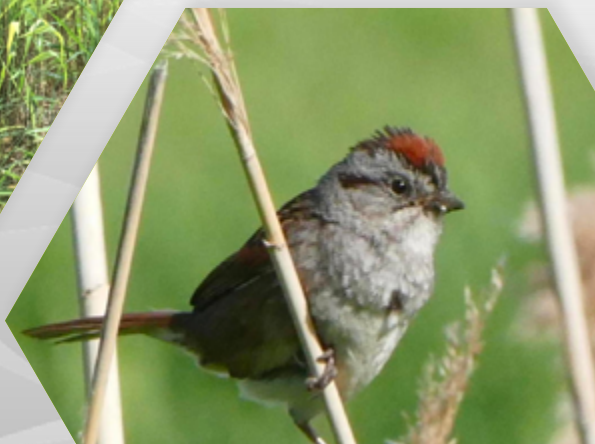


LES MARAIS FILTRANTS

FICHE TECHNIQUE

Mise à jour 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 Société québécoise de phytotechnologie (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 : Olivier Boucher-Carrier (SQP) et Patrick Benoist (SQP).

Remerciements : Nous souhaitons remercier Hugo Degroote, ingénieur spécialisé en environnement et traitement des eaux, pour sa contribution et son expertise technique. 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 et Laurianne Bédard.

Graphiste : Lysanne Devost.

Photos : Gilles Vincent, Jacques Brisson, Laurianne Bédard, Simon Amiot et Yves Poitevin.

Comment citer :

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.

SOCIÉTÉ QUÉBÉCOISE DE PHYTOTECHNOLOGIE

3230, rue Sicotte, local E-300, ouest

Saint-Hyacinthe QC J2S 2M2

PHYTOTECHNO.COM

INFO@PHYTOTECHNO.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.



TABLE DES MATIÈRES

1.0 INTRODUCTION	7
2.0 TYPE DE MARAIS FILTRANTS	8
2.1 Marais filtrant surfacique à flux horizontal	8
2.2 Marais filtrant sous-surfacique à flux horizontal	8
2.3 Marais filtrant sous-surfacique à flux vertical	8
2.4 Marais filtrants flottants	9
2.5 Marais filtrants à effluent nul	10
2.6 Marais filtrants hybrides	10
2.7 Sélection du type de marais filtrant	11
3.0 MÉCANISMES D'ENLÈVEMENT DES POLLUANTS	14
3.1 Principaux processus d'enlèvement	14
3.2 Enlèvement des principaux polluants en marais filtrant	15
4.0 VÉGÉTAUX	20
4.1 Types de végétaux utilisés	20
4.2 Caractéristiques végétales recherchées	22
5.0 MARAIS FILTRANT SURFACIQUE À FLUX HORIZONTAL	26
5.1 Enceinte	26
5.2 Substrat	26
5.3 Végétaux	27
5.4 Hydraulique	27
5.5 Dimensionnement	27
5.6 Performances	28
5.7 Problèmes courants	28
5.8 Opération et entretien	28
5.9 Bénéfices et limites	28
6.0 MARAIS FILTRANT SOUS-SURFACIQUE À FLUX HORIZONTAL	29
6.1 Enceinte	29
6.2 Substrat	29
6.3 Végétaux	29
6.4 Hydraulique	30
6.5 Dimensionnement	30
6.6 Performances	30
6.7 Problèmes courants	30
6.8 Opération et entretien	31
6.9 Bénéfices et limites	31



PHOTO JACQUES BRISSON

7.0 MARAIS FILTRANT SOUS-SURFACIQUE À ÉCOULEMENT VERTICAL	32
7.1 Enceinte	32
7.2 Substrat	33
7.3 Végétaux	33
7.4 Hydraulique	33
7.5 Dimensionnement	34
7.6 Performances	34
7.7 Problèmes courants	34
7.8 Opération et entretien	35
7.9 Bénéfices et limites	35
8.0 MODIFICATIONS SUPPLÉMENTAIRES	36
8.1 Aération forcée	36
8.2 Recirculation	36
8.3 Étapes additionnelles ciblant le phosphore	36
9.0 MARAIS FILTRANTS AU QUÉBEC : ÉTAT DES LIEUX	37
9.1 Traitement de l'eau usée domestique	37
9.2 Obstacles au développement des marais filtrants au Québec	37
9.3 Pourquoi rester optimiste?	38
10.0 EXEMPLES DE MARAIS FILTRANTS EXISTANTS	39
10.1 Marais sous surfacique à écoulement horizontal : Auberge Le baluchon	39
10.2 Marais sous-surfacique à flux vertical : Saint-Roch-de-l'Achigan	40
10.3 Marais hybride : La Biosphère de Montréal	41
10.4 Bassin filtrant : K8	41
11.0 OUTILS EN LIGNE, GUIDES ET RESSOURCES	43
12.0 DROITS DE REPRODUCTION	45
13.0 RÉFÉRENCES	46



PHOTO/JACQUES BRISSON

PRÉAMBULE

Le rejet des eaux usées dans l'environnement est la source principale de pollution des eaux au Canada. Ces eaux usées proviennent notamment des résidences, des entreprises, des industries, des milieux agricoles et des eaux de ruissellement. Bien que la majorité des municipalités exploitent des systèmes de traitement des eaux [1], le traitement est parfois incomplet et ces systèmes sont souvent énergivores et coûteux en termes d'implantation, d'opération et d'entretien. Les secteurs décentralisés doivent souvent traiter leurs eaux usées avec des systèmes adaptés à leurs besoins spécifiques (fosses septiques, champs d'épuration, etc.), qui peuvent s'accompagner de leurs enjeux particuliers. L'usage de marais filtrants pour le traitement des eaux usées peut représenter une alternative intéressante. Ils sont peu énergivores, peu coûteux au niveau de l'opération et de l'entretien, demandent peu d'expertise pour la maintenance, tolèrent des débits élevés, peuvent être construits avec des matériaux locaux, en plus d'être particulièrement bien adaptés aux secteurs décentralisés [2].

La présente fiche technique traite des grandes généralités entourant le fonctionnement types de marais filtrants les plus communément utilisés. Quoiqu'abordés brièvement, les marais filtrants à effluent nul ainsi que les types de marais filtrants traitant des sources d'eaux usées non ponctuelles (c.-à-d., les marais flottants, les marais en milieux agricoles, etc.) ne sont pas détaillés ici, mais le sont dans leur propre fiche technique.



I.0 INTRODUCTION

Les « marais filtrants » (*treatment wetlands* ou *constructed wetlands*) sont des écosystèmes artificiels conçus pour traiter les eaux usées en exploitant les processus naturels de filtration et de biodégradation des eaux. Depuis les premiers essais au début des années 1950 [3], leur utilisation pour le traitement des eaux usées s'est rapidement répandue à travers le monde. Cette phytotechnologie est simple d'opération, bien qu'impliquant des processus physiques, chimiques et biologiques résultant d'interactions complexes entre l'eau, le sol, les végétaux, les microorganismes et l'atmosphère [2].

L'usage de marais filtrants permet de traiter les eaux usées domestiques [4]. Ils peuvent également optimiser les chaînes de traitement des eaux industrielles, des rejets des infrastructures de bétail [5], des eaux agricoles [6], de piscicultures [7] et des eaux du ruissellement routier [8], permettant d'améliorer la qualité d'un large éventail d'eaux usées.



2.0 TYPE DE MARAIS FILTRANTS

Composantes générales

En général, un marais filtrant est constitué :

- d'une enceinte imperméable;
- d'un substrat;
- de végétaux flottants ou enracinés;
- d'un système d'apport des eaux usées;
- d'un système d'évacuation des eaux traitées.

Il existe plusieurs types de marais filtrants, classés selon le type d'écoulement (en surface ou sous surfacique), selon le sens de l'écoulement (horizontal ou vertical) ou selon certaines particularités qui rendent la configuration du système unique (alimentation intermittente, sans effluent, flottabilité, etc.) [2].

2.1 MARAIS FILTRANT SURFACIQUE À FLUX HORIZONTAL

Ce type de marais filtrant (Fig. 1A-B) est nommé surfacique à flux horizontal (*free water surface flow*), puisque l'eau se trouve principalement au-dessus de la surface du sol et que l'eau circule en continu et horizontalement dans le système [2]. Il peut être colonisé par des plantes flottantes ou enracinées et se prête bien au traitement tertiaire (voir section 2.7) des eaux usées domestiques en milieu tropical ou semi-tropical. Peu adapté aux conditions hivernales québécoises à cause du gel, ce type de marais filtrant convient toutefois bien au traitement d'eaux usées saisonnières, comme les eaux de drainage agricole [9], les lixiviats miniers [10] ou de décharge [11] et comme traitement tertiaire d'eaux usées domestiques d'établissements saisonniers (chalets, campings, etc.).

