE

Figure 23 — Lors de crues ou d'événements météorologiques importants, des déchets et du matériel végétal peuvent s'accumuler dans la bande riveraine et nécessiter un nettoyage.

4.5.4 CONTRÔLE DE LA VÉGÉTATION

Comme mentionné précédemment, les opérations en bande riveraine sont indésirables, et certaines sont assujetties à un cadre réglementaire strict, de la sorte les interventions ne sont pas permises en dessous de la limite du littoral, anciennement appelée la ligne des hautes eaux. La taille des végétaux est toutefois possible, mais pourrait affecter la capacité de cette phytotechnologie à réaliser ses fonctions écologiques. Ainsi, elle est généralement non recommandée, en particulier pour les ouvrages qui se veulent un écosystème fonctionnel. Si la taille de la végétation est nécessaire, la biomasse engendrée doit être retirée lors de cette intervention.

La taille des arbustes peut être effectuée dans les premières années de plantation s'il est déterminé qu'ils pourraient bénéficier d'une telle opération pour favoriser leur croissance. Ensuite, il est préférable d'éviter d'intervenir sauf si les arbustes sont dépérissants, morts, non sécuritaires ou s'ils pourraient impacter la stabilité de la berge (Figure 24; Québec Vert, 2013). Dans le cas des arbres, l'élagage peut être réalisé durant les premières années d'établissement, puis uniquement, si les branches penchent trop vers le plan ou cours d'eau et sont donc dangereuses, si elles sont mortes ou faibles au point d'affecter la survie de l'arbre ou si elles obstruent le passage de l'eau (Québec Vert, 2013).

De plus, lorsque des espèces ligneuses sont implantées dans l'aménagement, il est souvent nécessaire, durant les deux premières années, de s'assurer de la présence d'un couvert végétal dense du sol (souvent des herbacés idéalement indigènes) afin d'empêcher la colonisation de ce milieu par des EVEC comme le roseau commun (*Phragmites australis* subsp. *australis*) ou la renouée du japon (*Reynoutria japonica* var. *japonica*). Ainsi, il y a une surveillance à faire au niveau de ces espèces problématiques (voir la section 3.5 sur les EVEC).



PHOTO : MAXIME TISSERANT

Figure 24 — Les espèces sont sélectionnées et agencées pour réduire le plus possible les interventions. Ici, les espèces arbustives sont *Alnus incana* subsp. *rugosa*, *Cornus stolonifera*, *Prunus virginiana* et *Salix* spp.

4.5.5 SURVEILLANCE

La surveillance, ou le suivi, des plantations en bandes riveraines est une pratique essentielle pour apprécier l'état de santé de ces zones écologiquement importantes et pour prendre des mesures de conservation appropriées. Le MELCCFP a mis en place un outil permettant d'évaluer la qualité des écosystèmes riverains, notamment sur la base des strates de végétation présentes. Cet outil, l'indice de la qualité des bandes riveraines (IQBR), sert à estimer la condition écologique d'un milieu riverain (MDDEP et CRE Laurentides, 2007). Pour établir un plan de suivi en se fondant sur l'IQBR, il faut prendre en compte :

Objectif : Ils peuvent varier selon les besoins locaux et des priorités de conservation. L'IQBR vise à déterminer la capacité de l'écosystème riverain à maintenir et à soutenir les communautés d'organismes terrestres et aquatiques dans un état d'équilibre et de s'assurer que les fonctions écologiques sont préservées. Ils peuvent comporter l'évaluation de la qualité de l'eau, de la biodiversité, de l'érosion, de l'habitat faunique, de l'utilisation des terres et de la santé générale de la bande riveraine. Les mesures de suivi peuvent inclure par

exemple le nombre d'espèces, la couverture au sol par la strate herbacée, la densité du couvert forestier, etc.;

Méthode : Des relevés visuels, photographiques, géographiques, de végétation, d'insectes et de la faune, de changements temporels ainsi que des échantillonnages d'eau et du sol peuvent être effectués. L'IQBR établit par exemple une cote pour chaque composante de l'écosystème riverain : la forêt, les arbustaies, les herbaçales, les cultures, les friches et pâturages, les coupes forestières, le sol nu, le socle rocheux et les infrastructures;

Fréquence : La surveillance peut être effectuée à court terme pour répondre à des exigences spécifiques, ou à long terme pour mesurer les changements temporels. Elle dépend principalement des objectifs de conservation, des besoins locaux et des ressources disponibles;

L'évaluation des résultats : Elle est faite et utilisée afin d'orienter les décisions de conservation. De plus, ces résultats sont importants pour détecter les zones à problèmes, pour quantifier les impacts des activités humaines et pour identifier les espèces en danger.

4.5.6 RÉPARATION

La réparation des bandes riveraines est une tâche importante pour maintenir leur fonctionnalité et leur biodiversité. Plusieurs guides de bonnes pratiques pour leur restauration peuvent servir de référence, en particulier le Guide de bonnes pratiques : Aménagement et techniques de restauration des bandes riveraines (FIHOQ, 2013), la norme BNQ 0605-100 (BNQ, 2019). Les principales étapes à suivre sont :

Évaluation des dommages : Ils peuvent être occasionnés par une variété de facteurs, notamment l'érosion, les inondations, les activités anthropiques, les maladies, les conditions météorologiques extrêmes et les changements climatiques. Ainsi, l'évaluation doit identifier leur nature et leur étendue de même que leurs causes sous-jacentes;

Choix des mesures de réparation : Elles dépendent de la nature et de l'étendue des dommages ainsi que des objectifs de conservation. Les techniques utilisées peuvent inclure la plantation de nouveaux végétaux, la restauration des zones humides, la construction de structures de protection contre l'érosion, la modification des pratiques agricoles et la réduction des répercussions des activités humaines;

Mise en œuvre des réparations : Elles peuvent être réalisées par des professionnels ou par des volontaires sous la supervision d'experts et elles doivent être effectuées de manière à minimiser les impacts sur l'écosystème de la plantation en bande riveraine et à maximiser leurs avantages;

Suivi : Ils sont importants pour s'assurer que les mesures de réparation ont atteint leurs objectifs de conservation. Le suivi peut inclure des relevés de végétation, de qualité de l'eau, de la hauteur de la nappe phréatique, d'érosion et d'insectes et de la faune. Les résultats peuvent être utilisés pour ajuster les solutions de restauration et pour orienter les futures actions de préservation.

4.6 OUVRAGES DE STABILISATION DES PENTES ET DES BERGES

Les pentes et les berges s'érodent plus rapidement que plusieurs autres types de milieux, ce qui peut engendrer des risques importants pour les infrastructures présentes et les personnes qui fréquentent ces lieux. Les phénomènes érosifs consistent en des pertes de particules de sol et sont surtout causés par l'eau, par exemple les précipitations, les mouvements des masses d'eau et les épisodes de gel-dégel (Chassiot et al., 2020). Le tout est aussi accentué par les événements climatiques extrêmes, l'ampleur de la pente, l'activité humaine et faunique et les catastrophes naturelles. La stabilisation de ces zones est donc primordiale afin de limiter les impacts de l'érosion.

Les techniques de stabilisation des pentes (hors berges) et des berges sont différentes et peuvent varier en fonction des conditions du milieu (inclinaison, exposition, granulométrie du sol, hauteur de talus, etc.) et du résultat projeté (usage anthropique, visibilité, etc.). Les méthodes couramment employées en génie civil comprennent l'enrochement, la construction de murs de soutènement, l'installation de dispositifs de drainage et l'injection de matériaux de renforcement des sols. Toutefois, pour y arriver, il est aussi possible de recourir à des végétaux, ce qui permet également d'augmenter les fonctions écologiques, la qualité esthétique et la biodiversité (Tisserant et al., 2020).

Le génie végétal ou phytotechnologie appliquée à la stabilisation utilise plusieurs techniques pour stabiliser les pentes de talus et de berges et protéger ces dernières contre l'érosion : les fascines, les lits de plants et plançons, les matelas de branches ou les couches de branches à rejets. Pour plus de détails, vous pouvez consulter la fiche technique de la SQP (Société québécoise de phytotechnologie, 2019). Les espèces sélectionnées pour ces travaux au Québec sont surtout les saules arbustifs (Figure 25), en raison de leur croissance aérienne et racinaire rapide et de leur capacité d'adaptation aux conditions des pentes et des berges (niveaux d'eau fluctuants, expositions à des vents violents, sols pauvres, etc.). Certaines méthodes mixtes, comme les caissons végétalisés, sont aussi employées. Finalement, pour les zones où la pente ou les mouvements d'eau sont moins importants, la plantation d'autres espèces adaptées aux différents stress présents est possible. Toutefois, si le milieu est utilisé par l'humain de façon récréative, résidentielle, il faut également faire un choix de végétaux qui ne seront pas perçus négativement par les usagers et ainsi augmenter l'acceptabilité sociale du projet.

