

# LES MARAIS FILTRANTS À EFFLUENT NUL

FICHE TECHNIQUE

Mai 2025



Université   
de Montréal

**Date d'émission :** Mai 2025

**Auteurs :** Laurianne Bédard et Jacques Brisson

Laurianne Bédard est doctorante en Sciences biologiques, Université de Montréal, et membre du conseil d'administration de la SQP. Son projet de recherche porte sur les marais filtrants. Jacques Brisson est professeur en sciences biologiques, Université de Montréal. Ses travaux de recherche portent sur les phytotechnologies en général, et plus spécifiquement sur les marais filtrants.

**Experts et réviseurs :** Chloé Frédette (SQP), Olivier Boucher-Carrier (SQP) et Patrick Benoist (SQP).

**Remerciements :** La production de cette fiche technique a été rendue possible grâce à la Subvention de mobilisation des connaissances, octroyée à Jacques Brisson par le bureau de la recherche, du développement et valorisation (BRDV) de l'Université de Montréal.

**Illustrations :** Vincent Gagnon, Chloé Frédette, Laurianne Bédard et Mark Nelson.

**Graphiste :** Lysanne Devost.

**Photos couverture** (de gauche à droite) : Chloé Frédette, Dave Smith, Benoit St-Georges et Laurianne Bédard.

**Photos :** Carlos Arias, Chloé Frédette, Dave Smith, Jacques Brisson, Laurianne Bédard, et Laurence Gill.

**Comment citer :**

Bédard, L. et Brisson, J. 2025. LES MARAIS FILTRANTS À EFFLUENT NUL. *Fiches techniques de la Société québécoise de phytotechnologie*. Université de Montréal et Société québécoise de phytotechnologie. 23 pages. [www.phytotechno.com](http://www.phytotechno.com).

SOCIÉTÉ QUÉBÉCOISE DE PHYTOTECNOLOGIE

3230, rue Sicotte, local E-300, ouest

Saint-Hyacinthe QC J2S 2M2

**PHYTOTECNO.COM**

**INFO@PHYTOTECNO.COM**

**Mise en garde :**

Le présent guide 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.



CRÉDIT PHOTO: CHLOÉ FRÉDETTE

# TABLE DES MATIÈRES

<b>1.0 INTRODUCTION</b>	5
<b>2.0 DESCRIPTION DE LA PHYTOTECHNOLOGIE</b>	6
2.1 Généralités	6
2.2 Processus d'enlèvement des polluants	7
<b>3.0 VÉGÉTAUX</b>	8
3.1 Rôle et caractéristiques	8
3.2 Végétaux utilisés	8
<b>4.0 DIMENSIONNEMENT</b>	9
4.1 Généralités	9
4.2 Bilan hydrique	9
<b>5.0 DÉTAILS DES COMPOSANTES</b>	12
5.1 Composantes matérielles	12
5.2 Composantes végétales	13
<b>6.0 ENTRETIEN ET COÛTS</b>	14
6.1 Entretien	14
6.2 Coûts	14
<b>7.0 AVANTAGES ET LIMITES</b>	15
7.1 Avantages	15
7.2 Limites	15
7.3 Perspectives	15
<b>8.0 EXEMPLES</b>	16
8.1 Marais à effluent nul typiques du Danemark	16
8.2 Marais à effluent nul en Irlande	17
8.3 Marais à effluent nul du Jardin botanique de Montréal	18
<b>9.0 OUTILS EN LIGNE, GUIDES ET RESSOURCES</b>	19
<b>10.0 DROITS DE REPRODUCTION</b>	20

CRÉDIT PHOTO: JACQUES BRISSON



## PRÉAMBULE

Malgré les diverses technologies de traitement des eaux usées disponibles, des éléments polluants persistent dans les eaux traitées, certains ayant des répercussions significatives sur la dégradation de l'environnement [1]. D'autre part, les exigences en matière de rejets deviennent de plus en plus strictes, obligeant parfois à réduire considérablement, voire à éliminer entièrement les rejets liquides dans le milieu naturel [2, 3, 4, 5]. Cette évolution souligne l'importance d'une efficacité accrue du traitement des eaux usées, en particulier pour les sites isolés ou décentralisés qui ne sont pas raccordés à un réseau d'égouts.

Les végétaux sont de formidables pompes à eau naturelles, fonctionnant grâce à l'énergie solaire. Les marais filtrants à effluent nul tirent parti de cette remarquable capacité des plantes pour éliminer complètement les rejets d'eaux usées, réduisant à néant la pollution hydrique associée. Les végétaux offrent donc une solution écologique efficace permettant de respecter les normes de rejet les plus strictes. En plus de prévenir tout rejet d'eaux contaminées dans l'environnement, cette phytotechnologie se distingue par ses faibles coûts d'entretien et de consommation d'énergie. Elle permet également la séquestration de certains contaminants (azote, métaux lourds, etc.) dans la biomasse produite [6]. La présente fiche traite de ce type particulier de marais filtrant, appelé à effluent nul.

## 1.0 INTRODUCTION

Avec les systèmes de traitement des eaux usées à zéro effluent (*zero liquid discharge*), comme leur nom l'indique, aucun effluent ne subsiste à la fin du procédé [7, 8]. Différentes méthodes dites « grises » peuvent être employées pour parvenir à l'élimination complète de l'eau à traiter, incluant l'évaporation [9], l'osmose directe ou inverse [10], l'électrodialyse [11] et la distillation sur membrane [12]. Introduites aux États-Unis dans les années 1970 [13, 14], les systèmes de traitement à zéro effluent se sont depuis largement répandus à travers le monde [15, 16, 17], trouvant des applications dans le traitement des eaux usées de multiples secteurs industriels [18, 19, 20, 12].

L'intégration des plantes dans les concepts de traitement à zéro effluent remonte au milieu des années 1970-80, lorsque certains pays scandinaves ont commencé à irriguer les cultures à forte production de biomasse par des eaux usées domestiques. Ils ont rapidement constaté que ces eaux riches en nutriments étaient presque entièrement éliminées par les plantes via l'évapotranspiration, sans débordement et avec très peu d'infiltration dans le sol [6, 21]. Ce taux très élevé d'évapotranspiration a permis le développement des premiers systèmes de traitement d'eau polluée dits « évapotranspiratoire » (*evapotranspirative systems*) [6], dont des variantes sont aujourd'hui couramment utilisées dans le monde entier [21, 22, 23, 24, 25, 26].

Le système végétalisé garantissant systématiquement l'absence d'effluent, c'est-à-dire les marais filtrants à effluent nul (*zero discharge wetlands*), n'a émergé qu'au milieu des années 1990. Au début de cette décennie, l'Europe adopte des normes de plus en plus strictes concernant certains polluants, comme le phosphore, rendant la tâche particulièrement difficile pour les résidences décentralisées [27]. Afin de répondre à ces exigences de rejet élevées, des marais filtrants étanches, plantés de saules arbustifs et conçus pour ne pas rejeter d'effluent, sont créés et mis en œuvre au Danemark pour les résidences éloignées [6, 27, 28]. En 1995, une installation similaire est conceptualisée aux États-Unis, cette fois à base de peupliers, pour traiter les eaux usées domestiques (Fig. 1) [29]. En 2003, soit une décennie après leur invention, un guide sur la conception et la construction est produit au Danemark (*Guidelines for Willow Systems up to 30 PE*), incluant les paramètres de conception et de dimensionnement pour ces systèmes avec membrane imperméable [30, 31, 24]. Déjà en 2011, plus de 500 marais filtrants à effluent nul plantés de saule y sont en opération [6].

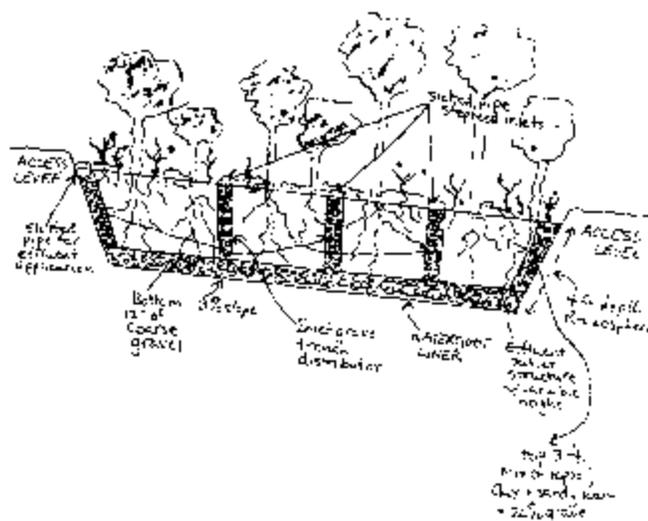


ILLUSTRATION: MARK NELSON [29]

**Figure 1** – Vue en coupe d'un marais à effluent nul composé de peupliers, conceptualisé aux États-Unis en 1995.

Après les années 2010, quelques études internationales ont exploré les possibilités d'implantation locale des marais filtrants à effluent nul en adaptant certains paramètres de conception aux conditions régionales. En Colombie (2015), dans une zone subtropicale de haute altitude, des essais en laboratoire ont été menés à l'aide de lysimètres pour évaluer l'efficacité de ces marais dans le traitement des eaux usées domestiques [32]. En Slovénie (2016), des chercheurs ont lancé une étude pilote visant à améliorer la performance des saules dans des marais à effluent nul, également pour le traitement des effluents ménagers [33]. En parallèle, en Irlande, où les sols sont généralement peu perméables, certaines maisons isolées ont adopté des systèmes de traitement à base de saules pour traiter leurs eaux usées [34]. De nos jours, c'est toutefois toujours au Danemark que ces systèmes semblent être les plus exploités, avec plus de 5000 marais filtrants à effluent nul en fonction [27].