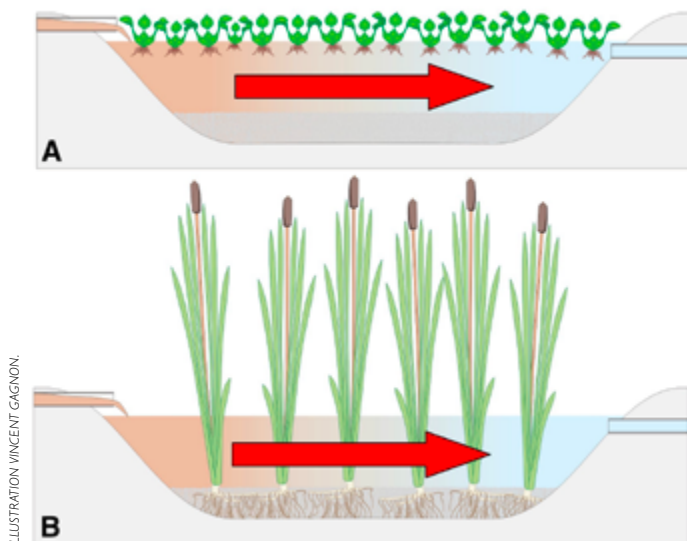


Figure 1 – Vue en coupe d'un marais surfacique à flux horizontal **A** – à plantes flottantes, **B** – à plantes émergentes enracinées.

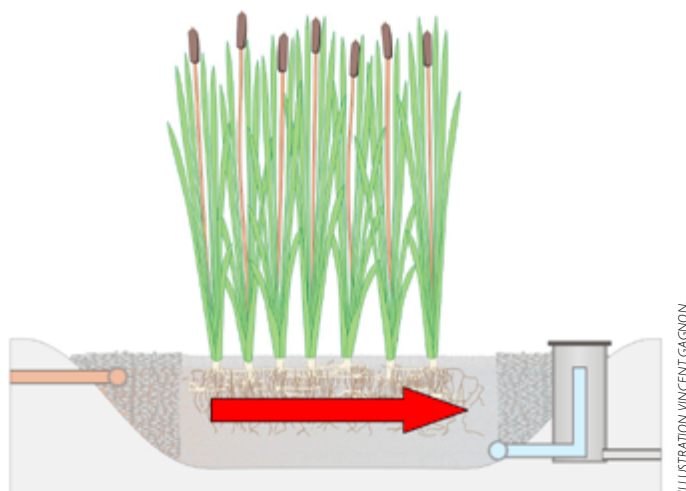


Figure 2 – Vue en coupe d'un marais sous-surfacique à flux horizontal.

2.2 MARAIS FILTRANT SOUS-SURFACIQUE À FLUX HORIZONTAL

Ce type de marais filtrant (Fig. 2) est dit sous-surfacique à flux horizontal (*horizontal subsurface-flow*) puisqu'ici, l'eau qui circule en continu est maintenue sous la surface au travers du substrat, et donc non directement visible. Elle est aussi protégée du gel hivernal par l'accumulation de neige et le couvert végétal, de sorte que les marais filtrants sous-surfaciques à flux horizontal sont particulièrement bien adaptés aux régions à climat continental froid et humide, comme le Québec. Ces marais filtrants effectuent le traitement secondaire et tertiaire (voir section 2.7) des eaux usées domestiques ou municipales, mais peuvent aussi traiter divers types d'eaux [12], comme les eaux usées de pétrochimie [13], de distillerie [14], de l'élevage de porcs [15] et les eaux de ruissellement routières [16].

2.3 MARAIS FILTRANT SOUS-SURFACIQUE À FLUX VERTICAL

Ce type de marais filtrant (Fig. 3) est nommé sous-surfacique à flux vertical (*vertical subsurface-flow*) car l'écoulement de l'eau se fait verticalement. Dans cette fiche, ne sont traités que les marais verticaux à écoulement descendant. Contrairement aux deux autres types de marais, l'alimentation s'effectue ici par intermittence (dit « par bâchée »). Au moment de l'alimentation, l'affluent inonde la surface du bassin, pour ensuite percoler lentement à travers la matrice granulaire et être évacué par le fond. Le milieu n'est donc pas saturé en permanence et le transport de l'eau usée se fait par infiltration, à travers le substrat et les racines des plantes [2]. L'eau usée est majoritairement sous la surface d'où l'attribut sous-surfacique, mais elle est distribuée au-dessus du niveau du sol lors de l'alimentation. Lors de cette alimentation, un volume (une bâchée) correspondant à une certaine hauteur d'eau définie (appelée lame d'eau) est envoyé sur l'ensemble de sa surface à un fort débit pour bâtir cette hauteur d'eau et s'assurer d'une distribution uniforme à la surface. Cette configuration rend son opération un peu plus complexe, mais elle maximise

l'oxygénation du milieu, favorisant ainsi plusieurs processus de transformation microbienne. Ces marais sont efficaces pour le traitement secondaire et tertiaire (voir section 2.7) pouvant traiter les eaux usées domestiques et municipales, mais épurent aussi une variété de types d'eaux usées, telles que les eaux de ruissellement des aéroports [17], de ruissellement agricole [18] et de raffineries [19]. Il existe une variante qui est configurée pour assurer le traitement primaire en recevant directement les eaux usées brutes après dégrillage (voir section 2.6). Une configuration similaire peut servir de lit de séchage planté pour minéraliser et réduire le volume des boues d'épuration. Pour plus de détails, vous pouvez consulter la fiche technique sur les lits de séchage plantés de macrophytes de la SQP [20].

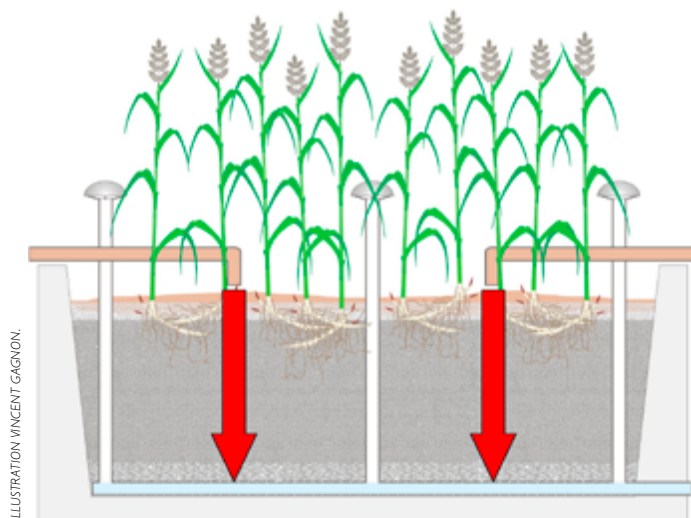


Figure 3 – Vue en coupe d'un marais sous-surfacique à flux vertical.

2.4 MARAIS FILTRANTS FLOTTANTS

Les marais filtrants flottants (*floating treatment wetland*) sont des plateformes flottantes plantées de végétaux aquatiques et généralement ancrées sur un plan d'eau (Fig. 4). Ces îles flottantes sont composées de matériaux légers, comme des tuyaux de plastique, des feuillets de polyesters ou des bambous maillés et portent parfois un substrat de plantation composé de tourbe. Sur ces plateformes artificielles, les racines des végétaux traversent le substrat et sont en suspension dans l'eau sous le marais flottant [21], offrant une surface idéale pour la croissance de micro-organismes bénéfiques qui contribuent à la dégradation des contaminants présents dans l'eau. Ce type de marais filtrant s'adapte aux grandes variations de débit de divers plans d'eau [22]. Ils sont particulièrement bien adaptés pour traiter les eaux des étangs ou des lacs pollués, les eaux pluviales [23], les eaux souterraines contaminées acheminées en surface [24] et pour contrôler l'hypertrophisation [25]. Pour plus de détails, vous pouvez consulter la fiche technique sur les marais filtrants flottants de la SQP [26].



Figure 4 – Vue en coupe d'un marais flottant.