Une fois l'installation des boutures, plançons, fagots et branches terminée et le tout recouvert de substrat, il est fréquemment nécessaire d'épandre des semences d'herbacées de taille moyenne, généralement indigènes, afin de couvrir le sol pour le stabiliser lors des deux premières années de croissance des végétaux ligneux implantés. Cela permet aussi pour prévenir l'établissement et la prolifération d'EVEE comme le roseau commun (*Phragmites australis* subsp. *australis*) ou la renouée du Japon (*Reynoutria japonica* var. *japonica*) dans ce milieu, qui serait autrement à nu durant une longue période (voir la section 3.5 sur les EVEE).



PHOTO : MAXIME TISSERANT

Figure 25 — Les saules arbustifs sont souvent utilisés dans les ouvrages de stabilisation de berges. Ici, des matelas de branches de *Salix interior* sont implantés avec un enrochement de pied de berge.

De manière générale, l'entretien d'un ouvrage de stabilisation de pente doit prendre en compte les contraintes en place et l'utilisation du site. Lorsqu'elles sont importantes, il est recommandé de faire un recépage (coupe de la tige des saules arbustifs à sa base) régulier des espèces implantées pour stimuler le développement de leur système racinaire aux 3 à 5 ans et d'apporter des correctifs si certaines sections de l'ouvrage ne présentent qu'une reprise partielle. Bref, de règle générale, l'entretien s'y limite à remplacer les végétaux morts.

4.6.1 IRRIGATION

Si des espèces indigènes bien adaptées au milieu ont été choisies, l'irrigation qui y est nécessaire devrait être minimale puisque l'objectif de cette phytotechnologie est de créer un écosystème autonome qui évoluera sans entretien, au même titre qu'une forêt riveraine naturelle n'est pas irriguée.

Fréquence : À la suite de la mise en place des végétaux, il est essentiel d'irriguer assidûment durant les premières semaines afin de favoriser l'enracinement (Figure 26), mais varie en fonction des conditions météorologiques. Il est aussi important qu'il y ait un bon drainage pour que les végétaux puissent s'adapter à vivre en condition de stress hydrique. L'arrosage prend fin après la première année de croissance;

Méthode : Puisque cet apport en eau est temporaire, aucune structure permanente n'est installée et l'irrigation est réalisée soit de façon manuelle, avec des gicleurs ou, parfois, au goutte à goutte.



PHOTO : BÉATRICE GERVAIS-BERGERON

Figure 26 — L'irrigation avec un système de tuyau suintant est parfois utilisée pour favoriser l'enracinement des végétaux dans les premières années d'un ouvrage de stabilisation de pente.

4.6.2 FERTILISATION

Pour cette phytotechnologie, la fertilisation est peu utilisée. Ces zones plus à risque d'érosion importante sont aussi souvent près des cours d'eau, ce qui fait que la fertilisation est à proscrire afin d'éviter l'eutrophisation des milieux aquatiques. Cependant, des amendements (compost, fumier, etc.) sont ajoutés au substrat avant la plantation des végétaux et ils permettent d'accélérer leur développement racinaire, et ainsi réduire l'érosion. Également, le substrat de croissance ne doit pas être trop riche en nutriment pour prévenir la forte prolifération d'adventices.

4.6.3 CONTRÔLE DE LA VÉGÉTATION

Lors de la première année, il est important de visiter le site mensuellement afin de retirer les débris et les adventices, et plus particulièrement les EVEC. Pendant la 2^e année, cette surveillance se fait principalement au début de la saison de croissance. Après 5 ans, les visites sont uniquement nécessaires annuellement. Finalement, il faut s'assurer que les éléments collectés lors du nettoyage sont disposés de manière appropriée. La biomasse taillée peut être compostée ou éliminée selon les réglementations locales.

Fréquence et méthode de taille : Elles dépendent principalement des espèces choisies, de leur taux de croissance, de leur densité et des conditions environnementales. Il se peut que certains végétaux nécessitent un recépage (Figure 27), une taille annuelle ou plus fréquente. L'élagage des parties détériorées permet d'aider à leur développement. Il est recommandé de les tailler minimalement une fois aux 5 à 6 ans. Cette fréquence peut différer selon des cas spécifiques. Il faut surtout s'abstenir de le faire lors de leur période de croissance active. Faite de façon excessive ou inappropriée, elle peut les endommager et, ainsi, nuire à leurs fonctions;

Technique : Son choix dépend de l'espèce et de la densité de la végétation. Pour les ligneux, comme les arbustes, il est recommandé de tailler les branches plus anciennes à la base. La méthode de taille la plus adaptée est la coupe nette, branche par branche, pour prévenir la contamination croisée. Pour les herbacés, il est préférable de couper les tiges à environ un tiers de leur hauteur en évitant de le faire trop près de leur base, pour ne pas les endommager. Lorsque l'aménagement est en milieu naturel, loin des zones urbanisées, il n'est pas obligatoire de faire la taille des végétaux.

4.6.4 Surveillance

La surveillance des végétaux utilisés pour la stabilisation des pentes et des berges peut se faire à travers des inspections de routine qui vise à déceler des signes de dommages, de carences et de maladies ainsi que la présence d'adventices, d'EVEC ou de problèmes de croissance. Cette tâche doit être effectuée par une personne ayant des connaissances en horticulture afin de pouvoir en détecter la source et choisir la bonne technique pour y remédier. Les conditions environnementales, les ravageurs, les maladies, les événements climatiques extrêmes ou l'activité humaine peuvent aussi avoir des conséquences importantes pour les végétaux implantés dans ces ouvrages.

🍃 **Fréquence** : Hebdomadaires pendant le premier mois, elles passent ensuite à un rythme mensuel pendant la première saison de croissance et les premiers mois de la deuxième. Elles ont aussi lieu suite à de fortes pluies ou des crues importantes. Par la suite, cette surveillance est faite uniquement annuellement. Après 5 ans, les interventions sont assez rares.

🍃 **Mesures de remédiation** : De manière générale, il faut minimiser l'entretien de ces ouvrages, et ainsi recréer des milieux autonomes et durables. Ces dispositions peuvent inclure le remplacement des végétaux morts (souvent garanti pendant une certaine période par l'entrepreneur; parfois se-

lon un pourcentage de reprise accepté), la réparation des structures de soutien, la réparation des systèmes de drainage ou même l'ajout de matériaux de stabilisation supplémentaires.

🍃 **Suivi** : Le substrat et les eaux de ruissellement peuvent également être analysés afin de mesurer les concentrations de nutriments, le pH, la matière en suspension, la matière organique dissoute et d'autres facteurs physicochimiques qui peuvent influencer la santé des végétaux et les plans et cours d'eau.



PHOTO : SÉBASTIEN DE DANIEL

Figure 27 – Le recépage des saules arbustifs durant leur période de dormance stimule la repousse lors de la saison de croissance subséquente.

4.7 MARAIS FILTRANTS

Les marais filtrants, aussi appelés marais épurateurs, sont des systèmes végétalisés de traitement des eaux usées, notamment des effluents municipaux, industriels et agricoles. La mise en commun des bons végétaux, du bon substrat et d'une bonne conceptualisation permet d'éliminer efficacement toute une variété de polluants dans l'eau (Vymazal, 2011).

Cette phytotechnologie est une alternative écologique et économique aux systèmes de traitement des eaux usées conventionnels, car elle utilise des processus naturels pour éliminer les polluants et ne nécessite que peu d'énergie pour fonctionner. De plus, les marais filtrants peuvent fournir un habitat pour la faune et contribuer à la conservation de la biodiversité locale (Rousseau, 2021).

Il existe plusieurs types de marais filtrant, mais nous nous concentrerons ici sur le type le plus adapté au climat nordique et à l'usage domestique, soit le marais filtrant sous-surfacique à flux horizontal. Ce marais fonctionne en faisant passer l'eau usée horizontalement à travers un lit de sable ou de gravier (granulométrie de 2 à 15 mm) recouvert de végétaux des milieux humides enracinés, aussi appelés macrophytes. Parmi les espèces les plus utilisées, il y a les roseaux, les scirpes et les quenouilles (SQP, 2014; Vymazal, 2011).

Les marais filtrants fournissent un traitement secondaire des eaux usées et ils nécessitent un bassin de sédimentation ou une fosse septique en prétraitement afin de retirer un maximum de solides en suspension (Figure 28). De plus, ce système peut nécessiter l'ajout optionnel d'une méthode supplémentaire d'enlèvement du phosphore, puisque la capacité de rétention du phosphore par le marais peut diminuer au cours du temps. Dans ce type de marais filtrant, il peut aussi y avoir des tubes d'aération sous le substrat afin d'y contrôler le niveau d'anoxie. Lorsqu'il y a présence de coliformes fécaux dans l'affluent, il est aussi nécessaire d'ajouter une couche de sable sur le substrat afin de pouvoir se conformer aux critères des systèmes de classe V et ainsi exercer un contrôle sur ces pathogènes selon la norme NQ 3680-910 pour les systèmes d'épuration autonomes pour les résidences isolées (BNQ, 2004).

Au Québec, comme la réalisation de marais filtrant est une technologie secondaire avancée de traitement des eaux, elle est régie par le règlement sur l'évacuation et le traitement des eaux usées des résidences isolées (*Règlement sur l'évacuation et le traitement des eaux usées des résidences isolées*, RLRQ, c. Q-2, r. 22), et la conceptualisation qui est certifiée est l'Écophyltre, notamment le type T (MDEP, 2012a) qui contient des quenouilles (*Typha latifolia*) et le type P (MDEP, 2012b) qui contient des roseaux (*Phragmites australis* subsp. *australis* ; Figure 30).