Au Québec, une étude de faisabilité a confirmé le potentiel prometteur de cette phytotechnologie dans le contexte particulier de climat variable et de courte saison de croissance du sud-est du Canada [35]. À la suite de cette étude, un marais filtrant à effluent nul a été construit en 2021 au Jardin botanique de Montréal. Ce système vise à traiter à la fois les eaux d'arrosage contenant des pesticides du Jardin botanique et les eaux contaminées des diverses expériences menées par l'Institut de recherche en biologie végétale.

## 2.0 DESCRIPTION DE LA PHYTOTECHNOLOGIE

### 2.1 GÉNÉRALITÉS

Les marais filtrants à effluent nul (Fig. 2) présentent une structure similaire à celle des marais filtrants plus conventionnels à écoulement sous-surfacique. En effet, ils sont généralement composés des éléments suivants :

- un système d'apport des eaux usées;
- des végétaux enracinés;
- un substrat;
- une enceinte imperméable.

La principale différence réside dans l'absence d'un système d'évacuation des eaux traitées, puisque les marais à effluent nul ne génèrent aucun rejet d'eau. Cette absence de rejet est rendue possible grâce au processus d'évapotranspiration par lequel l'eau est complètement éliminée sous forme gazeuse dans l'atmosphère [6]. Afin de gérer efficacement les fluctuations de volume, ces marais sont généralement plus profonds que les autres types de marais car le niveau de l'eau peut y varier considérablement. Le contrôle de l'alimentation est souvent requis, notamment à l'aide de systèmes d'entreposage temporaire destinés à prévenir les risques de surverse (voir section 4.1).

Les marais à effluent nul peuvent recevoir les eaux usées prétraitées [6] et sont adaptés aux traitements secondaire et tertiaire des eaux usées domestiques [34] (voir les définitions dans la section 2 de la fiche technique sur les marais

filtrants de la SQP [36]). Ces eaux, qui présentent souvent des concentrations élevées en azote et en phosphore [37], stimulent la croissance des végétaux et, par conséquent, favorisent l'évapotranspiration élevée du système [34]. Les marais filtrants à effluent nul sont donc principalement utilisés pour traiter les eaux usées municipales [6] ainsi que celles des résidences individuelles éloignées. Dans certains cas, ils peuvent être également employés pour le traitement d'eaux usées ou de lixiviats d'origine diverse, notamment industrielle [6, 28, 34].

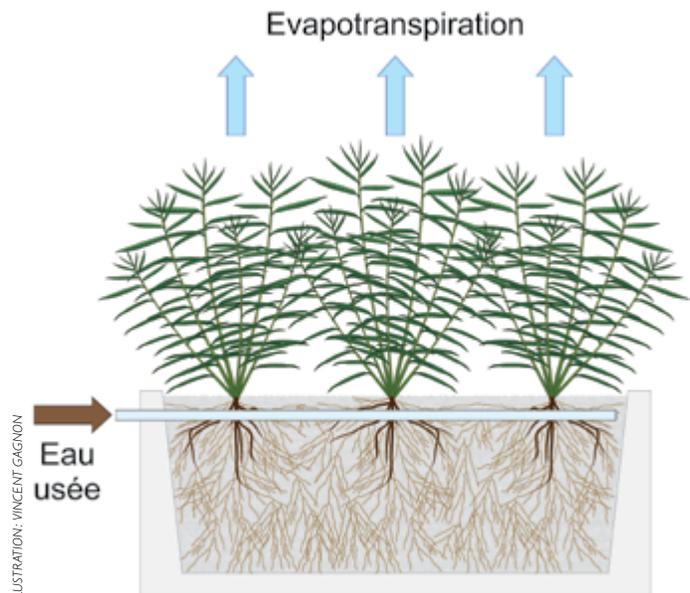


Figure 2 – Vue en coupe d'un marais à effluent nul.

### DISTINCTION ENTRE LES SYSTÈMES ÉVAPOTRANSPIRATOIRES ET LES MARAIS À EFFLUENT NUL

Les systèmes évapotranspiratoires et les marais à effluent nul reposent tous deux sur la forte capacité de transpiration des plantes – souvent des saules – à éliminer l'eau usée. Toutefois, une distinction majeure existe entre ces deux systèmes. Les systèmes évapotranspiratoires sont essentiellement des plantations en milieu ouvert, irrigués avec de l'eau usée. En l'absence d'une enceinte imperméable, une partie de l'eau peut s'infiltrer dans le sol, en particulier en dehors de la saison de croissance, lorsque l'évapotranspiration des plantes est faible [31, 38]. À cause de cette infiltration, ces systèmes ne peuvent pas être considérés comme de véritables systèmes à effluent nul. Les systèmes évapotranspiratoires avec infiltration (*willow evapotranspiration systems with infiltration*) sont

généralement mis en œuvre lorsque le sol possède une faible perméabilité, comme les sols argileux [6, 24].

À l'inverse, les marais à effluent nul plantés de saules, aussi appelés « système d'évapotranspiration fermé de saule » (*closed willow evapotranspiration systems*) sont conçus pour éliminer totalement les rejets liquides. Ils intègrent un bassin avec une enceinte imperméable, empêchant toute infiltration vers le sol et les eaux souterraines sous-jacentes [31]. Ainsi, sur une base annuelle, toute l'eau (eaux usées et précipitations) est éliminée par évapotranspiration [6] et les polluants sont progressivement dégradés ou concentrés à l'intérieur du système fermé.

## Y A-T-IL DES DANGERS LIÉS À L'ACCUMULATION DES MÉTAUX LOURDS DANS LE SUBSTRAT ?

Les données empiriques sur l'accumulation des métaux lourds dans un marais filtrant à effluent nul demeurent limitées. Toutefois, les eaux usées domestiques contiennent généralement des niveaux relativement faibles de métaux lourds. En se basant sur des concentrations de référence et sur les taux d'enlèvement connus en 2011 au Danemark, un bilan de masse a été calculé et projeté sur une période de 25 ans [6]. Même dans le pire des scénarios, les concentrations de métaux lourds dans le sol des marais resteraient en deçà des normes législatives agricoles après 25 ans d'exploitation [6]. Si, malgré tout, l'accumulation de métaux lourds dans le marais

devient telle qu'elle affecte la santé des plantes et leur capacité à évaporer l'eau, comme cela pourrait être le cas d'un marais traitant des lixiviats contaminés, il faut alors songer à excaver le marais et à disposer adéquatement du sol contaminé [35]. À long terme, compte tenu de la grande quantité d'eau usée qui aura été traitée, cette approche devient environnementalement avantageuse : malgré l'obligation éventuelle de traiter un faible volume de substrat pollué, le système aura permis de concentrer les métaux dans un espace contrôlé tout en traitant de grandes quantités d'eau pendant de très nombreuses années

CRÉDIT PHOTO : CHLOÉ FRÉDETTE

### 2.2 PROCESSUS D'ENLÈVEMENT DES POLLUANTS

De façon générale, les polluants présents dans les eaux usées domestiques, ainsi que les processus de dégradation qui leur sont associés, sont similaires à ceux observés dans les autres types de marais filtrants (voir la section 3 de la fiche technique sur les marais filtrants de la SQP [36]). L'assimilation par les plantes et les communautés microbiennes présentes dans la rhizosphère et le sol jouent un rôle clé dans les mécanismes de dégradation [38].

Toutefois, dans un marais à effluent nul, les contaminants qui ne sont pas dégradés sur place (ex., phosphore non assimilé, métaux lourds résiduels, composés organiques récalcitrants) s'y accumulent progressivement au fil du temps, que ce soit dans les végétaux [6, 28] ou dans le substrat [24]. Le rythme d'accumulation dépend du type d'affluent et de la concentration en contaminants. Il est possible de récolter les tiges après un certain temps, ce qui permet d'extraire les polluants stockés dans la biomasse (voir section 6.1) [6, 28, 24] et, dans certaines situations, de les valoriser (ex., phytomine). L'absorption par les végétaux est généralement plus efficace lorsque l'espèce et le cultivar sélectionnés sont performants et bien développés, et lorsque l'affluent ne contient que de faibles concentrations de polluants [6, 34]. En revanche, si l'eau à traiter contient des charges élevées de polluants peu ou non biodégradables, il est

alors recommandé de faire un prétraitement et de n'utiliser le marais à effluent nul qu'en tant que traitement secondaire ou tertiaire. Cette stratégie permet de limiter l'accumulation rapide de composés potentiellement phytotoxiques dans le substrat du marais, ce qui contribue à prolonger la durée de vie du système.

À long terme, l'un des enjeux potentiels des marais à effluents nuls est l'augmentation graduelle de la salinité dans le bassin, ce qui peut nuire à la croissance végétale [6]. Les sels (ex., sels d'azote, chlorure de sodium, etc.) étant très solubles, il serait alors possible de pomper l'eau du marais pour procéder à un lessivage contrôlé puis d'en disposer de manière sécuritaire pour prolonger la vie du système [6, 35]. Cependant, cette opération n'a pas été jugée nécessaire dans les systèmes traitant les eaux usées domestiques, même après plus de 20 ans d'opération [27].

La concentration de polluants dans l'eau à traiter varie selon le type d'eau usée et les usages spécifiques du site. Par exemple, une résidence utilisant fréquemment des détergents contenant du phosphore générera une charge plus élevée à traiter [6]. Les performances d'enlèvement peuvent donc fluctuer en fonction des particularités du site et des caractéristiques de l'affluent, mais aussi des paramètres de conception, des conditions d'exploitation et de la qualité de l'entretien du système [27].

## 3.0 VÉGÉTAUX

### 3.1 RÔLE ET CARACTÉRISTIQUES

Le rôle principal des végétaux dans un marais filtrant à effluent nul réside dans leur capacité à transpirer l'eau. Par conséquent, les critères de sélection des végétaux doivent prioriser un taux d'évapotranspiration élevé et une croissance vigoureuse qui contribue à maximiser cette fonction. Le choix judicieux de l'espèce végétale, du cultivar et du stade de développement est donc essentiel pour optimiser la consommation d'eau du système. Divers facteurs morphologiques et physiologiques, tels que la hauteur des plants, la rugosité des feuilles, la densité de plantation, l'ampleur du couvert végétal, la durée d'ouverture des stomates et l'aptitude à réfléchir la lumière, peuvent influencer les taux d'évapotranspiration [6].