2.5 MARAIS FILTRANTS À EFFLUENT NUL

Ce type de marais filtrant (Fig 5.) est dit à effluent nul (*zero discharge wetland*) puisqu'il n'y a aucune sortie d'eau. L'eau traitée est en effet totalement éliminée par évapotranspiration via les végétaux présents dans le marais, et ce, tout au long de la saison de croissance. L'écoulement de l'eau se fait sous la surface et le milieu est saturé à des niveaux variables. Les plantes utilisées sont nécessairement des plantes possédant un fort pouvoir d'évapotranspiration, ce pour quoi les saules sont souvent utilisés dans ce type de système [27]. Ces marais effectuent le traitement secondaire et tertiaire (voir section 2.7) des eaux usées domestiques et municipales [28], mais aussi le lixiviat de décharge [29], etc. Pour plus de détails, vous pouvez consulter la fiche technique sur les marais filtrants à effluent nul de la SQP [30].

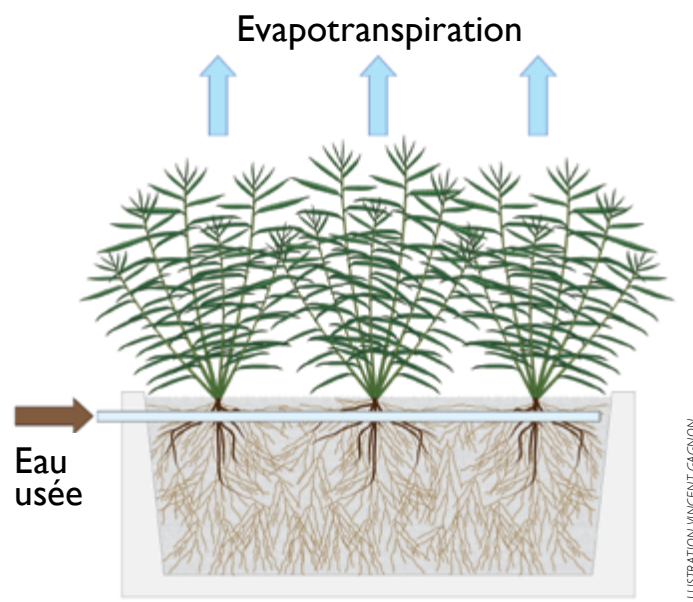


Figure 5 – Vue en coupe d'un marais à effluent nul. Illustration.

2.6 MARAIS FILTRANTS HYBRIDES

Les marais filtrants hybrides (*hybrid treatment wetland*) sont composés de plusieurs marais filtrants en série (Fig. 6). Cet agencement a pour but de combiner les forces et les avantages des différents marais utilisés [12]. Par exemple, on peut utiliser un marais filtrant sous-surfacique à flux vertical, suivi d'un marais filtrant sous surfacique à flux horizontal. Ainsi, on tire avantage de la complémentarité des deux types de marais permettant l'élimination des composés carbonés et azotés : un milieu aérobique, suivi d'un milieu anoxique permettant également la dénitrification dans une certaine mesure. Un système hybride très populaire et communément utilisé en Europe est le « système français » (*french vertical flow wetland*). La particularité de ce système réside dans le fait que ce sont des eaux usées domestiques brutes qui sont traitées, où un prétraitement est effectué à l'aide d'une grille pour enlever les gros débris. L'eau usée brute dégrillée est appliquée

directement sur un premier marais filtrant sous-surfacique à flux vertical planté de roseaux communs (*Phragmites australis* subsp. *australis*), où les boues s'accumulent et se minéralisent à la surface du lit. L'eau qui en sort est ensuite acheminée vers un second marais filtrant sous-surfacique à flux horizontal standard pour un traitement secondaire.

2.7 SÉLECTION DU TYPE DE MARAIS FILTRANT

La sélection du type de marais filtrant dépend du type de traitement requis, des polluants ciblés et des bénéfices et des limites de chacun (voir sections 5, 6 et 7). En règle générale, le marais surfacique est adéquat pour des eaux peu chargées, incluant le traitement tertiaire des eaux usées domestiques. Les marais filtrants sous-surfaciques à flux horizontal ou à flux vertical sont quant à eux plus appropriés pour le traitement secondaire et tertiaire des eaux usées domestiques.

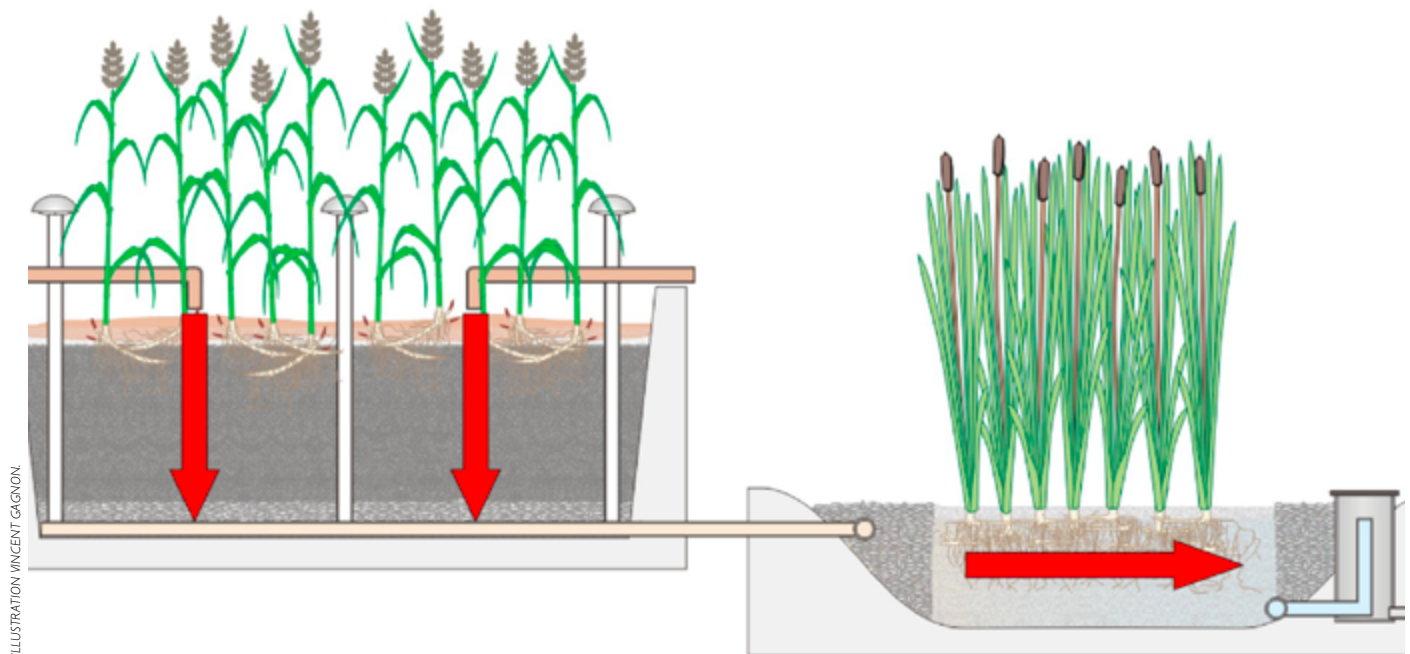


Figure 6 — Vue en coupe d'un marais hybride; marais sous-surfacique à flux vertical combiné à un marais sous-surfacique à flux horizontal.

ÉTAPES GÉNÉRALES DE L'ASSAINISSEMENT DE L'EAU

LE PRÉTRAITEMENT

Cette phase consiste à éliminer les déchets solides de plus grosse taille à l'aide de grilles, de dessableurs ou de tamis. Le prétraitement est souvent essentiel, non seulement pour améliorer la qualité de l'eau, mais aussi pour protéger les équipements et la machinerie utilisée ultérieurement, en plus de réduire les risques de colmatage.

LE TRAITEMENT PRIMAIRE

Le traitement primaire est l'enlèvement des particules en suspension et d'une partie de la matière organique décanable. Cette étape est principalement effectuée par sédimentation et/ou par l'enlèvement du surnageant (c.-à-d., couche flottante distincte). Une fosse septique représente un exemple de traitement primaire.

TRAITEMENT SECONDAIRE

Le traitement secondaire est l'enlèvement de certains polluants dissous et de la matière organique. Cette phase est effectuée à l'aide de processus physiques, chimiques et biologiques, où les communautés microbiennes « consomment » les polluants dissous.