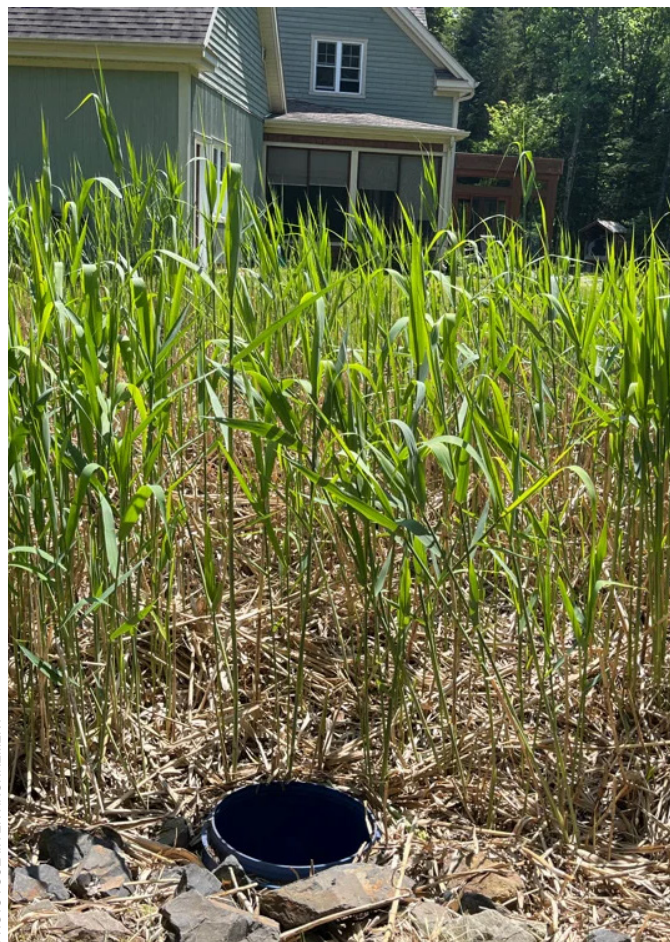


PHOTO : OCLAIR ENVIRONNEMENT

Figure 28 – Dans le contexte du traitement des eaux usées domestiques, le prétraitement des marais filtrants horizontaux sous-surfaciques est souvent réalisé à l'aide d'une fosse septique.

Le dispositif supplémentaire pour l'enlèvement du phosphore peut être situé en amont ou aval du marais filtrant. Lorsqu'il est en amont, des sels d'alun sont ajoutés à l'aide d'un système automatisé afin de faire précipiter le phosphore dissous. Un procédé alternatif pour l'éliminer est d'inclure un post-traitement composé d'une chambre avec un substrat absorbant, souvent du gravier, sur lequel le phosphore peut se fixer.

Si la conception du marais filtrant est bien adaptée aux conditions auxquelles ce dernier est exposé, l'entretien est minimal. Plus de détails à propos de la conceptualisation sont présentés dans la fiche technique de la SQP à ce sujet (Société québécoise de phytotechnologie, 2014). La durée de vie d'un marais filtrant est estimée de 15 à 20 ans, en raison du colmatage des pores par lesquels l'eau y circule (Nivala et al., 2012). Cette problématique, qui réduit grandement la vitesse de mouvement de l'eau, est causée par une accumulation de matière organique. Toutefois, ce processus est normal dans le cycle de vie de cette phytotechnologie.

4.7.1 NETTOYAGE DES PRÉ- ET POST-TRAITEMENTS

Le nettoyage régulier des parties auxiliaires du marais filtrant est très important pour maintenir l'efficacité et s'assurer de la durée de vie maximale du marais.

Prétraitement : Le nettoyage du bassin de sédimentation peut être effectué en utilisant de l'eau sous pression, des aspirateurs de substrat ou à l'aide de pelles. Les matières organiques retirées peuvent être compostées ou jetées, dépendamment de leur composition. Le volume à enlever varie en fonction de la taille du marais filtrant et des quantités de matières entrant dans le système. En général, les bassins de sédimentation doivent être vidés tous les 2 à 5 ans, mais il est également nécessaire de se référer aux recommandations de l'entreprise qui l'a installé, le cas échéant. S'il s'agit plutôt d'une fosse septique qui est en prétraitement, il faut aussi en faire la vidange en fonction des recommandations de l'entreprise qui en a fait l'installation ou des normes municipales en vigueur. Ainsi, cela empêchera l'introduction de majeures quantités de matières organiques qui peuvent augmenter la vitesse de colmatage du substrat.

Post-traitement : Il est nécessaire de retirer la structure qui contient le gravier adsorbant pour le remplacer lorsque les analyses d'eaux annuelles montrent un niveau de phosphore sortant trop important par rapport à celle prévue durant la conception du système.

La fréquence de ces nettoyages dépend énormément de la conception du marais filtrant, mais il est essentiel qu'il y ait une surveillance à ce sujet chaque année.

4.7.2 CONTRÔLE DE LA VÉGÉTATION

Pour assurer le bon fonctionnement du marais filtrant, il faut s'occuper de la gestion de la biomasse des macrophytes, mais aussi celle des adventices et des EVEC qui peuvent croître dans ce milieu riche en nutriment.

Taille des macrophytes : Bien qu'elle ne soit pas toujours essentielle, elle est parfois recommandée dans certaines circonstances. Elle se fait alors à l'automne, lorsqu'il y a eu sénescence des tiges aériennes des végétaux et que leurs ressources sont stockées dans leur biomasse souterraine. La coupe peut être réalisée avec une débroussailleuse ou un sécateur, dépendamment des contraintes spatiales et temporelles. Il est aussi souhaitable de la laisser sur place et de l'égaliser à l'aide d'un râteau pour créer une barrière isolante durant l'hiver. Il est, par contre, indispensable de la retirer au printemps pour faciliter la reprise de la croissance des macrophytes et éviter que les résidus engendrent un ajout trop important de matière organique dans le marais filtrant, ce qui augmenterait sa vitesse de colmatage.

Gestion des adventices : La présence de végétaux indésirables peut avoir un impact négatif sur le rendement et la conductivité hydraulique du système de traitement (Joseph, 2011), étant donné qu'ils entrent en compétition avec les espèces implantées dans le marais filtrant. Un désherbage manuel est souvent nécessaire au cours de la période d'établis-

sement des macrophytes, normalement les deux premières années. Il est important de retirer les adventices à la main pour éviter de perturber les macrophytes et le substrat du marais. Cette action pourrait devoir être réalisée fréquemment pendant les premiers mois de l'installation, puisque la biomasse aérienne des macrophytes n'est alors pas encore assez dense pour empêcher la croissance des adventices. À partir de la deuxième année, le désherbage est fait pendant la surveillance régulière et selon les besoins.



PHOTO : OCLAIR ENVIRONNEMENT

Figure 29 – Dans ce marais filtrant entouré de roches, le roseau commun (*Phragmites australis* subsp. *australis*) a une densité assez importante pour prévenir à la croissance des adventices.

4.7.3 SURVEILLANCE

Il est recommandé d'inspecter le marais filtrant de manière générale pour la présence de débris et de végétaux morts et d'adventices, mais aussi pour vérifier le niveau de croissance des macrophytes, les niveaux d'eau dans les piézomètres et le fonctionnement des tuyaux d'aération du substrat, si présent. Elle est effectuée minimalement bisannuellement pour un maximum d'une fois par mois durant la saison de croissance. Il s'agit de l'opération d'entretien la plus importante, d'autant plus lors des deux premières années du dispositif. Dans certains cas, les marais filtrants naturalisés ont tendance à parvenir à un équilibre dynamique de croissance et de développement par eux-mêmes.

De plus, la membrane d'étanchéité ou une paroi du système peut être percée, ce qui peut engendrer une fuite d'eau par infiltration dans le sol autour du marais. Ces eaux usées non traitées qui s'y échappent causent par le fait même un stress hydrique aux macrophytes.

Des tests physicochimiques des eaux entrantes et sortantes doivent être effectués minimalement deux fois par an. Le Règlement sur l'évacuation et le traitement des eaux usées des résidences isolées (RLRQ, chapitre Q-2, r. 22) classe les marais filtrants sous-surface à flux horizontal dans la catégorie des technologies avancées de traitement secondaire des eaux usées. Ainsi, uniquement trois critères de qualité doivent être examinés, dont deux provenant des effluents, soit la demande biochimique en oxygène et la matière en suspension qui doivent toutes les deux ne pas excéder 15 mg/L pour les Écophyltre-T (MDEP, 2012a) et 10 mg/L pour les Écophyltre-P (MDEP, 2012b; Figure 30). Le troisième critère de qualité concerne la présence de coliformes fécaux, cette donnée est récoltée à l'aide d'un échantillon du filtre à sable.