De manière générale, les végétaux utilisés doivent également démontrer une bonne capacité de croissance et une tolérance à des conditions d'inondation variable et parfois prolongée, ainsi qu'une résistance à l'accumulation de nutriments, de sels et de métaux lourds. Dans le cas des saules, l'utilisation de cultivars sélectionnés est fortement recommandée car les saules sauvages s'avèrent généralement moins bien adaptés aux contraintes spécifiques des marais à effluent nul [6]. Bien que la majorité des ouvrages ait recours à une seule espèce végétale, l'intégration d'un mélange de variétés ou de cultivars peut s'avérer avantageuse, cette diversité permettant de réduire les risques liés aux maladies et aux parasites [6, 33, 34]. Enfin, il est toujours pertinent de tenir compte du potentiel d'envahissement des espèces choisies ainsi que de leur capacité à soutenir la biodiversité locale [38].

### 3.2 VÉGÉTAUX UTILISÉS

À l'heure actuelle, les saules (*Salix* spp.) semblent être les seuls végétaux utilisés pour ce type de marais (Fig. 3, Table 1) [6, 28, 34]. Leur adoption repose sur un ensemble de caractéristiques particulièrement bien adaptées à ce type de système : des taux de transpiration élevés [39], une propagation végétative efficace [40], un système racinaire étendu [41], une excellente absorption des nutriments [42] et une stimulation des processus de dénitrification [43]. Ils possèdent également une croissance rapide et un fort rendement en biomasse en plus de montrer une grande tolérance à divers stress environnementaux, incluant une salinité relativement élevée. Les saules résistent bien aux inondations saisonnières mais peuvent être sensibles aux inondations prolongées ou permanentes [6].

**Tableau 1** – Espèces et cultivars de saule utilisés dans les marais filtrants à effluent nul.

Nom vernaculaire	Nom scientifique	Cultivar ou 'variété'	Références
Saule blanc	<i>Salix alba</i>	V052	[33]
		V093	
		V160	
Saule de Humboldt	<i>Salix humboldtiana</i>	N/A	[32]
Saule miyabeana	<i>Salix miyabeana</i>	'SX67'	[35]
Saule schwerinii	<i>Salix schwerinii</i>	L79069	[34]
Saule des vanniers	<i>Salix viminalis</i>	'Björn'	[28]
		'Tora'	
		'Jorr'	[34]
		'Orm Torhild'	
		'Orm Tordis'	
'Orm Olof'			



**Figure 3** – Plan rapproché d'un saule (*Salix miyabeana* 'SX67') dans un marais à effluent nul.

## 4.0 DIMENSIONNEMENT

### 4.1 GÉNÉRALITÉS

Contrairement aux marais filtrants typiques, le dimensionnement des marais filtrants à effluent nul ne repose pas sur les taux d'enlèvement des polluants mais plutôt sur la quantité d'eau reçue [27]. Un système bien dimensionné doit être en mesure d'évaporer la totalité de l'eau recueillie [28]. Les paramètres généraux importants à considérer pour la conception d'un marais filtrant à effluent nul incluent [6, 28] :

- le volume d'eau usée à traiter;
- le volume de précipitations reçu sur le site;
- la faculté des végétaux à consommer l'eau.

Il convient de souligner que le dimensionnement constitue une étape critique, ayant un impact direct sur les performances à long terme du système. Le marais doit disposer d'un volume suffisant pour entreposer temporairement les apports excédentaires, notamment en cas de précipitations soudaines et abondantes, ainsi que, dans certains cas, lors de la fonte printanière.

Il est possible d'envisager un dimensionnement très simple, ne nécessitant pas de calcul des flux, lorsque les paramètres généraux mentionnés ci-dessous sont déjà bien définis ou lorsqu'un contrôle actif de l'alimentation est prévu. En effet, les étapes de dimensionnement deviennent moins critiques lorsque l'installation permet de contrôler l'apport en eau, notamment en fonction de la météo et des besoins du site. Par exemple, l'ajout d'un réservoir de stockage externe, situé en amont du bassin (Fig. 4), permet d'éviter les surverses et d'arroser les végétaux lors des périodes de sécheresse prolongée, optimisant ainsi la performance du système.

Aussi, même si certaines directives existent et proposent des paramètres de conception et de dimensionnement détaillés,

comme les directives danoises [30, 31], celles-ci ne sont pas adaptées et applicables à tous les contextes locaux. Par exemple, dans certaines régions d'Irlande [34], l'application directe de ces paramètres s'est révélée inadaptée, entraînant des performances réduites et des rejets d'eau non prévus. Ces écarts s'expliquent par des disparités du climat et des conditions des sols [24]. Il est donc important de concevoir le marais en tenant compte de toutes les conditions influençant le volume d'eau à traiter, notamment à l'aide d'un bilan hydrique adéquat. En l'absence d'un tel calcul, il convient à tout le moins de prévoir un espace de stockage d'eau approprié.

Pour le traitement des eaux usées domestiques, la profondeur minimale du substrat dans le marais est généralement de 1,5 m. De plus, une digue périphérique de 0,2 à 0,3 m de hauteur est recommandée pour contenir les inondations potentielles et permettre le stockage temporaire de l'eau au besoin (voir section 5.1) [6, 34]. Les marais sont souvent conçus avec une forme allongée, soit plus longs que larges. Au Danemark, pour le traitement de l'eau usée d'une résidence (5 personnes équivalentes) ou d'une petite entreprise, la profondeur du marais varie entre 1,5 et 1,8 mètre, avec une longueur typique de 8 mètres [6, 28, 34]. La surface requise dépend des volumes à traiter et du climat local [6].

### 4.2 BILAN HYDRIQUE

Le bilan hydrique constitue, sans contredit, l'élément le plus crucial pour garantir l'absence de rejet [6, 28]. Les flux hydriques attendus doivent d'abord être évalués en fonction de la quantité totale d'eaux usées reçues par le marais au cours de l'année. Toutefois, il n'est pas recommandé de se baser uniquement sur une moyenne annuelle, car cela ne reflète pas les importantes variations saisonnières et peut mener au sous-dimensionnement du marais. Le bilan hydrique doit donc être plutôt établi sur une base journalière ou mensuelle et



**Figure 4** – Citernes de 1000 L pour le stockage des eaux usées traitées par un marais filtrant à effluent nul, au Jardin botanique de Montréal.

mesurée sur une période d'une année. Idéalement, le volume d'eau à traiter devrait être mesuré à l'aide de compteurs d'eau, permettant ainsi une estimation précise fondée sur les consommations réelles du site. Si cette approche n'est pas possible, les moyennes de consommation locales ou régionales peuvent être utilisées, advenant qu'elles soient représentatives des conditions du site [34].

Le bilan hydrique d'un marais filtrant à effluent nul peut être déterminé à l'aide de l'équation suivante [38] :

$$\begin{aligned}\Delta V &= Q_i + (P \times A) - (ET \times A) \\ \Delta V &= Q_i + A(P - ET) \\ A &= \frac{\Delta V - Q_i}{(P - ET)}\end{aligned}$$

Ainsi, lorsque la quantité totale d'eau reçue par le système est connue, la surface ( $A$ ;  $m^2$ ) et le volume ( $V$ ;  $m^3$ ) requis peuvent être calculés. Ces variables sont donc déterminées par le débit d'entrée ( $Q_i$ ;  $m^3/j$ ), les précipitations ( $P$ ;  $m/j$ ) et l'évapotranspiration ( $ET$ ;  $m/j$ ) du site, en incluant la capacité de stockage hivernale à travers la variabilité des saisons [6].

Afin d'avoir une idée précise du volume ( $V$ ;  $m^3$ ) du marais, la porosité du substrat, c'est-à-dire le volume total non occupé par le substrat composé des interstices présents, est calculée pour obtenir la capacité volumique réelle en eau [34].

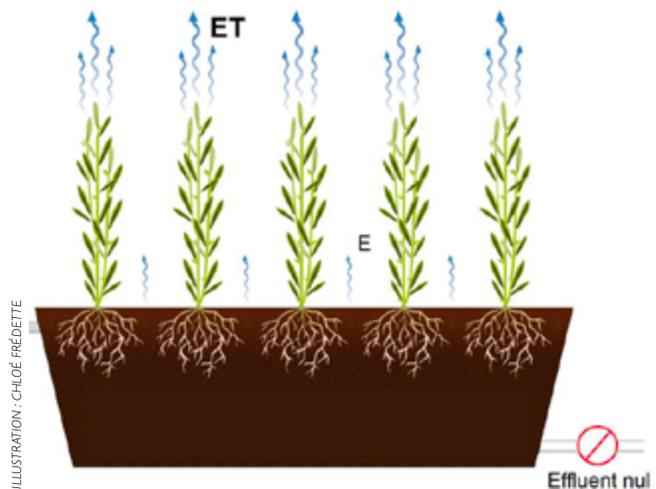
#### 4.2.1 PRÉCIPITATIONS

La quantité de précipitations varie en fonction des saisons et ces fluctuations doivent impérativement être prises en compte afin de concevoir une capacité adéquate de stockage de l'eau dans le marais, notamment en dehors de la période végétative. Ces données sont d'autant importantes que, pour assurer le bon fonctionnement du système, la capacité d'évapotranspiration des végétaux doit être supérieure aux apports en eau par précipitations [6, 28]. Le climat du site d'implantation devient un facteur clé dans le dimensionnement. Les précipitations reçues par le marais peuvent être estimées à partir des données climatiques locales, généralement accessibles et précises, provenant de stations météorologiques situées à proximité du site. Il est à noter que, même dans un pays de petite superficie comme le Danemark, la surface requise du marais peut varier notablement, de  $124 m^2$  à  $293 m^2$ , en fonction des différences régionales en précipitations [6].