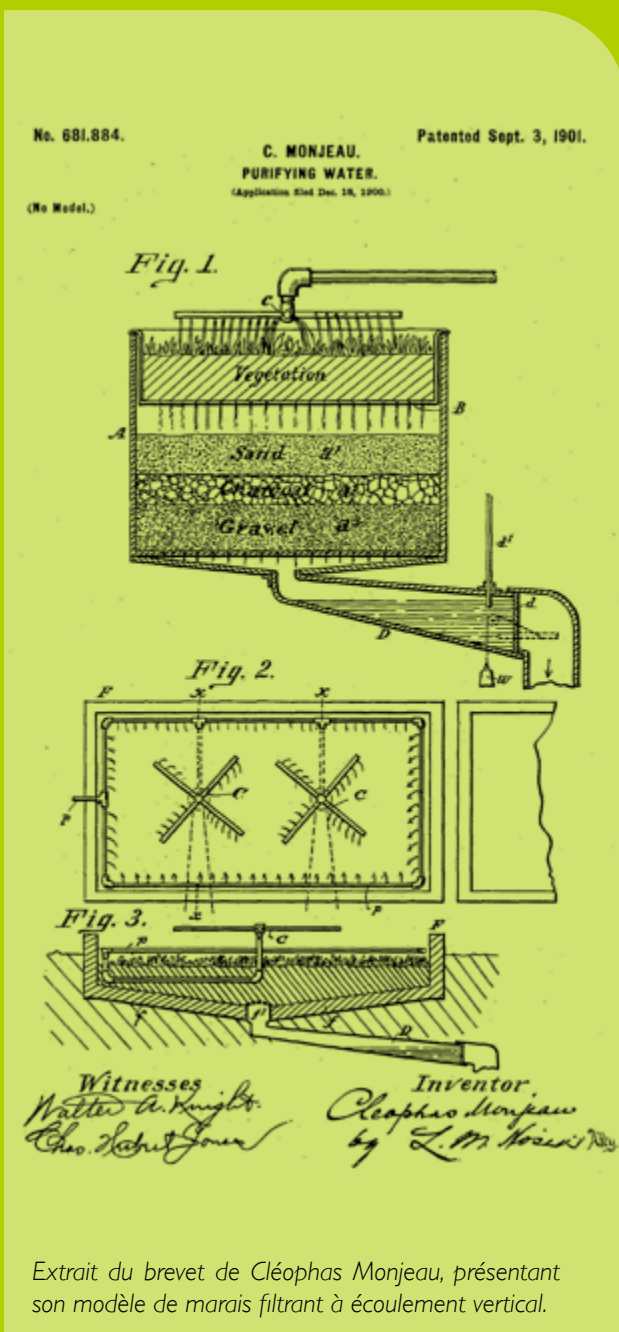
TRAITEMENT TERTIAIRE

Le traitement tertiaire est souvent considéré comme une étape de polissage et représente l'enlèvement supplémentaire des pathogènes et des nutriments, notamment l'azote et le phosphore, non éliminés par le traitement secondaire [1].

LES MARAIS FILTRANTS : UNE INVENTION QUÉBÉCOISE?

C'est à une équipe de chercheurs allemands œuvrant dans les années 1950 qu'on attribue généralement les premiers essais de marais filtrants artificiels pour le traitement des eaux. Mais en sont-ils bien les inventeurs? La découverte récente d'un brevet datant de 1901 en fait douter puisque ce document décrit un marais filtrant artificiel de facture très moderne. Ce brevet déposé aux États-Unis décrit un système de marais à écoulement vertical sophistiqué, qu'on croyait avoir été inventé dans les années 1990.

Plus surprenant encore, le signataire de ce brevet est un inventeur québécois, Cléophas Monjeau, né en 1839 à Saint-Jean-Baptiste-de-Rouville, près de Montréal. À l'âge de 16 ans, il déménage aux États-Unis où il acquiert la nationalité américaine. À la suite d'études en théologie, il est ordonné pasteur baptiste et œuvre au sein de diverses églises pendant une quinzaine d'années. Puis, il amorce une nouvelle carrière comme inventeur et dépose plusieurs brevets, dont le brevet # 681884 où il décrit un marais filtrant. On ne sait pas toutefois pas si ce brevet a mené à la construction d'un marais, mais, de toute évidence, l'invention de ce visionnaire québécois était tombée dans l'oubli!



3.0 MÉCANISMES D'ENLÈVEMENT DES POLLUANTS

3.1 PRINCIPAUX PROCESSUS D'ENLÈVEMENT

La dégradation et la rétention des polluants dans un marais filtrant impliquent des processus physiques, chimiques et biologiques complexes qui varient selon le type de polluant. Il est donc important de bien les connaître afin d'optimiser l'efficacité du système et d'atteindre les cibles d'épuration visées.

3.1.1 PROCESSUS PHYSIQUES

La dégradation dite physique des polluants au sein des marais filtrants comprend principalement les processus de filtration, de sédimentation et d'adsorption physique. La filtration a lieu grâce au substrat et aux systèmes racinaires (rhizofiltration), qui font office de filtres et qui retiennent les particules en suspension, ce qui engendre une eau moins chargée en solides non dissous. La sédimentation, quant à elle, est un processus où les particules en suspension dans l'eau calme descendent lentement par gravité vers le fond du bassin [2]. Les cavités et la composition du substrat peuvent aussi interagir avec certains polluants, entraînant ainsi leur adsorption physique via des forces intermoléculaires (forces de Van der Waals, polarité, etc. [31, 32]).

3.1.2 PROCESSUS CHIMIQUES

Les principaux processus chimiques d'enlèvement des polluants en marais filtrants sont l'adsorption, la précipitation et la photolyse. L'adsorption chimique est le mécanisme par lequel certains solides ou ions sont retenus à la surface du substrat, du biofilm ou même de l'enceinte du bassin, mais cette fois-ci via des liaisons chimiques fortes. La précipitation a lieu lorsque deux composés solubles réagissent ensemble pour générer un complexe peu ou non soluble qui va alors précipiter et sédimenter dans le fond du marais. La photolyse, qui peut survenir lorsque l'eau usée est exposée à la lumière, consiste en la dégradation de certains contaminants par l'action des rayons ultra-violet. Elle peut donc être un processus d'enlèvement important dans les marais filtrants surfaciques où l'eau est exposée aux rayons du soleil [2].

3.1.3 PROCESSUS BIOLOGIQUES

Parmi les processus d'enlèvement biologiques, la bioaccumulation par les plantes et la biodégradation par les microorganismes sont les plus importants. La bioaccumulation s'accomplit lorsque les polluants organiques ou inorganiques sont accumulés dans les tissus des végétaux. Selon la nature du contaminant, ils peuvent soit être accumulés dans le système racinaire, dans les parties aériennes, ou même être évacués dans l'atmosphère lors de la transpiration par la plante (phyto-volatilisation). La biodégradation (ou altération) de certains composés par les microorganismes est le mécanisme prépondérant d'enlèvement pour épurer les eaux usées dans les marais filtrants. C'est un processus très complexe qui varie en fonction des microorganismes présents, du type de polluant et des conditions ambiantes (pH, oxygène dissous, etc.) [2]. De fait, ces microorganismes, présents dans l'eau, le substrat et la rhizosphère, permettent de dégrader divers polluants organiques et inorganiques en composés souvent moins toxiques, plus petits et plus facilement assimilables. Une fois absorbés par les microorganismes, la biodégradation se poursuit via des processus de respiration et de fermentation, produisant *in fine* des substances encore plus simples et généralement peu ou pas toxiques [34, 35]. La présence des plantes permet de soutenir et d'augmenter l'abondance et la diversité de ces communautés microbiennes, et ce, grâce à l'excrétion d'une variété de composés par les racines dans leur environnement proche (rhizosphère), appelés exsudats extracellulaires (sucres, acides aminés et organiques, enzymes, flavonoïdes, etc.), qui leur sert de nourriture (phytostimulation).

QU'EST-CE QU'UN BIOFILM?

Le biofilm est un amas de microorganismes (bactéries, microchampignons, microalgues, protozoaires, etc.) entouré d'une couche protectrice sécrétée par certaines bactéries présentes naturellement dans le milieu. Dans les marais filtrants, le biofilm prend la forme d'une mince couche qui adhère à la surface du substrat, de la rhizosphère et sur l'enceinte du bassin. Il fournit une protection et un environnement favorable à l'activité des divers microorganismes présents, et permet une cohabitation de plusieurs espèces de métabolisme différent [33].

3.2 ENLÈVEMENT DES PRINCIPAUX POLLUANTS EN MARAIS FILTRANT

Les contaminants présents dans l'eau usée dépendent fortement du type d'eau à traiter (domestique, agricole, laitière, industrielle, etc.). Dans cette prochaine section, les principaux polluants couramment trouvés dans les eaux usées et visés par des performances réglementaires sont abordés, ainsi que les processus d'enlèvement associés les plus communs.