PHOTO : JACQUES BRISSON

Figure 30 – Les marais filtrants de type Écophyltre-P sont colonisés par le roseau commun (*Phragmites australis* subsp. *australis*), une espèce exotique envahissante au Québec, mais qui a de multiples avantages pour l'épuration de l'eau.

4.7.4 CORRECTION DU COLMATAGE

Le colmatage du système se produit lorsque les pores sont bloqués. S'il est trop important, le niveau d'eau peut se retrouver au-dessus de la surface du substrat. Dans des cas moins graves, il cause un mouvement préférentiel dans le marais, ce qui fait que l'eau y passe plus rapidement que prévu par rapport à la conceptualisation du marais.

Puisque le colmatage est le phénomène qui peut avoir le plus grand impact négatif sur l'efficacité des marais filtrants sous-surface à flux horizontal, il est essentiel de mieux le comprendre. Les sources principales du colmatage sont : le dépôt de solides en suspension, le développement de biofilms, la précipitation de certaines substances dissoutes dans l'eau (par exemple le CaCO_3), la dégradation du substrat, les racines, les rhizomes et les débris végétaux (de Matos *et al.*, 2018).

La durée prolongée de conditions anaérobiques du substrat peut également accroître l'incidence du colmatage puisque cet

environnement réducteur entraîne un ralentissement de la dégradation de la matière organique par les microorganismes (Matamoros et Bayona, 2006). Une faible granulométrie du substrat augmente aussi la vitesse de colmatage (de Matos *et al.*, 2018).

La taille du gravier (granulométrie) joue également un rôle important sur le colmatage. Plus elle est grande, plus les pores du système sont volumineux et, donc, la surface de contact entre le substrat et l'eau est moindre. Suivant ce même principe, la quantité de biofilms qui y adhère devrait y être moindre (de Matos *et al.*, 2018), ce qui réduit d'autant la vitesse de colmatage. Par ailleurs, plus la taille du gravier est élevée, plus l'eau y passe rapidement, ce qui peut aussi diminuer l'efficacité de traitement du marais filtrant (Griffin *et al.*, 2008).

Détection : Il peut être découvert par une moins bonne épuration de l'eau qui y transite. Un test de traçage peut également être effectué en ajoutant un traceur comme du sel (dont la concentration varie généralement peu à travers un marais filtrant) ou un colorant en amont du système (de Matos *et al.*, 2018). Ce test peut être fait tous les 2 ans. Il est aussi possible de déterminer le niveau de colmatage avec un géoradar ou de façon plus intrusive, par l'extraction et l'analyse d'une carotte de substrat du marais filtrant. Cependant, ces deux approches sont plus coûteuses et complexes à réaliser. Ces dernières analyses peuvent être effectuées aux 3 à 5 ans.

Méthodes de correction : Plusieurs techniques sont possibles avec différents degrés d'investissement et d'impact sur le système.

1. En cas de colmatage important, la solution de dernier recours est d'enlever le substrat et les végétaux présents pour les nettoyer ou les substituer avant de remettre le marais filtrant en état. Cela est fait au début ou à la fin de la saison de croissance dans le but de minimiser les répercussions sur les macrophytes, puisqu'il faut retirer leur partie aérienne. Le remplacement du gravier, malgré le fait qu'il soit coûteux, peut être requis afin de réduire la vitesse de colmatage en utilisant un gravier plus gros.
2. Une autre méthode moins invasive peut aussi être envisagée afin de diminuer la quantité de matière organique dans les pores. Il s'agit de donner une période de repos au marais filtrant, pendant laquelle il n'y a plus de nouvelle matière organique qui y entre, ce qui fait que les microorganismes peuvent dégrader plus en profondeur les substances organiques déjà présentes dans les pores (Leverenz *et al.*, 2009). Le moment de repos nécessaire dépend de nombreux facteurs et devrait être évalué par un expert du domaine. Durant cette période, les eaux polluées doivent être entreposées ou traitées d'une façon différente.
3. D'autres techniques de décolmatage sont aussi en cours de perfectionnement, comme le lavage du substrat avec un agent oxydant (Pedescoll *et al.*, 2009) ou encore l'application d'une pression hydraulique opposée au mouvement normal du marais filtrant, afin de déloger les solides présents dans les pores du système. Cette dernière technique est principalement efficace lorsque le colmatage est moins important (Baptestini *et al.*, 2016).

4.8 PHYTOREMÉDIATION

La phytoremédiation est une solution durable basée sur la nature qui consiste à décontaminer les sols et les eaux polluées (usées, souterraines, de lixiviation) en recourant à l'action combinée des végétaux et des microorganismes qui leur sont associés. Dans le cas des sols, cette approche permet leur réhabilitation tout en restituant leur fonctionnalité et leur santé. La gestion durable des sites contaminés, aussi appelée phytogestion « phytomanagement » s'est imposée ces dernières années. Elle apporte une double dimension technologique et de gestion. Ainsi, la phytoremédiation touche des pratiques culturales (amendements, fertilisation, plantes compagnes, etc.) pour la mise en place de systèmes végétaux performants de décontamination et des pratiques de gestion spécifiques au site pour générer des revenus à partir des biomasses végétales récoltées. Cette phytotechnologie est également liée à la chimie verte et à la production commerciale de plusieurs marchandises comme le paillis, le biochar, les murs antibruit, la vannerie, etc.

La phytoremédiation permet aussi d'accroître la valeur foncière des sites en voie de décontamination (Moreira *et al.*, 2021). Les zones contaminées plantées, en plus de contribuer au bien-être des résidents, offrent parallèlement une panoplie de services écosystémiques en milieu urbain, tels que la lutte contre les îlots de chaleur, l'atténuation des poussières, du vent et des nuisances sonores, l'augmentation de la biodiversité et la séquestration des gaz à effet de serre (Nissim et Labrecque, 2021).

Les peupliers et les saules hybrides à croissance rapide sont les végétaux les plus couramment utilisés pour la phytoremédiation des eaux et des sols pollués au Québec. Les facteurs qui en font des végétaux de choix sont leurs faibles exigences en matière de qualité de sol, leur adaptation au climat froid et humide de la

province, leur résistance aux maladies et insectes ravageurs, leur capacité à générer d'importants volumes de biomasse aérienne (entre 10 et 20 tonnes métriques de matière sèche par hectare par an) et leur grand taux d'évapotranspiration (principalement dans le cas du traitement des eaux). Ces végétaux ne sont pas des hyperaccumulateurs, mais, en tenant compte de leur développement rapide, ils peuvent absorber et accumuler dans leurs tissus des quantités notables de contaminants inorganiques, aussi appelés éléments traces métalliques (ETM). Les hyperaccumulateurs sont rares au Québec et ne seraient pas utilisables dans le cadre d'un projet de phytoremédiation à grande échelle en raison de leur faible taux de croissance (Pinto Irish *et al.*, 2022). De plus, certains métaux lourds absorbés par les végétaux peuvent être extraits de la biomasse récoltée pour être employés par la suite, comme, par exemple, le palladium, un métal rare servant de catalyseur. Ce procédé est appelé la phytomine (Sheoran *et al.*, 2009).

La mise en place et le suivi des sites de phytoremédiation passent par plusieurs opérations distinctes. Un soin particulier doit être apporté à la préparation du terrain contaminé. Tout d'abord, il doit être nettoyé de sa végétation naturelle (Figure 31). Au Québec, seuls les spécimens d'arbres de grande taille peuvent être conservés, à la fois pour des raisons esthétiques et sociales. Il faudra uniquement veiller à procéder à la taille des branches les plus basses (jusqu'à une hauteur de 5 m en partant du sol) pour permettre aux saules et aux peupliers d'avoir suffisamment de lumière pour croître adéquatement. Finalement, un travail de dégagement et d'ameublement sur les 30 premiers centimètres et d'aplanissement du sol est entrepris avec de la machinerie dédiée avant la phase de plantation.



PHOTO : INSTITUT DE RECHERCHE EN BIOLOGIE VÉGÉTALE

Figure 31 – Retirer toute la végétation présente sur le site de phytoremédiation est une action de grande envergure, mais elle est essentielle à la préparation du terrain contaminé pour qu'il soit ensuite ameubli et planté.

Plusieurs modes de plantation peuvent être considérés en phytoremédiation avec des saules et des peupliers. Ceux-ci peuvent aussi être combinés sur un même site et elles sont choisies en fonction de la profondeur des contaminants dans le sol :

🍃 **Dépôt aléatoire de microboutures de 5 cm :** Il est fait sur un lit de compost de 10 cm d'épaisseur disposé à la surface du sol à des densités allant de 50 à 75 par m² (Figure 32; Frenette-Dussault et al., 2019). Ce procédé permet de traiter rapidement le sol sur une profondeur de 30 cm;

🍃 **Boutures de tiges de 15 à 20 cm :** Elles peuvent être insérées verticalement à 75 % de leur hauteur et distancées de 30 cm sur des rangs de plantation séparés à 50 cm les uns des autres. Cette technique permet aux racines des plantes d'explorer le sol à une profondeur de 30 cm lors des premières années d'implantation. Alternativement, elles peuvent être disposées aussi horizontalement pour obtenir une plus grande densité de tiges;

🍃 **Boutures de 1 à 1,5 m de diamètre de 1 à 2 cm :** Celles-ci sont disposées horizontalement les unes derrière les autres dans des tranchées de 30 cm de profondeur recouvertes de compost et les rangs sont à 50 cm. Cette technique donne une plus importante densité de tiges et de profondeur racinaire que les deux premières;

🍃 **Macro-boutures de 1,5 à 2 m de longueur de diamètre de 3 à 5 cm :** Ce diamètre plus grand permet de planter les boutures verticalement à une profondeur de 0,5 à 1 m dans le sol tout en les espaçant d'un mètre les unes des autres. Cette méthode a été appliquée essentiellement au saule et permet d'atteindre des profondeurs racinaires de 0,5 à 1,5 m.