Bien que certains concepteurs se basent sur les variations climatiques mensuelles des quatre dernières années pour estimer les apports en eau [34], il est généralement préférable de fonder les calculs sur des projections climatiques mensuelles futures, couvrant une période d'au moins 10 ans [27]. Par ailleurs, il est fortement recommandé d'inclure un facteur de sécurité supplémentaire afin de mieux faire face aux années particulièrement pluvieuses et d'anticiper une possible augmentation des précipitations liée aux changements climatiques.

#### 4.2.2 ÉVAPOTRANSPIRATION

L'évapotranspiration regroupe deux processus complémentaires : l'évaporation et la transpiration (Fig. 5). L'évaporation désigne le passage de l'eau liquide contenue dans le sol et à la surface des végétaux vers l'état gazeux sous l'effet d'une différence de température entre la surface et l'air ambiant. La transpiration, quant à elle, correspond à la vaporisation des molécules d'eau liquide contenues dans les tissus végétaux. Cette perte d'eau s'effectue par les stomates, de minuscules ouvertures situées à la surface des feuilles, par lesquelles s'échangent les gaz, dont la vapeur d'eau. Le taux d'évapotranspiration représente ainsi la quantité de molécules d'eau perdue par le sol et les végétaux, et il est communément exprimé en millimètres par unité de temps [6]. En général, plus de 95 % de l'eau consommée par une plante est évacuée dans l'atmosphère sous forme de vapeur d'eau par transpiration.



**Figure 5** – Évapotranspiration (ET) et évaporation (E) dans un marais filtrant à effluent nul.

Divers paramètres, tels que la charge en polluants de l'effluent, la porosité du sol et le taux d'établissement et de croissance des végétaux peuvent influencer les taux d'évapotranspiration [34]. Les paramètres météorologiques, tels que de la force du rayonnement solaire, la température, l'humidité de l'air, la direction et la vitesse des vents, peuvent tous également exercer une influence sur la quantité d'eau transpirée par les plantes [6]. Enfin, le type de substrat utilisé et la fertilisation peuvent aussi impacter les performances du système [35, 44]. Pour maximiser l'évapotranspiration, il est recommandé d'implanter le marais dans un emplacement bien exposé au soleil, à l'abri de l'ombre projetée par de grands arbres ou bâtiments, et dans un sol adéquat [6].

## COMMENT MESURER L'ÉVAPOTRANSPIRATION?

On peut mesurer les taux d'évapotranspiration par une méthode directe ou indirecte. La méthode directe consiste à mesurer l'évapotranspiration sur le terrain à l'aide d'instruments dédiés. Cette méthode est techniquement difficile, exige la prise de mesures multiples, nécessite une expertise particulière et l'achat d'appareils coûteux. Surtout, étant donné que le taux d'évapotranspiration varie en fonction des saisons, du taux d'humidité ou du moment dans la journée, les mesures directes doivent donc être prises souvent et sur une longue période pour obtenir des moyennes représentatives. Ainsi, il est plus opportun, lorsque la référence existe, d'utiliser les bases de données disponibles pour connaître l'ordre de grandeur des variations de la consommation d'eau du cultivar utilisé sans avoir à effectuer des mesures répétées sur de longues périodes. Dans la plupart des cas, les mesures directes servent principalement à valider les estimations issues de la méthode indirecte [6] ou à documenter des espèces végétales non encore référencées.

La méthode indirecte repose sur une formule empirique standardisée pour estimer le taux d'évapotranspiration du système :

$$ET_c = ET_o \times k_c$$

où  $ET_o$  est l'évapotranspiration potentielle de référence qui correspond à la perte d'eau

d'un couvert végétal uniforme et dense de type pelouse en conditions optimales (sans stress hydrique) [45]. Elle est calculée à partir des données climatiques locales (température, humidité, vitesse du vent, etc.). Le coefficient de culture ( $k_c$ ) intègre la hauteur de la plantation, la capacité de réflexion du sol et du couvert végétal, l'évaporation de sol, la disposition des végétaux, etc. [24]. Il est spécifique à chaque type de culture et à son stade de développement. Plusieurs recherches sur les valeurs de  $ET_o$  et  $k_c$  sont disponibles en ligne, en fonction de diverses conditions climatiques. Ces deux paramètres permettent de calculer le taux d'évapotranspiration de la culture ( $ET_c$ ). Des ressources comme CROPWAT fournissent des valeurs de l' $ET_c$  pour différentes cultures et pour plus de 140 pays [6].

De manière générale, la perte d'eau par évapotranspiration ( $ET_c$ ) d'un marais à effluent nul efficace est nettement supérieure à l'évapotranspiration potentielle du site ( $ET_o$ ) [46]. Certains auteurs mentionnent même que cette perte d'eau annuelle du marais ( $ET_c$ ) devrait être de plus de 2,5 fois le taux d'évapotranspiration potentielle  $ET_o$  [6].

Deux effets bien connus, l'« effet oasis » et l'« effet corde à linge » (voir section 5.2) permettent d'amplifier l'évapotranspiration en augmentant le coefficient de culture ( $k_c$ ) et, par conséquent, le  $ET_c$  [26].

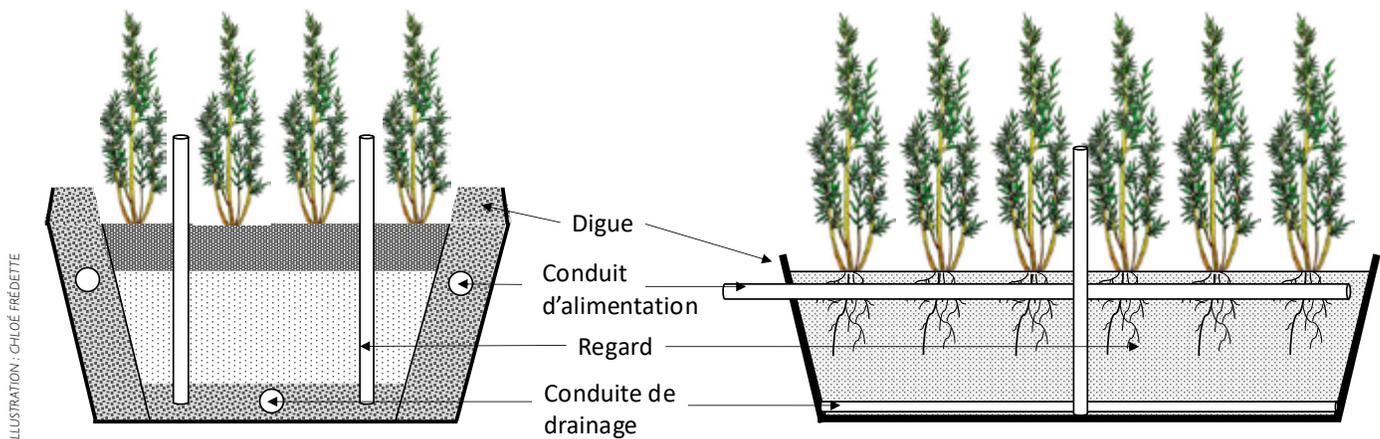
## 5.0 DÉTAILS DES COMPOSANTES

### 5.1 COMPOSANTES MATÉRIELLES

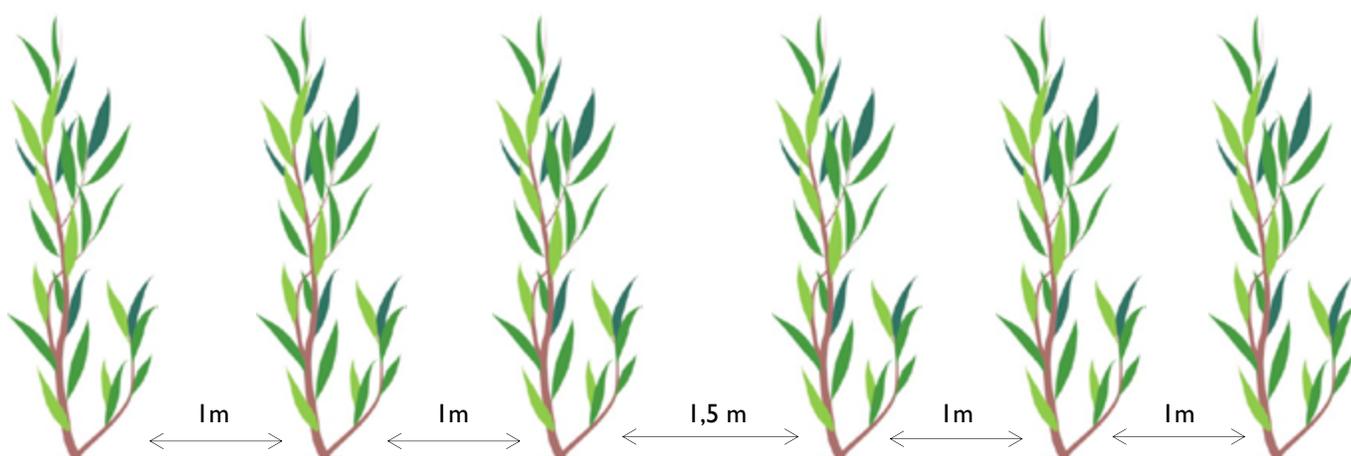
Préalablement à l'entrée dans le marais filtrant, les eaux usées sont généralement prétraitées à l'aide de réservoirs de sédimentation ou des fosses septiques, notamment dans le cas des eaux usées résidentielles [6]. Ce prétraitement essentiel permet de capter une partie des matières en suspension, avant que l'eau ne soit acheminée vers le marais, soit par gravité, soit à l'aide de pompes [6, 34, 37].