3.2.1 MATIÈRE EN SUSPENSION (MES)

La matière en suspension (MES) désigne les particules de taille supérieure à 1,5 µm, de nature organique ou minérale, qui se retrouvent en suspension dans l'eau. Ces particules ne sont pas dissoutes et contribuent à l'apparence trouble de l'eau. Les MES sont, par exemple, les déchets organiques provenant de l'eau usée, des parties du biofilm qui se détachent, des débris de végétaux, particules inorganiques, etc. [2].

Processus d'enlèvement : L'enlèvement de la matière en suspension s'effectue principalement par décantation et/ou filtration à travers le substrat et la rhizosphère. L'adsorption sur le biofilm de certains composés plus petits, légers et/ou ionisés peut aussi se produire [36]. Avec le temps, les MES vont ainsi s'accumuler dans le marais ou être décomposées en particules dissoutes et être alors éliminées par des processus chimiques et biologiques.

3.2.2 MATIÈRE ORGANIQUE (MO)

La matière organique (MO) est toute matière essentiellement constituée de composés carbonés provenant d'organismes vivants. Les plus gros amas peuvent être en suspension dans l'eau et être considérés par le fait même des MES, alors que les plus petits constituants forment de la matière organique dissoute. La MO peut être, par exemple des déchets organiques dissous, des protéines ou glucides de nature végétale ou animale, etc. [2].

Processus d'enlèvement : L'enlèvement de la MO s'effectue principalement par la dégradation biologique. Pour les microorganismes, la MO est une source de nourriture et d'énergie [2]. De façon générale, en présence d'oxygène, elle est dégradée par des bactéries aérobies, via la respiration, en composés plus simples : éléments nutritifs, eau et dioxyde de carbone. En milieux anoxiques, sa dégradation est effectuée moins efficacement par d'autres types de bactéries. Par exemple, les bactéries sulfatoréductrices, qui utilisent du sulfate plutôt que de l'oxygène pour dégrader la MO, rejettent du sulfure comme produit final en plus de l'eau et du dioxyde de carbone (Fig. 7A-B) [37]. Outre que la dégradation bactérienne, la MO peut aussi être dégradée par photodégradation, par volatilisation, et peut même être directement adsorbée sur le biofilm [2].

COMMENT MESURER LA MATIÈRE ORGANIQUE DANS L'EAU?

La teneur en matière organique dans l'eau est communément mesurée via la demande biochimique en oxygène - DBO₅ (biochemical oxygen demand). La DBO₅ est la quantité d'oxygène dissous nécessaire pour décomposer la matière organique de l'eau, par l'action des microorganismes, exprimée en mg/L. La norme est d'effectuer cette analyse à 20 °C durant 5 jours, d'où le «5» dans l'acronyme. La demande biochimique en oxygène est un outil universel important qui permet de surveiller la qualité de l'eau [2].

Toutefois, les microorganismes ne peuvent dégrader qu'une partie de la matière organique, excluant par exemple les matières

humiques. Pour avoir une vue d'ensemble plus précise sur la quantité de matière organique présente dans l'eau, la demande chimique en oxygène - DCO (chemical oxygen demand) peut ainsi être utilisée. La DCO mesure l'oxydation totale de la matière organique, qu'elle soit biodégradable ou non. Elle inclut donc la mesure de la DBO, mais aussi la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder chimiquement le reste de la matière organique présente. La DCO est souvent utilisée comme indicateur global de pollution organique et permet de déterminer la charge en polluants organiques chimiques dans les eaux usées, notamment pour les effluents domestiques et industriels.

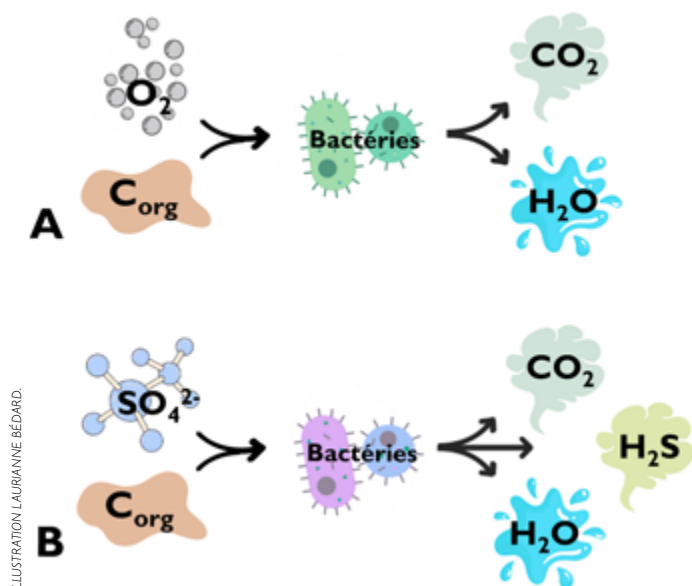


Figure 7 — Processus d'enlèvement de la matière organique (C_{org}) **A** — en présence d'oxygène ou **B** — en milieu anoxique.

3.2.3 AZOTE

L'azote contenu dans l'eau usée peut provenir des déchets organiques domestiques, des matières fécales, des détergents, des activités agricoles, etc. Il s'y retrouve donc intégré à des molécules organiques (protéines, acides aminés, peptides, etc.) ou hydrolysé sous forme d'ions inorganiques (ammonium NH_4^+). L'ammonium, par l'action des microorganismes, se retrouve ensuite nitrifié sous forme de nitrites (NO_2^-), puis en nitrates (NO_3^-). Ces dernières peuvent être très nuisibles pour l'environnement en engendrant, notamment, la prolifération d'algues et ainsi accélérer l'eutrophisation des plans d'eau. Le nitrate peut ensuite être transformé en azote gazeux (N_2), qui est alors évacué du système. L'azote total (TN), soit la quantité totale de ces molécules azotées organiques et inorganiques, est donc l'un des principaux polluants à traiter en marais filtrants pour améliorer la qualité de l'eau rejetée [2].

Processus d'enlèvement : L'enlèvement de l'azote est surtout régi par les microorganismes dans un processus de transformation d'une forme d'azote en une autre forme jusqu'à son élimination ultime en azote gazeux. La principale chaîne de transformation peut être synthétisée en trois

étapes : l'ammonification, la nitrification et la dénitrification (Fig. 8). Lors de l'ammonification, qui se produit principalement en milieu aérobie, des bactéries « ammonifiantes » décomposent des molécules organiques contenant de l'azote, et libèrent cet azote dans l'eau sous forme d'ammonium (NH_4^+) [38]. La nitrification est l'oxydation de l'ammonium en nitrate (NO_3^-). Pour ce faire, les microorganismes aérobies transforment d'abord l'ammonium en nitrite (NO_2^-), produit secondaire, pour ensuite être oxydé en nitrate [2]. Finalement, pour que l'azote soit réellement éliminé du système, la dénitrification est indispensable. Cette dernière étape consiste à la transformation des nitrates en azote gazeux (N_2) qui est libéré dans l'atmosphère. Pour réaliser cette étape, les bactéries dénitrifiantes doivent agir en milieu anoxique, en plus d'exiger du carbone organique comme source d'électron [36]. Parce que la nitrification et la dénitrification exigent des conditions opposées (aérobies et anoxiques), elles ont en général lieu dans des sections différentes du marais. Aussi, la chaîne de réaction complète est interrompue lorsque les conditions optimales ne sont pas remplies pour chacune des étapes. Par exemple, dans un marais où il y a carence en oxygène, la nitrification est déficiente et l'ammonium qui s'accumule est rejeté dans l'eau à la sortie. Au contraire, dans un marais qui n'a pas de zone anoxique ou dont la source de carbone est épuisée, la dénitrification est insuffisante et le marais rejette du nitrate en excès.

Outre les transformations de nature bactérienne, l'azote peut aussi être éliminé par adsorption sur le biofilm du substrat et de l'enceinte et via l'absorption par les végétaux, mais la contribution de ces processus demeure en général limitée. L'ammonium est un cation qui est facilement adsorbé sur les particules et le substrat, mais ce processus arrive rapidement à saturation dû à l'indisponibilité des sites d'adsorption [38]. Les végétaux absorbent l'ammonium et le nitrate pour leur besoin en azote, et cet azote est accumulé et entreposé dans les parties aériennes et souterraines. En général, la quantité d'azote ainsi retirée est relativement faible en comparaison à l'azote apporté par l'eau usée. D'autre part, pour que l'azote bioaccumulé soit retiré du système, les plantes doivent être récoltées au bon moment (en général, ne concerne que la partie aérienne) [36]. Par conséquent, la contribution des plantes à l'enlèvement de l'azote total par absorption est généralement faible comparativement aux processus bactériens de transformation.