PHOTO : INSTITUT DE RECHERCHE EN BIOLOGIE VÉGÉTALE

Figure 32 — La technique de dépôt aléatoire de microboutures de saule dans un lit de compost permet de densifier le nombre de plants par unité de surface de sol à traiter et d'augmenter le nombre de racines capables d'explorer l'horizon de surface (30 premiers cm).

D'autres pratiques culturelles peuvent venir compléter cette phase de plantation. Des microorganismes favorisant l'implantation des végétaux, soit des bactéries promotrices de la croissance des plantes ou mycorhizes, peuvent être ajoutés lors de la mise en place des boutures. Une couche de paillis (10 cm) peut également être étendue entre les rangs.

Des plantes compagnes peuvent aussi être semées dans les chemins de travail pour initier le processus de colonisation des sols et procurer aux espèces mises en place l'azote nécessaire à leur croissance. L'ajout de trèfle est souvent recommandé pour sa grande biomasse racinaire qui favorise la multiplication d'une communauté microbienne associée qui permet d'éliminer certains contaminants organiques et inorganiques (Meyers et al., 2008; Sut-Lohmann et al., 2023; Wang et al., 2023). Il est aussi possible de planter d'autres types d'herbacés ayant une meilleure affinité pour certains ETM en association avec les saules et les peupliers, pour ainsi élargir les capacités de phytoremédiation du système végétal.

4.8.1 IRRIGATION

Elle peut être nécessaire pour éviter le flétrissement des plantes lors des fortes chaleurs estivales et pour optimiser la croissance des saules et peupliers et, donc, le processus de phytoremédiation. Le besoin en irrigation dépend de la rétention d'eau des sols à traiter, de l'âge des cultures et du mode de plantation. À titre d'exemple, la plantation de microboutures déposées dans un lit de compost requiert une plus grande irrigation durant la phase d'implantation.

Deux principales techniques peuvent être employées lorsqu'il y a d'importantes sources d'eau à proximité des sites (bornes-fontaines, systèmes municipaux d'alimentation en eau ou encore des réserves d'eau à ciel ouvert) :

🍃 **Aspersion :** Ce système amovible sur pied (Figure 33) nécessite plus de main-d'œuvre au quotidien pour effectuer un arrosage adéquat des parcelles puisqu'ils ont besoin d'être déplacés entre les différentes surfaces à irriguer.

🍃 **Goutte à goutte :** Il est utilisé conjointement avec des minuteurs d'aspersion ou des capteurs activés en cas de pluie, ce type de dispositif permet un apport hydrique régulier. Ils sont mis en place pour toute la période estivale. Ces systèmes sont généralement plus performants pour l'irrigation autant en termes d'efficacité pour la distribution d'eau aux racines que d'opérabilité puisque le système est installé pour toute la saison végétative.

En l'absence d'accès à des volumes d'eau importants, il est possible de recourir à des citernes d'eau et des pompes qui sont acheminées sur le site, mais cette façon de faire est plus onéreuse en raison des coûts de déplacement des réservoirs.



PHOTO : LOUISE HÉNAULT-ETHIER

Figure 33 – Irrigation par aspersion d'une parcelle expérimentale de phytoremédiation.

4.8.2 FERTILISATION

Les sols contaminés sont souvent des friches industrielles ou des dépôts de remblais de construction. Ils sont donc pauvres en nutriments. C'est la raison pour laquelle il est recommandé de procéder à des campagnes de fertilisation annuelles ou bisannuelles en début de saison végétative, fin mai ou début juin, et aussi après un cycle de recépage. L'urée peut être une bonne source d'azote en raison de son faible coût et dans la mesure où les ions ammonium sont libérés progressivement lors de leur transformation en nitrate (nitrification), sous l'action des microorganismes. Cette libération peut durer d'une journée à une semaine en fonction de la température et de l'humidité du sol (Brada Global, s.d). Les ions ammonium peuvent aussi se fixer sur les minéraux du sol, ce qui les rend moins mobiles et donc moins sujets à la percolation que les ions nitrate. D'autres engrais azotés, comme l'ammonitrate, peuvent aussi être employés. La quantité recommandée pour les sols contaminés est de 100 kg d'azote total par hectare par an, le tout sous forme de granules dispersées à la volée ou à l'aide d'un épandeur. Dans le cas de la décontamination d'eaux usées municipales ou de lixiviats de sites d'enfouissement par des saules, les végétaux peuvent être irrigués avec une solution enrichie ne dépassant pas les 1200 kg par hectare par an d'azote cumulé total. Dans ces conditions, de forts rendements de biomasse sont observés, avoisinant les 40 tonnes de matière sèche par hectare après deux saisons végétatives (Benoist et al., 2023; Jerbi et al., 2020).

4.8.3 CONTRÔLE DE LA VÉGÉTATION

L'élimination manuelle des adventices a lieu dans et entre les rangs, tandis que le désherbage mécanique se fait autour des parcelles. Ce dernier est essentiel pour permettre aux saules et peupliers arbustifs de croître sans trop de compétition, et ce, surtout pendant la première année d'implantation. La tonte régulière des chemins de travail, plantés ou non de plantes compagnes, fait aussi partie de cet entretien. L'activité la plus exigeante en termes de temps est le désherbage, notamment en raison de la présence d'EVEE en grand nombre au Québec, comme le roseau commun (*Phragmites australis* subsp. *australis*), qui nécessitent des interventions régulières pour arracher les racines ou couper les tiges par tonte afin de restreindre leur développement avec des débroussailluses ou de tondeuses.

À terme, les plantes phytoremédiatrices entrent en compétition avec ce type de végétation envahissante et, de fait, réduisent leur propagation. La fréquence du désherbage dépend donc de l'âge des cultures et du contexte du site contaminé. Toutefois, les jeunes plantations requièrent un désherbage hebdomadaire ou aux deux semaines, particulièrement au début de la période de croissance, soit de juin à juillet. Les conditions météorologiques ont aussi un impact puisque les étés pluvieux favorisent le développement des adventices et des EVEE.

4.8.4 RECÉPAGE

Le recépage des saules et des peupliers est une étape clé pour leur établissement rapide et, par la suite, pour accroître l'efficacité du procédé de phytoremédiation (Figure 34; Labrecque *et al.*, 2023; Labrecque et Lajeunesse, 2017; Padoan *et al.*, 2020). Sa première instance peut avoir lieu à la fin de la première saison végétative. Cette opération, parfois appelée rejuvenilisation, consiste à couper les tiges de l'année à environ 10 cm au-dessus du sol afin d'accélérer leur développement lors de la prochaine saison de croissance en favorisant l'apparition d'un plus grand nombre de tiges. Des cycles de recépage aux 2 à 3 ans sont ensuite effectués pour retirer les parties aériennes chargées de polluants qui y sont bioaccumulés, notamment les ETM, et ainsi, décontaminer progressivement les sols. Une fois récoltée, cette biomasse est broyée sur place avant de l'intégrer dans des chaînes de valorisation.



PHOTOS : MAXIME FORTIN FAUBERT ET INSTITUT DE RECHERCHE EN BIOLOGIE VÉGÉTALE

Figure 34 — Le recépage (*Salix* spp.) peut être réalisé avec de la machinerie ou à la main avec une débroussailluse forestière.

4.8.5 SURVEILLANCE

La surveillance en continu des sites est essentielle pour garantir l'efficacité des plantes phytoremédiatrices. Pour parvenir à maintenir ces parcelles en bon état, il faut pouvoir :

- Empêcher les dépôts illégaux de matériaux en y fermant les accès avec des clôtures, des chaînes ou des pieux en béton. Un site bien entretenu dépourvu de déchets est moins sujet au vandalisme;
- Limiter l'occupation non autorisée de ces zones par des personnes souhaitant développer des activités récréatives non compatibles afin de prévenir toute perturbation ou tout dommage au dispositif mis en place;
- Communiquer périodiquement avec les résidents et la population locale avec l'objectif de bien expliquer les finalités et les différentes phases du projet ainsi que les opérations qui y sont accomplies. Une réunion annuelle peut être organisée selon l'intérêt des résidents et de la nature du site. S'il est privé, il n'est pas forcément nécessaire de communiquer avec eux;
- Favoriser l'accès au site pour des usages concordants avec sa vocation, comme des promenades;
- Réaliser un contrôle visuel des végétaux pour détecter tout problème phytosanitaire ou de croissance;
- Effectuer des analyses régulières de la concentration en ETM dans les tissus aériens des végétaux pour vérifier qu'elle reste à des niveaux acceptables pour le public. Dans le meilleur des cas, ces analyses se feront sur une base annuelle. Il faut cependant rappeler que les végétaux utilisés ne sont pas des hyperaccumulateurs et que, pour cette raison, la concentration de ces contaminants ne représente pas un danger en cas d'ingestion en petites quantités.