Après excavation, la surface du bassin qui formera le marais est imperméabilisée par l'installation de membranes étanches (ex., de polyéthylène, de caoutchouc butyle, etc.) et/ou de géotextiles [6, 28, 34]. Le substrat filtrant qu'on y déposera est généralement constitué de gravier (8 – 32 mm) [34] ou de sable [6, 28]. Une mince couche de substrat de croissance peut être ajoutée en surface pour faciliter l'implantation des végétaux. L'apport de l'eau se fait généralement sous la surface et les tuyaux de distribution sont installés dans une couche de

substrat plus grossier (16 – 32 mm), afin d'éviter les problèmes hydrauliques [6, 34]. Ces tuyaux sont habituellement situés à une extrémité du lit où les eaux usées sont acheminées dans le bassin sous pression à l'aide d'une pompe [6]. Composés de matériaux divers, ces tuyaux ont des diamètres variables (40 – 110 mm) et sont percés pour permettre la percolation [34]. Ces perforations doivent être suffisamment grandes pour éviter qu'elles ne soient éventuellement obstruées par la croissance des racines, entraînant alors des bris ou du colmatage [27]. Pour éviter le gel hivernal, les tuyaux de distribution doivent être enterrés à plus de 0,6 m de profondeur [6]. Des puits d'inspection d'environ 0,3 m de diamètre sont fréquemment installés pour surveiller le niveau d'eau, pomper les excès si nécessaire ou faciliter l'entretien du bassin [34]. Un tuyau de drainage est également placé au fond du lit pour évacuer l'eau excédentaire si nécessaire ou pour purger une eau qui serait devenue trop saline [6]. Enfin, une digue, d'une hauteur de 0,2 à 0,3 m ceinturant le bassin, est généralement présente pour faciliter le stockage des eaux hivernales et prévenir les débordements [6, 34] (Fig. 6).



**Figure 6** – Vue en coupe transversale (gauche) et longitudinale (droite) des composantes d'un marais filtrant à effluent nul.



**Figure 7** – Disposition recommandée des saules dans un marais à effluent nul.

## 5.2 COMPOSANTES VÉGÉTALES

Dans la littérature sur le sujet, les recommandations concernant la mise en place et la disposition des végétaux portent exclusivement sur le saule arbustif. Idéalement, la propagation et l'établissement de la plantation devraient être réalisés par un personnel spécialisé. Les plants peuvent provenir de graines ou de boutures d'environ 0,2 – 0,3 m de longueur, préalablement conservés à une température inférieure à 0 °C afin d'induire une dormance. Bien qu'une plantation estivale soit possible, la période optimale d'établissement des végétaux est le printemps, après le dernier gel, afin d'assurer une première saison de croissance plus longue, favorisant une meilleure résilience face aux conditions hivernales à venir [6].

Les saules sont généralement placés en rangées espacées de 1 m. Après 3 rangées consécutives, un espacement plus large de 1,5 m est aménagé pour faciliter l'accès du site pour l'entretien (Fig. 7) [6]. La densité de plantation recommandée varie généralement entre 1,8 et 4 individus/m<sup>2</sup>, selon les objectifs de couverture et les conditions du site [6, 21, 34].

La disposition des végétaux dans ce type de système peut être optimisée pour maximiser l'évapotranspiration. L'« effet oasis » se produit lorsque la végétation du marais bénéficie d'une plus grande disponibilité en eau que son environnement immédiat. Dans ce contexte, l'air plus sec et plus chaud qui entre et circule dans le marais augmente les taux d'évapotranspiration [24, 27, 46]. L'« effet corde à ligne », quant à lui, repose la disposition des végétaux en hautes rangées perpendiculaires aux vents dominants. Cette configuration favorise le passage rapide de l'air sec agité avoisinant à travers le système, ce qui augmente l'évacuation de la vapeur d'eau à l'extérieur [6, 24]. Le phénomène est amplifié lorsque les rangées sont étroites et que le marais est encerclé de plantes plus basses [27]. En combinant judicieusement ces deux effets, il est possible d'améliorer significativement la performance hydrique du système sans intervention mécanique, uniquement par un aménagement stratégique de la végétation.



## 6.0 ENTRETIEN ET COÛTS

### 6.1 ENTRETIEN

La première année suivant la plantation est une étape cruciale au succès de l'établissement du couvert de saule. Il est important d'assurer un suivi serré et une gestion attentive des végétaux nouvellement implantés, en veillant à maintenir des conditions optimales pour l'évapotranspiration et effectuer un repiquage lorsque requis. Un contrôle efficace des plantes adventices et des espèces végétales exotiques envahissantes est particulièrement important au cours de la première année afin d'éviter qu'elles ne nuisent à la croissance, à la vigueur et à la ramification des plants de saule [6, 28, 34]. Plusieurs méthodes de lutte peuvent être mises en œuvre, notamment le désherbage manuel et l'application de paillis (Fig. 8) ou de bâches. Dès la deuxième année de croissance, les saules deviennent plus compétitifs et peuvent généralement supplanter les espèces végétales indésirables, réduisant ainsi les besoins d'entretien [6, 28]. La présence d'herbivores aux abords du site peut compromettre l'établissement des jeunes plants. L'installation de clôtures de protection peut alors s'avérer nécessaire [6]. Enfin, certains effectuent le premier recépage juste avant l'hiver suivant la plantation (novembre), mais d'autres mentionnent que cette opération doit être réalisée le plus tard possible durant la saison de dormance, soit très tôt au printemps suivant, avant le débourrement (mars).



CRÉDIT PHOTO : LAURIANNE BÉDARD

**Figure 8** – Application de paillis dans un marais filtrant à effluent nul.

Les tiges doivent être coupées à moins de 20 cm du sol, ce qui stimule la densité de croissance et la formation de ramifications multiples [6].

Pour stimuler la croissance et favoriser l'extraction des polluants, les systèmes composés de saules sont à nouveau recépés le troisième printemps suivant la plantation [6]. Par la suite, il est possible de récolter le tiers ou la moitié de la biomasse aérienne des saules (coupée à partir de 5 cm du sol) chaque année ou tous les 2 à 3 ans afin de maintenir la vigueur et la productivité du couvert végétal [27, 47, 34]. Il est aussi essentiel de remplacer les plants morts, lesquels peuvent résulter de la toxicité liée à la bioaccumulation de certains contaminants [27].

Un suivi régulier du niveau d'eau, à l'aide des puits d'inspection, est nécessaire pour prévenir à la fois les surverses et les périodes de sécheresse. Dans le cas où un système de prétraitement sur place est utilisé (ex., réservoirs de sédimentations ou fosses septiques), les unités de prétraitement doivent être vidées annuellement pour maintenir leur efficacité. Sur le plus long terme, l'accumulation de sels dans le bassin constitue une autre contrainte dont il faut tenir compte pour éviter d'atteindre des paliers toxiques pour les végétaux [6, 28]. Toutefois, après plus de 20 ans d'opération dans le traitement des eaux usées domestiques, cette intervention n'a pas été nécessaire [27].

### 6.2 COÛTS

Les coûts pour les marais filtrants à effluents nuls peuvent varier considérablement selon les caractéristiques du site, les matériaux choisis et le volume d'eau à traiter. Les composantes les plus faciles à estimer sont celles du prétraitement et du système de distribution (par gravité ou à l'aide de pompes). Cependant, les coûts de construction du marais dépendent de plusieurs facteurs : la dimension du marais, la qualité et le type de membrane, le volume de substrat à déplacer, la quantité d'eau à traiter, etc. Il est donc nécessaire d'établir un budget d'investissement spécifique à chaque projet. À titre indicatif, une étude réalisée au Danemark (2011) sur 34 marais à effluents nuls, conçus pour le traitement de l'eau de résidences individuelles, a estimé les coûts d'investissement entre 3000 et 18000 \$ (2000 et 12000 €), avec un prix moyen d'environ 12000 \$ (8000 €) pour un système complet, incluant la pompe [6]. Contrairement à l'investissement initial, les coûts d'exploitation et d'entretien sont faibles, principalement liés aux vidanges de l'unité de traitement et à la consommation d'énergie des pompes. Ces coûts récurrents sont estimés à environ 450 \$ (300 €) par an. Par ailleurs, dans les pays où les coûts associés aux rejets d'eau usée sont assumés par ceux qui les génèrent, ce type de système permet d'éviter ces frais en éliminant tout rejet vers l'environnement [6].

## 7.0 AVANTAGES ET LIMITES

### 7.1 AVANTAGES

Les marais filtrants à effluent nul sont très avantageux lorsque les normes de rejets sont sévères ou les rejets interdits [28, 34, 47]. L'absence de rejet permet de protéger entièrement l'environnement contre la contamination par les effluents [21], incluant les risques pour les eaux de surface et souterraines [6]. Par ailleurs, les eaux usées à traiter deviennent une source de nutriments pour les végétaux utilisés [34, 37] permettant la séquestration de contaminants, comme l'azote et le phosphore, dans la biomasse [35].

Ce type de marais est particulièrement intéressant pour les effluents contenant des polluants récalcitrants ou toxiques qui nécessiteraient autrement un traitement coûteux par des installations spécialisées où lorsqu'un contaminant particulier ne peut être traité efficacement par d'autres technologies. De plus, contrairement aux systèmes passifs sans végétation ayant des fonctions similaires (ex., bassins d'évaporation), les marais filtrants végétalisés concentrent plus rapidement les polluants contenus dans l'eau grâce à l'évapotranspiration [35]. Cette phytotechnologie favorise la rétention des polluants dans un espace restreint, limitant ainsi leur dispersion dans l'environnement [35].