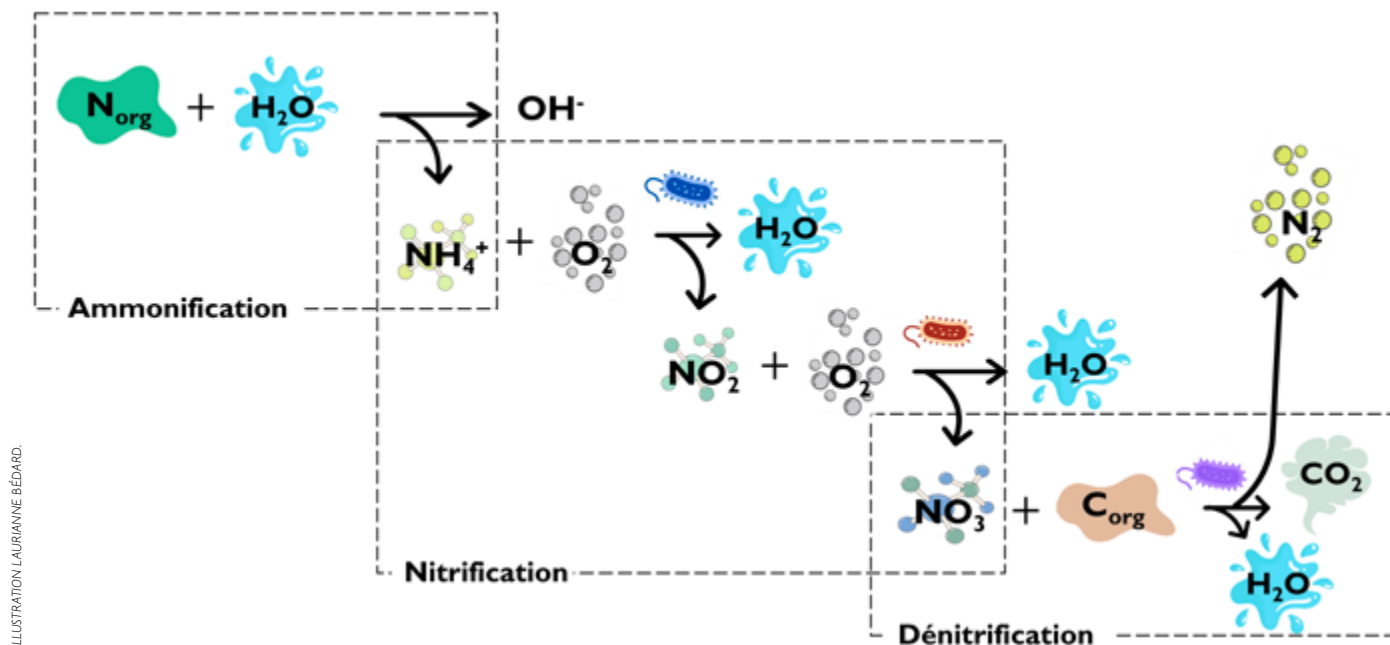


Figure 8 – Processus d'enlèvement principal de l'azote en marais filtrant : ammonification, nitrification des nitrites, nitrifications des nitrates et dénitrification.

3.2.4 PHOSPHORE

Les composés phosphorés entrent dans les marais filtrants principalement sous forme de phosphore organique ou d'ions solubles. L'activité agricole et les détergents sont des sources de phosphore dissous, dont la principale forme est l'ion orthophosphate (PO_4^{3-}) [36]. Le phosphore organique est d'origine biologique ou synthétique et provient des débris végétaux, des matières fécales, des rejets industriels, des fertilisants, des détergents, etc. En marais filtrant, le phosphore organique est majoritairement converti en orthophosphates lors de la dégradation de la matière organique. Similairement à l'azote, les orthophosphates sont responsables de la prolifération des algues et donc de l'eutrophisation des cours d'eau lorsque libérés dans l'environnement. Le phosphore est d'ailleurs souvent considéré comme le nutriment limitant dans l'eutrophisation, puisqu'aucune forme gazeuse extérieure au milieu ne peut en apporter, contrairement à l'oxygène et l'azote.

Processus d'enlèvement : Les processus d'enlèvement du phosphore en marais filtrant comprennent la précipitation chimique, l'absorption végétale et microbienne et l'adsorption [36]. La précipitation chimique se produit lorsque certains cations se lient aux orthophosphates et créent des précipités, notamment l'apatite ou l'hydroxyle-apatite. Le phosphore peut aussi co-précipiter avec d'autres minéraux, tels que les minéraux carbonatés, ferriques et les composés comportant de l'aluminium. Les plus utilisés sont les sels d'alun [38]. La décantation a lieu lorsque les complexes à bases de phosphore ainsi formés sont suffisamment lourds pour descendre au fond du bassin. Similairement aux composés

azotés, les composés phosphorés sont aussi assimilés par les végétaux, mais en moins grande proportion. Étant un nutriment essentiel pour leur maintien et leur croissance, les plantes peuvent l'absorber et ainsi réduire sa concentration dans l'eau. Certaines bactéries peuvent aussi l'utiliser pour leur métabolisme. Cependant, c'est l'adsorption qui est le mécanisme d'enlèvement prépondérant en marais filtrant, bien que souvent marginal. Les composés phosphorés s'agglomèrent en grande majorité sur les éléments du substrat et les biofilms présents. Le phosphore n'est ainsi pas réellement éliminé, mais plutôt emmagasiné dans le marais. Avec le temps, la capacité du substrat à retenir le phosphore diminue à mesure qu'il devient saturé [36]. L'efficacité des marais filtrants pour l'enlèvement du phosphore est donc limitée ou éphémère. Quelques solutions pour améliorer l'enlèvement du phosphore sont proposées dans la section 8.3.

3.2.5 MÉTAUX LOURDS

Les métaux lourds incluent les éléments métalliques du tableau périodique et des alliages considérablement plus denses que l'eau, incluant aussi les métalloïdes [40]. Ils sont généralement en faible concentration dans les eaux domestiques, mais peuvent être abondants dans certains effluents industriels et miniers. Les métaux lourds, comme l'arsenic, le zinc, le plomb, le cadmium et le cuivre, peuvent être très toxiques pour les organismes vivants. Lorsque relâchés, ils s'accumulent et persistent dans l'environnement, augmentant ainsi constamment la toxicité dans les milieux récepteurs [41].

Processus d'enlèvement : Les processus d'enlèvements des métaux lourds incluent la précipitation, l'adsorption ainsi que l'assimilation par les végétaux. La précipitation des métaux lourds survient lorsqu'ils réagissent avec certaines substances chimiques pour former des composés insolubles qui peuvent alors décanter, parfois facilitée par l'action des microorganismes (Fig. 9). Le type de métabolite insoluble engendré (ex., oxydes de fer hydratés, sulfure de cuivre, etc.) varie en fonction des conditions du milieu [42]. Les végétaux peuvent aussi bioaccumuler certains métaux dans leurs tissus racinaires et/ou aériens. Plusieurs d'entre eux sont même essentiels, en très faible concentration, pour leur fonctionnement. Ce processus d'enlèvement peut jouer un certain rôle dans la diminution globale des métaux en solution, dépendamment des types de métaux lourds et surtout de leur concentration dans l'eau à traiter [43].

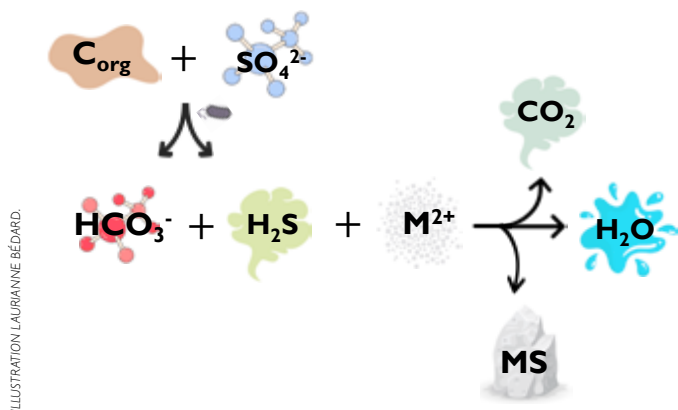


Figure 9 – Processus général produisant des métaux solides (MS) via la précipitation microbienne.

3.2.6 PATHOGÈNES

Plusieurs micro-organismes pathogènes (coliformes fécaux, certains virus, champignons, etc.) se retrouvent dans les eaux usées [44].