La fréquence de cette surveillance relève de la nature du site (expérimentation ou exploitation). Dans le cas du premier, l'intervention est assez régulière, notamment pour l'entretien ou de la prise d'échantillons. Pour le second type, la récurrence dépend de l'accessibilité au site. De plus, s'il est fermé et surveillé, il aura peu de visite à y faire.

4.8.6 COÛTS D'ENTRETIEN ET GESTION DU SITE

Un entretien régulier, qui peut être plus intensif selon les sites, est nécessaire pendant la saison végétative, normalement de mi-juin à la fin octobre. En raison de la localisation fréquente des sites contaminés près des zones d'habitation, l'entretien de ces aménagements paysagers peut engendrer une meilleure acceptabilité sociale du projet, voire une appropriation, et ainsi éviter que les résidents ne se servent de ces sites comme des dépôts illégaux de matériaux (Figure 35).



Figure 35 – Parcelle expérimentale de phytoremédiation plantée de plusieurs cultivars de saule et selon différents modes de plantation. Le caractère aménagé de ces ouvrages a souvent un impact positif sur leur acceptabilité sociale.

Les coûts d'entretien en phytoremédiation peuvent varier selon la fréquence des interventions. Par exemple, sur un site expérimental actuellement en place dans l'Est-de-l'Île-de-Montréal, la somme estimée pour l'entretien annuel de trois hectares par une équipe de trois stagiaires ayant travaillé en moyenne 4 heures par jour sur une période de 5 mois a été d'environ 30 000 \$, soit 10 000 \$ par hectare. Ces coûts n'incluent pas l'achat des boutures, ni le temps dédié aux échantillonnages, ni les analyses effectuées des sols et des tissus végétaux.

Le nombre d'heures nécessaires varie beaucoup d'un site contaminé à l'autre, car les réalités terrain peuvent être très différentes. Dans des sites densément plantés avec peu de chemins de travail, il y aura rapidement des zones d'ombre qui limiteront le développement des adventices et des EVEC. Dans ce cas de figure, une moyenne de 50 heures par hectare et par saison peut être suffisante pour un entretien de base. Cependant, sur un site de démonstration et de recherche où des présentations publiques peuvent être organisées, il est nécessaire de le faire plus régulièrement pour un meilleur rendu. Ainsi, le nombre d'heures peut aller jusqu'à 400 heures par hectare et par saison. La gestion d'ouvrage de phytoremédiation requiert un certain niveau d'expertise en fonction de la nature du projet (prestation de services ou recherche). Dans le premier cas, le suivi des plantations, de la mesure de l'efficacité de la décontamination et du budget sera effectué par un gestionnaire ou un chargé de projets spécialisé dans la mise en place de cette phytotechnologie. Tandis que dans le second type, ce sera un étudiant à la maîtrise ou au doctorat,

qui s'en chargera. Le travail manuel peut être réalisé par un chef de chantier, souvent un stagiaire en deuxième année de baccalauréat en biologie ou un technicien du domaine de la biologie, aidé d'une petite équipe de 2 ou 3 personnes, en fonction du nombre de sites à entretenir.

5.0 CONCLUSION

L'entretien est souvent le maillon faible des projets de phytotechnologies. Étant composé de plantes vivantes, de substrats et de matériaux, leur entretien doit être également planifié si l'on veut garantir la concrétisation de leurs différents services environnementaux et écologiques pendant de nombreuses années. Ainsi, cet élément clé doit absolument être pris en considération durant la conception et l'évaluation du budget de ces infrastructures, que ce soit au niveau de l'établissement des végétaux, comme l'irrigation ou le désherbage, ou encore pour l'entretien qui en assure son bon fonctionnement sur le long terme, tel que la taille des haies brise-vent afin d'y maintenir une porosité adéquate. Malheureusement, les connaissances dans ce domaine restent encore peu documentées. On peut certes s'inspirer des méthodes utilisées en horticulture ornementale ou en agriculture, mais pour bien planifier l'entretien des phytotechnologies, il faut tenir compte de certains détails qui assureront leur fonctionnement et leur performance. De ce fait, un ouvrage mal entretenu pourrait être jugé inefficace, tandis que, s'il est bien entretenu, il pourrait gagner en valeur à long terme, notamment au travers des services écosystémiques qu'il rend. En comparaison aux infrastructures conventionnelles, comme les bassins de rétention des eaux pluviales en béton qui se désagrègent au fil du temps, des infrastructures vivantes entretenues permettront aux végétaux de se développer et de retenir des volumes de ruissellement et des nutriments importants. Elles offrent également un habitat à la biodiversité tout en étant esthétiques, ce qui est reconnu pour procurer des bienfaits aux personnes qui les côtoient. Cette fiche technique sur l'entretien des phytotechnologies est pionnière au Québec. Nous espérons qu'elle pourra jeter les bases au transfert de connaissances techniques essentiel au déploiement des phytotechnologies comme méthodes d'adaptation de nos territoires, et pourra évoluer au fil de l'acquisition des savoirs de ce nouveau domaine.

6.0 RÉFÉRENCES

- ABC jardins et services. (2022). *Les conséquences d'une mauvaise taille sur les végétaux*. Consulté le 10 mars 2024 de <https://www.abc-jardins-et-services.fr/les-consequences-des-tailles-sur-les-vegetaux/>
- Baptistini, G. C. F., Matos, A. T. et Borges, A. C. (2016). Effect of reversal of the flow direction on hydrodynamic characteristics and plants cultivated in constructed wetland systems. *Acta Scientiarum. Technology*, 38(1), 49-56.
- Benoist, P., Parrott, A., Lachapelle-T., X., Barbeau, L.-C., Comeau, Y., Pitre, F. E. et Labrecque, M. (2023). Treatment of Landfill Leachate by Short-Rotation Willow Coppice Plantations in a Large-Scale Experiment in Eastern Canada. *Plants*, 12(2), 372. <https://www.mdpi.com/2223-7747/12/2/372> BNQ. (2004). *Traitement des eaux usées — Systèmes d'épuration autonomes pour les résidences isolées* (NQ 3680-910/2000-06-16 MI [2004-09-10]). Bureau de normalisation du Québec.
- BNQ. (2019). *Aménagement paysager à l'aide de végétaux* (BNQ 0605- 100/2019). Bureau de normalisation du Québec.
- BNQ. (2020). *Entretien arboricole et horticole* (BNQ 0605- 200/2020). Bureau de normalisation du Québec.
- Borin, M., Passoni, M., Thiene, M. et Tempesta, T. (2010). Multiple functions of buffer strips in farming areas. *European journal of agronomy*, 32(1), 103-111.
- Brada Global. (s.d). *Qu'est-ce que l'engrais d'urée?* Brada Global. Consulté le 11 décembre 2023 de <https://www.bradaglobal.com/fr/blog/blogs/fr-what-is-urea-fertilizer>
- Brown, D. (1995). The impact of species introduced to control tree invasion on the vegetation of an electrical utility right-of-way. *Canadian Journal of Botany*, 73(8), 1217-1228. <https://doi.org/10.1139/b95-132> Brunette, M. O. (2023). *Impacts d'amendements organiques sur les capacités phytoremédiatrices de saules et de peupliers*. Université de Montréal.
- Calgary. (2016). *Low Impact Development Technical Guidance, Module 2A : Bioretention and Bioswale*. City of Calgary.
- Canadian Standards Association. (2018). *Design of bioretention systems* (W200-18).
- CEGM. (2021). *Mieux connaître le nerprun*. Comité Écologique du Grand Montréal. Consulté le 03 avril 2024 de <https://cegm.ca/documentation/mieux-connaître-le-nerprun/>
- Chassiot, L., Lajeunesse, P. et Bernier, J.— F. (2020). Riverbank erosion in cold environments : Review and outlook. *Earth-science reviews*, 207, 103231.
- CNESST. (2021). *Ligne d'avertissement*. Consulté le 30 novembre 2023 de <https://www.cnesst.gouv.qc.ca/fr/prevention-securite/identifier-corriger-risques/liste-informations-prevention/ligne-davertissement>
- Cogliastro, A. V., André, Rivest, David. (2022). *Guide d'aménagement de systèmes agroforestiers*. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ).
- Comité ZIP des Seigneuries. (2018). *Guide de protection des berges : Outils pour la réhabilitation de votre bande riveraine*. Comité Zone d'Intervention Prioritaire (ZIP) des Seigneuries, Ville de Repentigny.
- Davies, Z. G. et Pullin, A. S. (2007). Are hedgerows effective corridors between fragments of woodland habitat? An evidence-based approach. *Landscape ecology*, 22, 333-351.
- Davis, J. G. et Whiting, D. (2013). *Choosing a Soil Amendment. Fact Sheet* (vol. 7.235) : Colorado State University.
- De Blois, S., Brisson, J. et Bouchard, A. (2004). Herbaceous covers to control tree invasion in rights-of-way : ecological concepts and applications. *Environmental Management*, 33, 606-619.
- Du Jardin, P. (2015). Plant biostimulants : Definition, concept, main categories and regulation. *Scientia Horticulturae*, 196, 3-14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scienta.2015.09.021> Dugué, M. (2022). *Boîte à outils infrastructures vertes — Guide de conception GCI-3A : Infrastructures vertes sur rue avec infiltration complète*. Ville de Montréal.
- Fang, Y. et Xiong, L. (2015, Feb). General mechanisms of drought response and their application in drought resistance improvement in plants. *Cell Mol Life Sci*, 72(4), 673-689. <https://doi.org/10.1007/s00018-014-1767-0>
- FIHOQ. (2013). *Guide de bonnes pratiques : Aménagement et techniques de restauration des bandes riveraines*. Fédération interdisciplinaire de l'horticulture ornementale du Québec (FIHOQ). https://banderiveraine.org/wp-content/uploads/2013/07/FIHOQ_guide_2013_web_spread.pdf
- Francis, R. A. (2011). Wall ecology : A frontier for urban biodiversity and ecological engineering. *Progress in physical Geography*, 35(1), 43-63.
- Frenette-Dussault, C., Benoist, P., Kadri, H., Pitre, F. E. et Labrecque, M. (2019). Rapid production of willow biomass using a novel microcutting-based field planting technology. *Ecological Engineering*, 126, 37-42.
- Getter, K. L., Rowe, D. B. et Andresen, J. A. (2007). Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. *Ecological Engineering*, 31(4), 225-231.
- Griffin, P., Wilson, L. et Cooper, D. (2008). Changes in the use, operation and design of sub-surface flow constructed wetlands in a major UK water utility. (p. 1-7). Proceedings of the 11th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control, Vikram University and IWA Indore, India.
- Hamel, C. (2010). *La haie brise-vent : ses effets sur la réduction de la dérive et de la migration des pesticides*. Fédération des producteurs maraîchers du Québec (FPMQ).
- Hénault-Ethier, L., Gomes, M. P., Lucotte, M., Smedbol, É., Maccario, S., Lepage, L., Juneau, P. et Labrecque, M. (2017). High yields of riparian buffer strips planted with *Salix miyabena* 'SX64' along field crops in Québec, Canada. *Biomass and Bioenergy*, 105, 219-229.