Sur le plan économique, les marais filtrants à effluents nuls sont aussi moins coûteux que la plupart des technologies conventionnelles, en raison des faibles coûts d'installation et d'entretien. De plus, ils peuvent être potentiellement d'excellents puits de carbone en piégeant le carbone dans la biomasse qui peut alors être valorisée, par exemple, sous forme de biochar [27]. Finalement, cette phytotechnologie peut être implantée et fonctionnelle dans des régions tempérées froides lorsqu'un espace suffisant pour stocker l'eau est prévu durant la saison de dormance des végétaux, et que les tuyaux sont enterrés à une profondeur adéquate (0,6 m) [6].

### 7.2 LIMITES

L'un des principaux défis pour cette technologie réside dans la détermination d'un dimensionnement adéquat. Il est difficile de trouver un équilibre entre un bassin sous-dimensionné où les végétaux risqueraient d'être submergés faute de consommation rapide, engendrant ainsi un risque de contamination de surface, et un bassin surdimensionné qui serait plus coûteux à mettre en œuvre et qui risquerait d'être asséché trop souvent [28]. Dans les deux cas, l'efficacité et la santé des végétaux sont affectées. Par ailleurs, les paramètres généraux de dimensionnement sont toujours en développement et il n'existe pas encore de normes universelles qui s'adaptent à tous les cas de figure [24]. Les recherches doivent être donc poursuivies et, ce, dans divers contextes climatiques.

Les marais filtrants à effluent nul possèdent également une empreinte de sol plus élevée que les marais classiques puisqu'ils nécessitent une plus grande surface, notamment pour stocker les eaux polluées à traiter durant l'hiver [6]. En raison du grand volume d'eau polluée traitée et de l'accumulation potentielle des polluants qui y est associée, on peut s'attendre à ce que le substrat doive être décontaminé en fin de vie.

### 7.3 PERSPECTIVES

Une étude de faisabilité menée au Québec et publiée en 2022 a confirmé le potentiel prometteur de cette phytotechnologie, malgré les contraintes liées au climat variable et à la courte saison de croissance du sud-est du Canada [35]. Cependant, l'utilisation exclusive d'un marais filtrant à effluent nul comme seul mode de traitement des eaux usées n'est pas autorisée au Québec pour les usages résidentiels. Ces systèmes pourraient toutefois être utilisés comme solutions complémentaires, par exemple, pour l'élimination du phosphore. Les industries québécoises peuvent, quant à elles, envisager l'implantation de cette technologie pour certains types d'eaux usées industrielles après une évaluation au cas par cas.

Parmi les autres défis à surmonter :

- Le manque d'expertise locale (peu d'ingénieurs et techniciens sont formés à ce type de technologie);
- La multidisciplinarité requise (ingénierie, biologie, architecture, etc.);
- L'augmentation des précipitations liée aux changements climatiques, qui pourrait réduire l'efficacité du système si elle dépasse la capacité d'évapotranspiration [48].

Malgré ces freins, les marais filtrants à effluent nul représentent tout de même une très belle opportunité pour le climat québécois puisqu'ils peuvent rester en fonction pendant 7 mois, soit de mai à novembre [35]. Leur utilisation serait appropriée pour la protection des milieux sensibles (nappe phréatique, milieux naturels d'exception, etc.), pour les sols imperméables ou les zones sans réseau d'égout, pour les lieux saisonniers (campings, camps de jour ou chalets) ou encore pour le traitement de lixiviats de déchets industriels toxiques [44]. Les marais filtrants plus traditionnels étant connus pour être moins efficaces dans le traitement du phosphore, les marais à effluent nuls seraient plus intéressants lorsque combinés à d'autres technologies de traitement pour éviter que ce polluant n'accroisse l'eutrophisation des eaux. Finalement, malgré les précipitations plus variables, les hausses de températures estivales causées par les changements climatiques pourraient augmenter potentiellement les taux d'évapotranspiration, ce qui améliorerait les performances du système durant la saison de croissance.

## 8.0 EXEMPLES

### 8.1 MARAIS À EFFLUENT NUL TYPIQUES DU DANEMARK



CRÉDIT PHOTO : CARLOS ARIAS

<b>Type d'eau</b>	Eau usée domestique
<b>Volume moyen/an</b>	150 – 300 m <sup>3</sup>
<b>Superficie du marais</b>	125 – 292 m <sup>2</sup>
<b>Espèce(s) végétale(s)</b>	<i>Salix viminalis</i> cultivars 'Björn', 'Jorr' et 'Tora'
<b>Localisation</b>	Danemark
<b>Années de mise en fonction</b>	À partir de 1997
<b>Conception</b>	Non disponible

Tel que mentionné, les marais à effluents nuls plantés de saules ont été développés au Danemark. Ils servent principalement à traiter l'eau des résidences isolées du réseau d'égouts. La profondeur du marais pour le traitement de l'eau usée d'une résidence (5 personnes équivalentes) ou d'une petite entreprise est typiquement comprise entre 1,5 et 1,8 m [6, 28, 34], pour une longueur d'environ 8 m.

Leur implantation s'est intensifiée à partir des années 1997 et un guide de conception (*Guidelines for Willow Systems up to 30 PE*) a été publié quelques années plus tard pour encadrer leur conception et leur mise en place [30, 31, 24]. Aujourd'hui, le Danemark est, de loin, le pays qui possède le plus de marais filtrants à effluents nuls, avec plus de 5000 systèmes fonctionnels [27]. Ainsi, cette phytotechnologie éprouvée constitue une solution efficace pour les habitations éloignées, répondant aux normes de rejets les plus strictes du pays.

## 8.2 MARAIS À EFFLUENT NUL EN IRLANDE



CRÉDIT PHOTO : LAURENCE GILL

<b>Type d'eau</b>	Eau usée domestique
<b>Volume moyen</b>	340 m <sup>3</sup>
<b>Superficie du marais</b>	340 m <sup>2</sup>
<b>Espèce(s) végétale(s)</b>	<i>Salix viminalis</i> cultivars 'Tora', 'Tordis' et 'Olof'
<b>Localisation</b>	Wexford, Irlande
<b>Années de mise en fonction</b>	2010
<b>Conception</b>	Non disponible

Ce marais filtrant, construit en 2010, est localisé dans le sud-est de l'Irlande sur des terres fortement argileuses où le sol est donc peu perméable. Les eaux usées domestiques traitées y sont acheminées par gravité. Le bassin de 340 m<sup>2</sup> de surface a une profondeur de 1,8 m et l'épaisseur du substrat est de 1 m. Le substrat est composé du sol du site remblayé, en plus d'une couche drainante de gravier (8 – 32 mm) où sont situés les tuyaux, et d'une couche de sable (1 – 4 mm) de 0,1 m en surface. Une membrane imperméable de 0,5 mm d'épaisseur, composée de caoutchouc butyle et de polyéthylène de faible densité, ainsi qu'une membrane géosynthétique servent d'enceinte imperméable. Une digue de 0,2 m est aussi présente pour le stockage des eaux hivernales. L'étude a révélé la présence de surverses lors de la période de gel et de dormance des végétaux, résultantes de pertes latérales dues à la faible porosité du sol excavé du site, combinées à des taux d'humidité plus élevés qu'anticipés. Malgré ces pertes, les analyses ont confirmé l'efficacité hivernale du système dans la réduction des polluants [34].

### 8.3 MARAIS À EFFLUENT NUL DU JARDIN BOTANIQUE DE MONTRÉAL

CRÉDIT PHOTO : LAURIANNE BÉDARD ET DAVE SMITH



<b>Type d'eau</b>	Eaux contaminées variables
<b>Volume moyen</b>	30 m <sup>3</sup>
<b>Superficie du marais</b>	30 m <sup>2</sup>
<b>Espèces végétales</b>	<i>Salix miyabeana</i> cultivar 'SX67'
<b>Localisation</b>	Jardin botanique de Montréal
<b>Années de mise en fonction</b>	2020
<b>Conception</b>	Chloé Frédette, Jacques Brisson, Patrick Boivin, Benoit St-Georges, Espace pour la vie, Institut de recherche en biologie végétale, Université de Montréal.

Ce prototype de marais filtrant à effluent nul est situé dans une zone fermée au public du Jardin botanique de Montréal. Il a pour but de traiter les eaux de lavage des équipements contenant des pesticides du Jardin botanique, ainsi que les eaux contaminées issues de divers essais expérimentaux de l'Institut de recherche en biologie végétale. L'enceinte imperméable est composée d'une géomembrane et d'un géotextile. L'installation a une profondeur de 1 m et possède 7 rangées de 10 individus de saule (*Salix miyabeana*, cultivar 'SX67'). Le substrat sableux est recouvert de paillis. Le marais contient un total de 9 piézomètres, permettant de mesurer le niveau de l'eau et 4 conduits d'accès à des caméras d'observation des racines. Une zone de stockage d'eau externe (3 citernes de 1000 L) reliée au marais par des tuyaux de PVC permet de gérer l'alimentation du bassin de manière ciblée en fonction du niveau d'eau mesuré et de la capacité totale du marais.