Processus d'enlèvement : La filtration par le substrat, la compétition biologique, l'oxydation et la déplétion naturelle sont les principaux processus d'enlèvement des agents pathogènes en marais filtrant. La filtration est effectuée par le substrat et les systèmes racinaires. Les microorganismes pathogènes peuvent aussi être oxydés si le potentiel d'oxydo-réduction du milieu est adéquat, ou être absorbés sur la matière organique et/ou sur le biofilm et ainsi être métabolisés ou retenus. La prédation et la compétition avec les autres organismes du marais filtrant sont, un facteur important permettant leur enlèvement lorsque les conditions environnementales ne sont plus favorables pour leur croissance et survie. [36].

COMMENT MESURE-T-ON L'ENLÈVEMENT DES PATHOGÈNES EN MARAIS FILTRANT ?

La réduction de la présence des microorganismes pathogènes dans le milieu est indiquée par niveaux de log. Ainsi, chaque niveau de log correspond à une réduction de charge d'une puissance 10. Par conséquent, 1 log équivaut à une réduction de 90 % (par exemple de 100 millions à 10 millions), 2 log de 99 %, (de 10 millions à un million), 3 log de 99,9 % (d'un million à 100 000), etc. En règle générale, les marais filtrants peuvent éliminer jusqu'à 3log unités de coliformes fécaux [36].

3.2.7 CONTAMINANTS ÉMERGENTS

Grâce aux avancées de la technologie analytique, des contaminants de nature complexe sont maintenant fréquemment détectés dans les effluents. Ces contaminants émergents (*contaminants of emerging concern* (CECs)) incluent des produits de soins personnels, des produits pharmaceutiques, divers types de pesticides, les retardateurs de flamme, les sucraants artificiels, les drogues illicites, les microplastiques, etc [45]. Ils représentent tous des substances généralement non surveillées, mais qui ont des impacts sur l'environnement et/ou la santé humaine. L'élimination des contaminants d'intérêt émergent représente un défi environnemental majeur, car les stations d'épuration ne sont pas conçues pour les traiter [46].

Processus d'enlèvement : Considérant la très grande diversité des contaminants émergents, il en résulte que les processus conduisant à leur élimination sont tout autant variés. Parmi ces processus, on retrouve la volatilisation, la sorption, la photolyse, l'oxydation, l'assimilation par les végétaux et la dégradation microbienne [47]. L'occurrence et la force de ces processus dépendent de plusieurs facteurs, notamment la nature chimique du contaminant et de sa concentration [48].

4.0 VÉGÉTAUX

4.1 TYPES DE VÉGÉTAUX UTILISÉS

Les végétaux sont des constituants essentiels des marais filtrants [49]. Différents types de végétaux peuvent être utilisés qui sont regroupés en fonction de la nature d'enracinement et du positionnement des parties aériennes dans la colonne d'eau

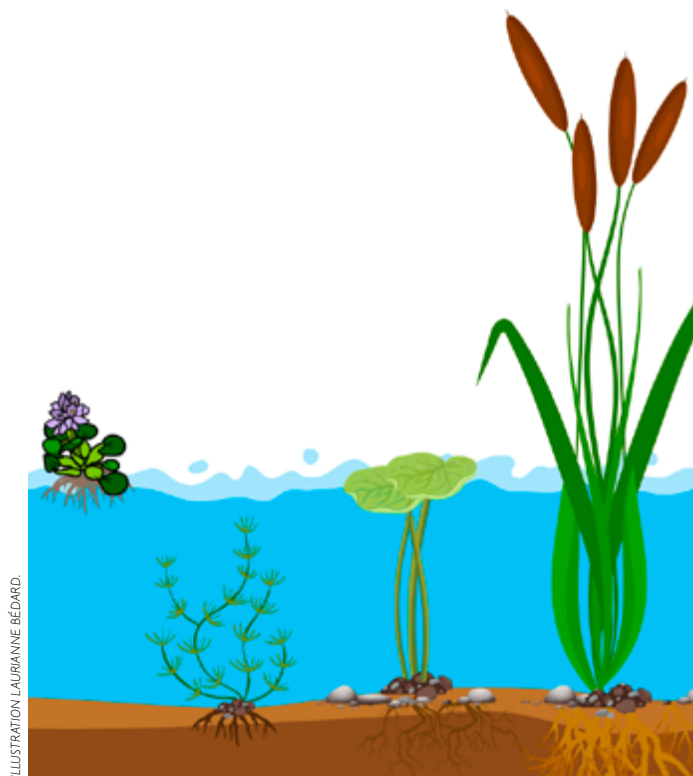


Figure 10 — Types de végétaux aquatiques utilisés en marais filtrants (de gauche à droite) ; plantes flottantes non enracinées, plantes submergées enracinées, plantes flottantes enracinées, et plantes émergentes enracinées.

4.1.1 PLANTES FLOTTANTES NON ENRACINÉES

Les plantes flottantes non enracinées (*free-floating plants*) flottent librement à la surface et dans une petite portion de la partie supérieure de la colonne d'eau (Fig. 11). Les systèmes racinaires flottent aussi librement sous la surface de l'eau. Ces plantes sont de tailles très variées, allant de plantes bien développées, comme l'azolle (*Azolla* spp.), la laitue d'eau (*Pistia stratiotes*) et la jacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes*), à des très petites plantes comme, les lentilles d'eau (*Lemna* spp.) et la spirodèle (*Spirodela polyrhiza*) [50].



Figure 11 — Végétaux flottants non enracinés : laitue d'eau (*Pistia stratiotes*) (en haut) et lentille d'eau (*Lemna minor*) (en bas).

4.1.2 PLANTES SUBMERGÉES ENRACINÉES

Les plantes submergées enracinées (*submerged plants*) sont des plantes où les parties aériennes sont submergées en permanence et les parties souterraines sont enracinées dans le substrat (Fig. 12) [51]. Des végétaux, tels que le cératophylle (*Ceratophyllum demersus*), les élodées (*Elodea* spp.) et les myriophylles (*Myriophyllum* spp.) en sont des représentants [50].



PHOTOS JACQUES BRISSON

Figure 12 — Végétaux submergés enracinés : l'élodée du Canada (*Elodea canadensis*) (en haut) et le myriophylle (*Myriophyllum* sp.) (en bas).

4.1.3 PLANTES FLOTTANTES ENRACINÉES

Les plantes flottantes enracinées (*floating-leaved plants*) flottent à la surface de l'eau, mais celles-ci sont enracinées dans le substrat. Ce sont des plantes immergées où seules les parties aériennes flottent à la surface (Fig. 13). Les hydrocotyles (*Hydrocotyle* spp.), les nénuphars (*Nuphar* spp.), les nymphéas (*Nymphaea* spp.) et la brasénie de Schreber (*Brasenia schreberi*) sont des exemples de plantes flottantes enracinées [50].



PHOTOS JACQUES BRISSON ET LAURIANNE BÉDARD

Figure 13 — Végétaux enracinés flottants : nymphéa (*Nymphaea odorata*) (en haut) et brasénies (*Brasenia shreberi*) (en bas).

4.1.4 PLANTES ÉMERGENTES ENRACINÉES

Les plantes émergentes enracinées (*emergent plants*) sont des plantes dont les racines et rhizomes sont submergés, mais dont les tiges et feuilles émergent au-dessus de la surface de l'eau (Fig. 14). Elles possèdent généralement un système racinaire bien développé, adapté à un environnement saturé en eau grâce à des cavités à l'intérieur des rhizomes pour le transport de l'oxygène vers les parties souterraines (c.-à-d., aérénchymes). La majorité de ces espèces ont aussi la capacité de se propager latéralement à l'aide de rhizomes, ce qui peut augmenter la rapidité de colonisation du milieu. Elles dominent souvent dans les zones humides naturelles et constituent également les plantes les plus communément utilisées en marais filtrants. Des végétaux tels que l'alpiste roseau (*Phalaris arundinacea*), la glycérie (*Glyceria* spp.), les iris (*Iris* spp.), les joncs (*Juncus* spp.), les quenouilles (*Typha* spp.), le roseau commun (*Phragmites australis*) et les scirpes (*Scirpus* spp.) en sont quelques exemples [50].

QU'EST-CE QU'UN MACROPHYTE?

Un terme largement utilisé en marais filtrant pour décrire les végétaux utilisés est celui de « macrophyte ». Un « macrophyte » qualifie généralement une plante de grande taille. Toutefois, lorsqu'utilisé dans un contexte de marais filtrants, à cette signification s'ajoute une affinité ou une tolérance face à l'inondation ou à l'immersion. L'usage du mot peut aussi parfois inclure, non seulement les plantes vasculaires, mais aussi des bryophytes aquatiques et de grandes algues [49].