- Hénault-Ethier, L., Lucotte, M., Smedbol, É., Gomes, M. P., Maccario, S., Laprise, M. E. L., Perron, R., Larocque, M., Lepage, L. et Juneau, P. (2019). Potential efficiency of grassy or shrub willow buffer strips against nutrient runoff from soybean and corn fields in southern Quebec, Canada. *Journal of environmental quality*, 48(2), 352-361.
- Hotte, N. (2022). *Analyse des enjeux de fertilisation des cultures en contexte urbain*. Centre universitaire de formation en environnement et développement durable, Université de Sherbrooke.
- Jerbi, A., Brereton, N. J. B., Sas, E., Amiot, S., Lachapelle-T, X., Comeau, Y., Pitre, F. E. et Labrecque, M. (2020). High biomass yield increases in a primary effluent wastewater phytofiltration are associated to altered leaf morphology and stomatal size in *Salix miyabeana*. *Science of The Total Environment*, 738, 139728. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139728>
- Joseph, J. (2011). *Étude de faisabilité d'un projet d'épuration des eaux pluviales par marais filtrants dans le bassin versant Ennery-Quinte en Haïti*. Université de Sherbrooke.
- Kansara, K., Zaveri, V., Shah, S., Delwadkar, S. et Jani, K. (2015). Sensor based automated irrigation system with IOT : A technical review. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 6(6), 5331-5333.
- Labrecque, M., Daigle, S. et Olishvaska, S. (2023). Comparing biomass yields of various willow cultivars in short-rotation coppice over six growing seasons across a broad climatic gradient in Eastern Canada. *Canadian Journal of Forest Research*, 53(7), 533-543. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2022-0205>
- Labrecque, M. et Lajeunesse, S. L. (2017). Guide de production de saules en culture intensive sur courtes rotations. *Agri-Réseau : Québec, QC, Canada*.
- Lacoste, M., Viaud, V., Michot, D. et Walter, C. (2015). Landscape-scale modelling of erosion processes and soil carbon dynamics under land-use and climate change in agroecosystems. *European Journal of Soil Science*, 66(4), 780-791.
- Lawlor, G., Currie, B. A., Doshi, H. et Wieditz, I. (2006). *Toits verts : Manuel de ressources destiné aux décideurs municipaux*. Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL). https://publications.gc.ca/collections/collection_2016/schl-cmhc/NH18-26-4-2006-fra.pdf
- Leclerc, B., Georges, P., Cauwel, B. et Lairon, D. (1995). A Five Year Study on Nitrate Leaching under Crops Fertilised with Mineral and Organic Fertilisers in Lysimeters. *Biological Agriculture & Horticulture*, 11(1-4), 301-308. <https://doi.org/10.1080/01448765.1995.9754714>
- Leclercq-Dransart, J., Demuyne, S., Douay, F., Grumiaux, F., Pernin, C. et Leprêtre, A. (2020, 2020/12/01/). Comparison of the interest of four types of organic mulches to reclaim degraded areas : a field study based on their relative attractiveness for soil macrofauna. *Ecological Engineering*, 158, 106066. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.106066>
- Leverenz, H. L., Tchobanoglous, G. et Darby, J. L. (2009). Clogging in intermittently dosed sand filters used for wastewater treatment. *Water Research*, 43(3), 695-705.
- Manso, M. et Castro-Gomes, J. (2015). Green wall systems : A review of their characteristics. *Renewable and sustainable energy reviews*, 41, 863-871.
- Matamoros, V. et Bayona, J. M. (2006, 2006/09/01). Elimination of Pharmaceuticals and Personal Care Products in Subsurface Flow Constructed Wetlands. *Environmental Science & Technology*, 40(18), 5811-5816. <https://doi.org/10.1021/es0607741>
- de Matos, M. P., Von Sperling, M. et de Matos, A. T. (2018, 2018/03/01). Clogging in horizontal subsurface flow constructed wetlands : influencing factors, research methods and remediation techniques. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 17(1), 87-107. <https://doi.org/10.1007/s11157-018-9458-1>
- MDDEP et CRE Laurentides. (2007). *Protocole de caractérisation de la bande riveraine*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) et Conseil régional de l'environnement des Laurentides (CRE Laurentides). https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/rsvl/bande_riveraine.pdf
- MDEP. (2012a). *Fiche d'information technique Écophyltre-T* (vol. BF-22, p. 7) : Ministère du Développement durable, Environnement et Parcs. Gouvernement du Québec.
- MDEP. (2012 b). *Fiche d'information technique Écophyltre-P* (vol. BF-7S, p. 10) : Ministère du Développement durable, Environnement et Parcs. Gouvernement du Québec.
- Medl, A., Stangl, R. et Florineth, F. (2017). Vertical greening systems—A review on recent technologies and research advancement. *Building and Environment*, 125, 227-239.
- MELCC. (2022). *Aide-mémoire : Méthode de détermination de la limite du littoral* : Gouvernement du Québec.
- MELCCFP. (2023). *Identifier et délimiter une zone inondable, une rive et un littoral*. Gouvernement du Québec. Consulté le 20 avril 2024 de <https://www.quebec.ca/gouvernement/politiques-orientations/plan-de-protection-du-territoire-face-aux-inondations/gestion-rives-littoral-zones-inondables/regime-transitoire/interventions/identifier-delimiter>
- MELCCFP. (2024a). *Espèces exotiques envahissantes (EEE)*. Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/biodiversite/especes-exotiques-envahissantes/index.asp>
- MELCCFP. (2024b). *La renouée du Japon (Reynoutria japonica)*. Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/biodiversite/especes-exotiques-envahissantes/renouee-japon/index.htm>
- MELCCFP. (2024c). *Le roseau commun (Phragmites australis subsp. australis)*. Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/biodiversite/especes-exotiques-envahissantes/roseau-commun/index.htm>
- Meyers, D. E. R., Auchterlonie, G. J., Webb, R. I. et Wood, B. (2008). Uptake and localisation of lead in the root system of *Brassica juncea*. *Environmental Pollution*, 153(2), 323-332. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.08.029>