# 9.0 OUTILS EN LIGNE, GUIDES ET RESSOURCES

Water Research 209 (2022) 117950



## Design of a zero liquid discharge leachate treatment system using an evapotranspiration willow bed

Chloé Frédette<sup>a,b</sup>, Yves Comeau<sup>a</sup>, Jacques Brisson<sup>a,b,\*</sup>

<sup>a</sup> Département de sciences biologiques, Université de Montréal, C.P. 6128, succ. Centre-ville, Montréal, Québec H3C 3J7, Canada  
<sup>b</sup> Institut de recherche en biologie végétale, 4101 Sherbrooke Est, Montréal, Québec H2J 2R2, Canada  
<sup>c</sup> Département de Génie, Conception et Mining Engineering, Polytechnique Montréal, 2001 Édouard-Bellet, Montréal, Québec H3T 2J4, Canada

### ARTICLE INFO

**Keywords:**  
 Evapotranspiration willow bed  
 Salt  
 Contaminated leachate  
 Mixed continental northern climate  
 Design optimization  
 Hydrological modeling

### ABSTRACT

While zero liquid discharge (ZLD) wetlands have been successfully used for domestic wastewater treatment, adapting this technology to treat other wastewaters such as leachate could be very attractive for some industries concerned with meeting increasingly stringent environmental regulations. Leachate treatment typically implies large volume of water that are entirely dependent on rainfall and therefore highly variable both throughout the year and between years. Current design guidelines for zero discharge willow systems limit system flexibility because they are based on rough theoretical estimates of evapotranspiration. This discuss the applicability of ZLD treatment through a willow bed evapotranspiration (ET) applied to the treatment of industrial leachate that has high and variable hydraulic loading rate and low contaminant and salt concentration. We propose a base design and, through detailed and long-term hydrological modeling of such a treatment system, investigate how various design and management decisions can affect sizing, efficiency, and overall feasibility of the technology. We showed that considering ET optimization factors (e.g. fertilization and organic substrate) was essential for ZLD to be achieved over a 20 year period in northern continental humid climate and that the ratio between cumulative annual ET of the willow bed and cumulative annual rainfall should be at least 1.5. When varying the leachate collection area, it was found that a ratio of willow bed area to collection area between 0.5 and 0.7 should be expected for an optimized design in this specific climate, where land area and storage volume remains the most limiting factors. Regarding storage volume, several management options can be applied to reduce the volume of storage required. We also highlight that a risk attenuation strategy should always be included in the design of a ZLD wetland system. Our study suggests that ZLD wetlands constitute a green technology that represents a serious alternative treatment method for pretreated leachate, while offering many benefits such as low maintenance and energy costs, valorization of contaminants such as nitrogen or phosphorus through biomass production, and, most importantly, zero contaminant discharge to the environment. Finally, we propose future research opportunities and other possible applications for further development of the technology.

### 1. Introduction

Every year, industries must treat a large, variable volume of water, due to rainfall leaching through various wastes or products (e.g. landfills, mine wastes, stored treated wood piles). Among the available solutions used for industrial wastewater treatment, some aim to reduce the volume of water released into the environment to zero and are referred to as zero liquid discharge (ZLD) systems. Such systems were first developed to allow different industrial sectors to reduce both water consumption and treatment costs (Scopell et al., 2004). This type of approach can also allow industries to avoid having to obtain a discharge

permit for their contaminated effluent. The concept of ZLD is used increasingly to address a number of the different constraints and difficulties associated with wastewater treatment (Frey and Elmehrik, 2011). Typical ZLD systems can take various forms, the simplest being evaporation ponds where wastewater is stored until it passively evaporates. Not only does this type of systems fail to enable reuse of the water, it also requires a very large area and is feasible in very few contexts, such as arid and semi-arid climates. In contrast, some highly sophisticated systems combine physical (e.g. water purification through energy-dried evaporators) and chemical (e.g. adding chemicals to precipitate a specific compound) steps to both purify water and raw materials that can be

\* Corresponding author at: Département de sciences biologiques, Université de Montréal, C.P. 6128, succ. Centre-ville, Montréal, Québec H3C 3J7, Canada.  
 Email address: [jbrisson@umontreal.ca](mailto:jbrisson@umontreal.ca) (J. Brisson).  
[chloe.fredette@umontreal.ca](mailto:chloe.fredette@umontreal.ca) (C. Frédette), [yves.comeau@polymtl.ca](mailto:yves.comeau@polymtl.ca) (Y. Comeau), [jacques.brisson@umontreal.ca](mailto:jacques.brisson@umontreal.ca) (J. Brisson).  
<https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117950>  
 Received 27 July 2021; Received in revised form 27 October 2021; Accepted 5 December 2021  
 Available online 7 December 2021  
 0043-1354/© 2021 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Frédette, C., Comeau, Y., & Brisson, J. (2022). Design of a zero liquid discharge leachate treatment system using an evapotranspiration willow bed. *Water Research*, 209, 117950.

STREPOW International Workshop

## USE OF WILLOWS IN EVAPOTRANSPIRATIVE SYSTEMS FOR ONSITE WASTEWATER MANAGEMENT – THEORY AND EXPERIENCES FROM DENMARK

Hans Brix<sup>a</sup>, Carlos A. Arias<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Department of Biological Sciences, Aarhus University, Ole Worms Allé 1, 8000 Aarhus C., Denmark

### Summary

Evapotranspiration (ET) is a method of onsite wastewater treatment and disposal that is an alternative to conventional soil absorption systems, particularly for sites where protecting surface water and ground water is essential or where soil infiltration is not possible. One of the most important aspects of ET systems is their ability to evapotranspire all of the sewage discharged into the systems and the rain falling onto the systems. On an annual basis the ET should equal the amount of wastewater discharged into the system plus the amount of precipitation falling onto the system. Part of the nutrients can be recycled via the plant biomass, and the harvested biomass can serve as a source of bio-energy. In Denmark more than 500 ET systems planted with willows are in operation. The systems generally consist of a 1.5 m deep high-density polyethylene-lined basin filled with soil and planted with clones of willow (*Salix viminalis* L.). The surface area of the systems depends on the amount and quality of the sewage to be treated and the local annual rainfall. A single household in Denmark typically requires between 120 and 300 m<sup>2</sup>. The annual precipitation at the site of construction is an important dimensioning parameter. Settled sewage is dispersed underground into the bed under pressure. The stems of the willows are harvested on a regular basis to stimulate the growth of the willows and to remove some nutrients and heavy metals. In this paper, the theory behind the operation of willow based ET systems, their design, construction and management as well as operational experience are described.

**Keywords:** Evapotranspiration, willows, onsite wastewater treatment, zero-discharge, *Salix*.

### Introduction

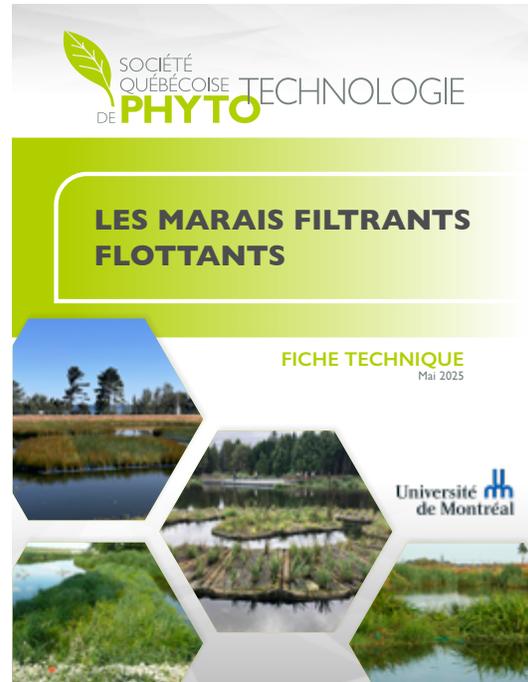
Evapotranspirative systems (ET systems) were developed in the Scandinavian countries as a spin-off from agricultural willow plantations established for producing woody biomass for energy production. These plantations are planted with fast growing woody species. The growth of the trees is often limited by water availability during summer, and hence the idea that the plantations could be irrigated with wastewater arose. Since urban wastewater contains high concentrations of nitrogen and phosphorus in the right proportion for plant growth, the irrigation by wastewater supplies both water and nutrients to support the growth of plants. It was observed that the water loss by evapotranspiration from the systems was very high, and hence the idea that zero-discharge evapotranspirative wastewater treatment systems could be designed based on willows.

Currently evapotranspirative systems using willows can be found in all the Scandinavian countries, the Baltic countries, Poland, Ireland, England and there is some preliminary work done in France and Greece. Evapotranspirative wastewater treatment systems can be used where there is a deficit of water supply for plants with high evaporative capacity. Evapotranspirative systems can be designed so that the water loss from the systems is more than twice the potential evapotranspiration rate as calculated by meteorological parameters.

Brix, H., & Arias, C. A. (2011, November). Use of willows in evapotranspirative systems for onsite wastewater management—theory and experiences from Denmark. In *Proceedings International Workshop "STREPOW", February 23-24, 2011, Andrijevci-Novli Sad, Serbia* (pp. 15-29).



Bédard, L. et Brisson, J. 2025. LES MARAIS FILTRANTS. Fiches techniques de la Société québécoise de phytotechnologie. Université de Montréal et Société québécoise de phytotechnologie. 45 pages. [www.phytotechno.com](http://www.phytotechno.com).



Bédard, L. et Brisson, J. 2025. MARAIS FILTRANTS FLOTTANTS. Fiches techniques de la Société québécoise de phytotechnologie. Université de Montréal et Société québécoise de phytotechnologie. 22 pages. [www.phytotechno.com](http://www.phytotechno.com).

## 10.0 DROITS DE REPRODUCTION

### Comment citer :

Bédard, L. et Brisson, J. 2025. LES MARAIS FILTRANTS À EFFLUENT NUL. *Fiches techniques de la Société québécoise de phytotechnologie*. Université de Montréal et Société québécoise de phytotechnologie. 23 pages. [www.phytotechno.com](http://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 PHYTOTECNOLOGIE

3230, rue Sicotte, local E-300, ouest

Saint-Hyacinthe QC J2S 2M2

**PHYTOTECNO.COM**

**INFO@PHYTOTECNO.COM**

CRÉDIT PHOTO : PATRICK BOVIN



## 11.0 RÉFÉRENCES

- [1] Organisation for Economic Co-operation and Development [OECD]. (2011) *Environmental Outlook to 2050* (ch.3 & ch.5). OECD Publishing.
- [2] Abu-Taleb, M. F. (1999). Application of multicriteria analysis to the design of wastewater treatment in a nationally protected area. *Environmental Engineering and Policy*, 2, 37-46.
- [3] Kavanagh, P., & Bree, T. (2009). Water Framework Directive programme of measures : protection of high-status sites, forest, water and on-site wastewater-treatment systems. In *Biology and Environment : Proceedings of the Royal Irish Academy* (Vol. 109, No. 3, pp. 345-364). Royal Irish Academy.
- [4] Marthinsen, I., & Sørgård, T. (2002, March). Zero discharge philosophy : a joint project between Norwegian authorities and industry. In *SPE International Conference and Exhibition on Health, Safety, Environment, and Sustainability* (pp. SPE-74000). SPE.
- [5] Schellenberg, T., Subramanian, V., Ganeshan, G., Tompkins, D., & Pradeep, R. (2020). Wastewater discharge standards in the evolving context of urban sustainability—The case of India. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 30.
- [6] Brix, H., & Arias, C. A. (2011). Use of willows in evapotranspirative systems for onsite wastewater management—Theory and experiences from Denmark. In *Proceedings of the “STREPOW” International Workshop, Andrevlje-Novi Sad, Serbia* (pp. 23-24).
- [7] Ahirrao, S. (2014). Zero Liquid Discharge Solutions. *Industrial Wastewater Treatment, Recycling and Reuse*. Butterworth-Heinemann. 489–520.
- [8] Amutha, K. (2017). Sustainable chemical management and zero discharges. In *Sustainable fibres and textiles* (pp. 347-366). Woodhead Publishing.
- [9] Farahbod, F., Mowla, D., Nasr, M. J., & Soltanieh, M. (2012). Experimental study of forced circulation evaporator in zero discharge desalination process. *Desalination*, 285, 352-358.
- [10] Neilly, A., Jegatheesan, V., & Shu, L. (2009). Evaluating the potential for zero discharge from reverse osmosis desalination using integrated processes—A review. *Desalination and water treatment*, 11(1-3), 58-65.
- [11] Havelka, J., Fárová, H., Jiříček, T., Kotala, T., & Kroupa, J. (2019). Electro dialysis-based zero liquid discharge in industrial wastewater treatment. *Water Science and Technology*, 79(8), 1580-1586.
- [12] Zhong, W., Guo, L., Ji, C., Dong, G., & Li, S. (2021). Membrane distillation for zero liquid discharge during treatment of wastewater from the industry of traditional Chinese medicine : A review. *Environmental Chemistry Letters*, 19, 2317-2330.
- [13] Mickley, M. (2008). *Survey of high-recovery and zero liquid discharge technologies for water utilities*. WateReuse Foundation.
- [14] Yusuf, M. (Ed.). (2018). *Handbook of textile effluent remediation*. CRC Press.
- [15] Durham, B., & Mierzejewski, M. (2003). Water reuse and zero liquid discharge : a sustainable water resource solution. *Water Science and Technology : Water Supply*, 3(4), 97-103.
- [16] Heins, W., & Schooley, K. (2004). Achieving zero liquid discharge in SAGD heavy oil recovery. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 43(08).
- [17] Tong, T., & Elimelech, M. (2016). The global rise of zero liquid discharge for wastewater management : drivers, technologies, and future directions. *Environmental science & technology*, 50(13), 6846-6855.
- [18] Ma, H. P., Wang, H. L., Tian, C. C., Chang, Y. L., Yuan, W., Qi, Y. H.,... & Lv, W. J. (2021). An optimized design for zero liquid discharge from coal chemical industry : a case study in China. *Journal of Cleaner Production*, 319, 128572.
- [19] Vishnu, G., Palanisamy, S., & Joseph, K. (2008). Assessment of fieldscale zero liquid discharge treatment systems for recovery of water and salt from textile effluents. *Journal of Cleaner Production*, 16(10), 1081-1089.
- [20] Wang, J., Mahmood, Q., Qiu, J. P., Li, Y. S., Chang, Y. S., Chi, L. N., & Li, X. D. (2015). Zero discharge performance of an industrial pilot-scale plant treating palm oil mill effluent. *BioMed research international*.
- [21] Hasselgren, K. (1998). Use of municipal waste products in energy forestry : highlights from 15 years of experience. *Biomass and Bioenergy*, 15(1), 71-74.
- [22] Tzanakakis, V. E., Paranychianakis, N. V., & Angelakis, A. N. (2007). Performance of slow rate systems for treatment of domestic wastewater. *Water Science and technology*, 55(1-2), 139-147.

- [23] Halicki, W., & Kita, K. (2017). Implementation of improved wetland systems as a 'zero-discharge-technology' in Poland. *Water and Environment Journal*, 31(2), 168-175.
- [24] O'Hogain, S., McCarton, L., Reid, A., Turner, J., & Fox, S. (2011). A review of zero discharge wastewater treatment systems using reed willow bed combinations in Ireland. *Water Practice and Technology*, 6(3), wpt2011048.
- [25] Pulkkinen, J. T., Ronkanen, A. K., Pasanen, A., Kiani, S., Kiuru, T., Koskela, J.,... & Vielma, J. (2021). Start-up of a "zero-discharge" recirculating aquaculture system using woodchip denitrification, constructed wetland, and sand infiltration. *Aquacultural Engineering*, 93, 102161.
- [26] Khurelbaatar, G., Sullivan, C. M., Van Afferden, M., Rahman, K. Z., Fühner, C., Gerel, O.,... & Müller, R. A. (2017). Application of primary treated wastewater to short rotation coppice of willow and poplar in Mongolia : Influence of plants on treatment performance. *Ecological engineering*, 98, 82-90.
- [27] Arias, C., 2023. Onsite Treatment of Wastewater in Willow Systems. *PhD Course, Use of Wetlands in water pollution control 2023*. International school of aquatic sciences, Aarhus University.
- [28] Gregersen, P., & Brix, H. (2001). Zero-discharge of nutrients and water in a willow dominated constructed wetland. *Water Science and Technology*, 44(11-12), 407-412.
- [29] Nelson, M. (1995). *Conceptual design of zero discharge and safe discharge biological wastewater treatment systems using fast-growing wetland trees*. The University of Arizona.
- [30] Gregersen, P., Gabriel, S., Brix, H., & Faldager, I. (2003). Guidelines for Willow Systems up to 30 PE. *Økologisk Byfornyelse og Spildevandsrensning*, (25).
- [31] Ministry of Environment and Energy 2003a Guidelines for willow systems up to 30p.e. (in Danish). *Økologisk Byfornyelse og Spildevandsrensning* No 25.
- [32] Moreno, F., Lara-Borrero, J., Rojas, L., & Vera-Puerto, I. (2019). Analysis of *Salix humboldtiana* to be used as the plant species in evapotranspirative willow systems in Latin American highland climate conditions. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 54(13), 1302-1310.
- [33] Istenič, D., & Božič, G. (2021). Short-rotation willows as a wastewater treatment plant : Biomass production and the fate of macronutrients and metals. *Forests*, 12(5), 554.
- [34] Curneen, S., & Gill, L. W. (2016). Willow-based evapotranspiration systems for on-site wastewater effluent in areas of low permeability subsoils. *Ecological Engineering*, 92, 199-209.
- [35] Frédette, C., Comeau, Y., & Brisson, J. (2022). Design of a zero liquid discharge leachate treatment system using an evapotranspiration willow bed. *Water Research*, 209, 117950.
- [36] Bédard, L. et Brisson, J. 2025. LES MARAIS FILTRANTS. *Fiches techniques de la Société québécoise de phytotechnologie*. Université de Montréal et Société québécoise de phytotechnologie. 45 pages. [www.phytotechno.com](http://www.phytotechno.com).
- [37] Gill, L. W., O'lunaigh, N., Johnston, P. M., Misstear, B. D. R., & O'suilleabhain, C. (2009). Nutrient loading on subsoils from on-site wastewater effluent, comparing septic tank and secondary treatment systems. *Water Research*, 43(10), 2739-2749.
- [38] Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2008). *Treatment wetlands*. CRC press.
- [39] Frédette, C., Labrecque, M., Comeau, Y., & Brisson, J. (2019). Willows for environmental projects : A literature review of results on evapotranspiration rate and its driving factors across the genus *Salix*. *Journal of Environmental Management*, 246, 526-537.
- [40] Philippot, S. (1996). Simulation models of short-rotation forestry production and coppice biology. *Biomass and Bioenergy*, 11(2-3), 85-93.
- [41] Rytter, R. M., & Hansson, A. C. (1996). Seasonal amount, growth and depth distribution of fine roots in an irrigated and fertilized *Salix viminalis* L. plantation. *Biomass and Bioenergy*, 11(2-3), 129-137.
- [42] Dimitriou, I., & Aronsson, P. (2011). Wastewater and sewage sludge application to willows and poplars grown in lysimeters— Plant response and treatment efficiency. *Biomass and bioenergy*, 35(1), 161-170.
- [43] Aronsson, P., & Perttu, K. (2001). Willow vegetation filters for wastewater treatment and soil remediation combined with biomass production. *The forestry chronicle*, 77(2), 293-299.

- [44] Frédette, C., Comeau, Y., & Brisson, J. (2019). Ecophysiological responses of a willow cultivar (*Salix miyabeana* 'SX67') irrigated with treated wood leachate. *Water, Air, & Soil Pollution*, 230, 1-15.
- [45] Allen, R. G., (1998). Crop evapotranspiration : guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrig Drain*, 56, 147-151.
- [46] Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., & Von Sperling, M. (2017). *Treatment wetlands* (p. 172). IWA publishing.
- [47] Brix, H., & Arias, C. A. (2005). The use of vertical flow constructed wetlands for on-site treatment of domestic wastewater : New Danish guidelines. *Ecological engineering*, 25(5), 491-500.
- [48] Environnement et Changement climatique Canada. (2023). *Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement : Traitement des eaux usées municipales* (publication no ISBN : 978-0-660-48752-6). <https://www.canada.ca/content/dam/eccc/documents/pdf/cesindicators/municipal-wastewater-treatment/2023/traitement-eaux-usees-municipales-fr.pdf>