- Moreira, H., Pereira, S. I., Mench, M., Garbisu, C., Kidd, P. et Castro, P. M. (2021). Phytomanagement of metal (loid)-contaminated soils : options, efficiency and value. *Frontiers in Environmental Science*, 9, 661423.
- Nature-Action Québec. (s. d.). *Comment lutter contre les EVEC?* Consulté le 03 avril 2024 de <https://nature-action.qc.ca/comment-lutter-contre-les-evec/>
- Neher, D. A., Hoitink, H. A., Biala, J., Rynk, R. et Black, G. (2022). Compost use for plant disease suppression. Dans *The Composting Handbook* (p. 847-878). Elsevier.
- Nissim, W. G. et Labrecque, M. (2021). Reclamation of urban brownfields through phytoremediation : Implications for building sustainable and resilient towns. *Urban Forestry & Urban Greening*, 65, 127364.
- Nivala, J., Knowles, P., Dotro, G., García, J. et Wallace, S. (2012). Clogging in subsurface-flow treatment wetlands : Measurement, modeling and management. *Water Research*, 46(6), 1625-1640. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.051>
- Padoan, E., Passarella, I., Prati, M., Bergante, S., Facciotto, G. et Ajmone-Marsan, F. (2020). The Suitability of Short Rotation Coppice Crops for Phytoremediation of Urban Soils. *Applied Sciences*, 10(1), 307. <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/1/307>
- Pedescoll, A., Uggetti, E., Llorens, E., Granés, F., García, D. et García, J. (2009). Practical method based on saturated hydraulic conductivity used to assess clogging in subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 35(8), 1216-1224.
- Pepin, S. et Bourgeois, G. (2012). *Colloque en Agroclimatologie : Outils agrométéorologiques pour la planification de l'irrigation des cultures*. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). https://www.agrireseau.net/grandescultures/documents/Pepin_Bourgeois.pdf
- Pinto Irish, K., Harvey, M.-A., Harris, H. H., Aarts, M. G. M., Chan, C. X., Erskine, P. D. et van der Ent, A. (2022). Micro-analytical and molecular approaches for understanding the distribution, biochemistry, and molecular biology of selenium in (hyperaccumulator) plants. *Planta*, 257(1), 2. <https://doi.org/10.1007/s00425-022-04017-8>
- Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables. RLRQ c Q-2, r 35. <<https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/pdf/rc/Q-2,%20R.%2035.pdf> > consulté le 2024-03-25
- Prime Vert. (2021). *Fiche technique Haies Brise-Vent*. Québec : Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.
- Prince George's County. (2007). *Bioretention manual*. Environment Services Division, Department of Environment Resources, Prince George's County, Maryland, 236 p.
- Québec Vert. (2013). *Plantation et entretien d'une bande riveraine — Pour une restauration durable! — Entretenir*. Consulté le 28 mars 2024 de <https://banderiveraine.org/entretenir/>
- Québec Vert. (2023). *Guide d'introduction aux infrastructures végétalisées Informations générales et bonnes pratiques*. Québec Vert Environnement. https://quebecvert.com/medias/QCV_GuideIV.pdf
- Régie du bâtiment du Québec. (2015a). *Critères techniques visant la construction de toits végétalisés*. Régie du bâtiment du Québec. <https://www.rbq.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/Publications/francais/guide-criteres-techniques-construction-toits-vegetalises.pdf>
- Régie du bâtiment du Québec. (2015 b). *La construction de toits végétalisés et la réglementation*. <https://batimentdurable.ca/fichiers/depot/claire.pdf>
- Régie du bâtiment du Québec. (2024). *Construction de toitures végétalisées*. Régie du bâtiment du Québec. Consulté le 30 mars de <https://www.rbq.gouv.qc.ca/domaines-d'intervention/batiment/les-mesures-equivalentes-et-les-mesures-differentes/construction-de-toitures-vegetalisees>
- Règlement concernant la mise en œuvre provisoire des modifications apportées par le chapitre 7 des lois de 2021 en matière de gestion des risques liés aux inondations. RLRQ, c Q-2, r 32.2. <<https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/rc/Q-2,%20r.%2032.2%20/>> consulté le 2024-04-20
- Règlement sur l'évacuation et le traitement des eaux usées des résidences isolées. RLRQ, c Q-2, r 22. <<https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/rc/Q-2,%20r.%2022>> consulté le 2024-03-25
- Règlement sur les activités dans des milieux humides, hydriques et sensibles. RLRQ, c Q-2, r 0.1. <<https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/rc/Q-2,%20r.%200.1%20/>> consulté le 2024-04-20
- Schvartz, C., Muller, J.-C. et Decroux, J. (2005). *Guide de la fertilisation raisonnée Grande cultures et prairies*. Édition France Agricole. https://books.google.ca/books?id=IKhoSCre4_QC&printsec=frontcover&hl=fr#v=onepage&q&f=false
- Sébire, H. (2015). *La gestion des espèces végétales exotiques envahissantes prioritaires dans les municipalités de l'Estrie*. Maîtrise en environnement, Université de Sherbrooke.
- Sheoran, V., Sheoran, A. S. et Poonia, P. (2009). Phytomining : A review. *Minerals Engineering*, 22(12), 1007-1019. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.04.001>
- Société québécoise de phytotechnologie. (2014). *Fiches techniques de la SQP. Les marais filtrants (Eaux usées)*. <https://www.phytotechno.com>
- Société québécoise de phytotechnologie. (2016). *Fiches techniques de la SQP. La phytoremédiation*. <https://www.phytotechno.com/>
- Société québécoise de phytotechnologie. (2018). *Fiches techniques de la SQP. Les biorétention*. <https://www.phytotechno.com>
- Société québécoise de phytotechnologie. (2019). *Fiches techniques de la SQP. La stabilisation des pentes*. <https://www.phytotechno.com>
- Société québécoise de phytotechnologie. (2022). *Fiches techniques de la SQP. Les murs végétalisés*. <https://www.phytotechno.com>
- STEP. (2018). *Inspection and maintenance of stormwater best management practices : Bioretention* : Sustainable Technologies Evaluation Program (STEP).
- Sut-Lohmann, M., Grimm, M., Kästner, F., Raab, T., Heinrich, M. et Fischer, T. (2023). Brassica juncea as a Feasible Hyperaccumulator of Chosen Potentially Toxic Metals Under Extreme Environmental Conditions. *International Journal of Environmental Research*, 17(3), 38. <https://doi.org/10.1007/s41742-023-00528-8>

- Tegeder, M. et Masclaux-Daubresse, C. (2018). Source and sink mechanisms of nitrogen transport and use. *New phytologist*, 217 (1), 35-53.
- Tissaux, J.-C. (2002). *Caractérisation de bois raméaux fragmentés et indices de décomposition*. Bibliothèque nationale du Canada, Ottawa.
- Tisserant, M., Bourgeois, B., González, E., Evette, A. et Poulin, M. (2020). Controlling erosion while promoting plant biodiversity : A comparison of riverbank stabilization techniques. *Biodiversité et génie végétal : réponse taxonomique et fonctionnelle de la flore vasculaire riveraine à la stabilisation de berge*, 37.
- Trottier, A. (2007). *Toitures végétales : implantation de toits verts en milieu institutionnel*. Société de développement communautaire de Montréal. https://ecoresponsable.uqam.ca/fichier/document/toitures_vegetales_institutionnelles.pdf
- Truong, T. H. H. et Marschner, P. (2020). Plant residues differing in C/N ratio in mulch and soil—the effect of the mulch on nutrient availability and microbial biomass is more pronounced with higher leaching amount. *Soil Ecology Letters*, 2(4), 317-326. <https://doi.org/10.1007/s42832-020-0036-4>
- Vallée, C. (2016). *Les murs végétalisés : Notes de cours et illustrations (153-317-IT)*. Institut de technologie agroalimentaire (ITA).
- VanWoert, N. D., Rowe, D. B., Andresen, J. A., Rugh, C. L., Fernandez, R. T. et Xiao, L. (2005). Green Roof Stormwater Retention. *Journal of environmental quality*, 34(3), 1036-1044. <https://doi.org/10.2134/jeq2004.0364>
- Vézina, A. (2001). *Les haies brise-vent. (Ordre des ingénieurs forestiers du Québec — Formation continue)*. Institut de technologie agricole de La Pocatière.
- Vézina, A. (2008). *Des haies brise-vent autour des bâtiments d'élevage et des cours d'exercice* : ITA, campus de La Pocatière, <http://wbvecan.ca>.
- Ville Éponge. (2024). *Entretien des toitures végétalisées*. Ville Éponge. Consulté le 22 mars 2024 de <https://eponge.org/boite-a-outils/entretien>
- Ville de Montréal. (2022). *BOITE À OUTILS INFRASTRUCTURES VERTES : Guide de conception GCI-3A Infrastructures vertes sur rue avec infiltration complète*. <https://ville.montreal.qc.ca/exécutiontravaux/document/gci-3a-guide-de-conception-infrastructures-vertes-sur-rue-avec-infiltration-complete>
- Vymazal, J. (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow : a review. *Hydrobiologia*, 674 (1), 133-156.
- Wang, Z., Teng, Y., Wang, X., Xu, Y., Li, R., Hu, W., Li, X., Zhao, L. et Luo, Y. (2023). Removal of cadmium and polychlorinated biphenyls by clover and the associated microbial community in a long-term co-contaminated soil. *Science of The Total Environment*, 871, 161983. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161983>
- Weill, A. et Duval, J. (2009). *Module 6, Gestion du sol et de l'eau — Chapitre 11, « Irrigation »*, manuscrit du Guide de gestion globale de la ferme maraîchère biologique et diversifiée. https://www.agrireseau.net/agriculturebiologique/documents/MARAI_Chapitre_11Irrigation.pdf