4.2 CARACTÉRISTIQUES VÉGÉTALES RECHERCHÉES

Les critères de sélection pour le choix des végétaux utilisés dépendent du type de marais filtrant (décrits dans la section 2), de la charge de polluants, du type d'eau usée à traiter et des normes de rejets [52], mais aussi de plusieurs critères généraux importants. Parmi les critères généraux prépondérants dans la sélection des plantes (Fig. 15), la tolérance aux polluants ciblés est essentielle. Une croissance rapide et une forte production de biomasse font également partie des critères fondamentaux, car ils permettent un établissement rapide du végétal, tout en optimisant la consommation d'eau et ainsi augmenter potentiellement l'élimination des polluants. Les plantes qui possèdent un système racinaire dense et étendu sont aussi recherchées, car elles permettent d'amplifier les



PHOTOS JACQUES BRISSON



PHOTOS JACQUES BRISSON

Figure 14 – Végétaux émergents enracinés : quenouille à feuilles étroites (*Typha angustifolia*) (en haut) et roseau commun (*Phragmites australis* subsp. *australis*) (en bas).

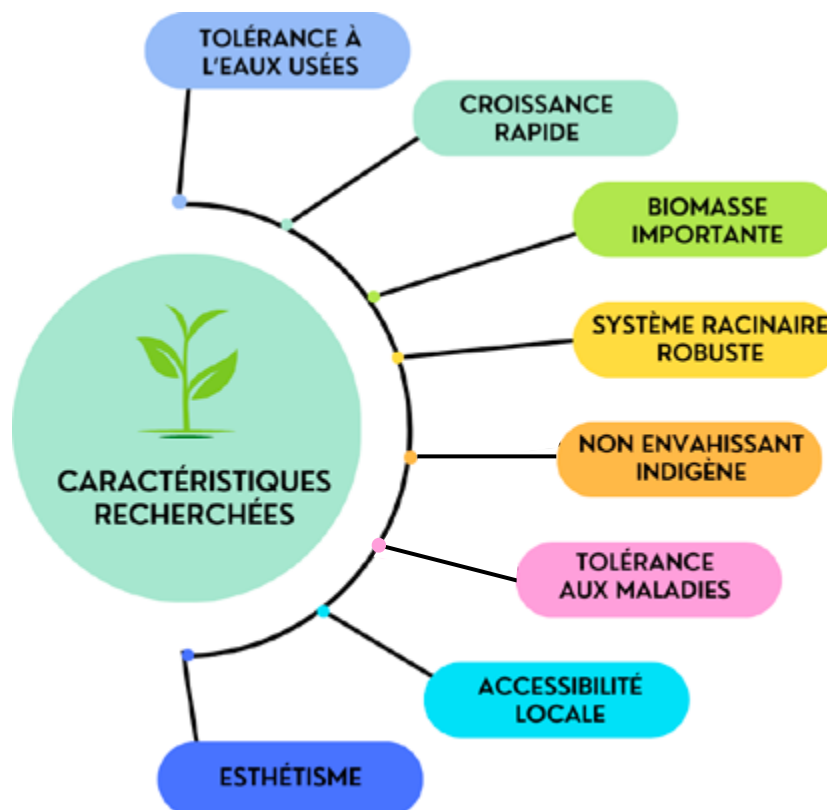


Figure 15 – Critères de sélections généraux pour les végétaux en marais filtrant

effets bénéfiques de la rhizosphère. L'utilisation d'espèces indigènes est un autre facteur important, car celles-ci sont déjà adaptées aux conditions climatiques locales, réduisant *de facto* les risques d'invasion ou d'hybridation avec les espèces présentes et promouvant la biodiversité locale. La tolérance aux conditions d'opération du marais (ex., sécheresse, inondation, eaux polluées) et l'accessibilité dans les pépinières de production locales restent des critères très pertinents dans le choix des végétaux à la fois dans la mise en place et l'entretien

des systèmes de traitement sur le long terme [2]. Enfin, il peut aussi être approprié de choisir des végétaux ayant une valeur esthétique [53], notamment avec de belles couleurs de feuilles ou de belles floraisons, pour améliorer l'effet visuel du marais et, par là même, contribuer à une plus grande acceptabilité sociale. D'autres critères plus spécifiques de sélection peuvent intervenir dans le choix des végétaux selon les caractéristiques des marais et des eaux à traiter (voir sections 5.4, 6.4 et 7.4).

DOIT-ON INCLURE DES ESPÈCES LIGNEUSES DANS UN MARAIS FILTRANT ?

Dans la très grande majorité des cas, ce sont des plantes herbacées que l'on utilise en marais filtrant. Elles sont économiques, faciles à établir et à entretenir. Mais est-ce que les espèces ligneuses sont moins efficaces ? Selon une étude réalisée en mésocosmes [61], les espèces ligneuses (arbustes, petits arbres) possèderaient en général un taux de croissance significativement moins rapide, mais semblent toutefois apporter divers attributs au système. En effet, certaines espèces tolérant très bien les zones humides contribuent à éliminer notablement la matière

organique et les contaminants (par bioaccumulation dans leurs tissus). De plus, elles montrent une grande capacité d'évapotranspiration qui leur confère une plus grande efficacité de traitement. Certes, les herbacées sont plus performantes pendant la période d'établissement, mais, en raison du plus fort potentiel de développement de la biomasse des espèces ligneuses, il est probable que ces dernières améliorent la performance des marais filtrants à plus long terme [61].

MONOCULTURE OU POLYCULTURE?

La majorité des marais filtrants n'utilise qu'une seule espèce de plante sur l'ensemble du dispositif. Il est vrai qu'une monoculture est souvent moins chère à établir et plus facile à entretenir, gérer et maintenir. Pourtant, il a été démontré qu'en général, une communauté naturelle diversifiée est plus efficace à offrir des services écosystémiques. Serait-ce alors profitable d'utiliser des polycultures en marais filtrant? En principe, une diversité végétale pourrait améliorer l'élimination d'une plus grande variété de polluants grâce à une plus grande richesse et diversité microbienne engendrée [54], aux différentes périodes de croissance qui peuvent améliorer l'étendue du traitement [53] et à la complémentarité de l'utilisation des ressources [55].

Malgré tout, il est difficile d'établir une relation solide entre la diversité végétale et une amélioration mesurable de la qualité de l'eau en marais filtrant dans l'état actuel des

connaissances [56]. Certaines études ont documenté des effets positifs des polycultures [53, 55, 57], alors que d'autres ont montré soit qu'il n'y avait pas d'effet [10], soit qu'il y avait des effets négatifs [59], soit que les performances étaient identiques à celles de la monoculture la plus performante. Une méta-analyse des données liées avec cette problématique [56] conclut que, pour le moment, bien qu'il n'y ait pas d'avantage significatif, le traitement de l'eau avec une polyculture n'est pas moins efficace que la monoculture de la plante la plus performante que contient cette polyculture. De plus, avec une polyculture, on ne fait aucun compromis sur la qualité de l'eau tout en apportant d'autres avantages, tels que la résistance face aux stress environnementaux et aux maladies, une plus grande valeur de l'habitat pour la faune et une plus grande valeur esthétique [56].

EST-CE QUE LE ROSEAU D'AMÉRIQUE A LES MÊMES CAPACITÉS QUE LE ROSEAU COMMUN?

Le roseau commun (*Phragmites australis* subsp. *australis*) est l'une des espèces les plus utilisées en marais filtrant [58]. Cette espèce d'origine eurasiennne est sélectionnée principalement pour sa biomasse et son système racinaire important, sa tolérance aux sols saturés d'eau, sa croissance rapide en début de saison et sa capacité d'éliminer efficacement plusieurs polluants organiques et inorganiques [2]. En contrepartie, cette espèce est très envahissante et problématique pour la biodiversité en Amérique du Nord [59, 60]. Il est donc avantageux de travailler avec une plante indigène qui a potentiellement les mêmes capacités : la sous-espèce nord-américaine du roseau commun (*Phragmites australis* subsp. *americanus*). Mais celle-ci est-elle aussi efficace?

Selon une expérience réalisée en mésocosmes avec deux taux de charge différents en polluants, le génotype nord-américain serait aussi efficace que le roseau commun eurasiennne en marais filtrant. Effectivement, le roseau d'Amérique, malgré sa plus petite taille, posséderait une capacité de traitement des polluants encadrés par la réglementation (azote, phosphore, etc.) similaire à celle au roseau commun. Dans cette expérience, réalisée à l'Institut de recherche en biologie végétale, il s'est même avéré légèrement plus efficace pour l'enlèvement du phosphore. Il serait donc potentiellement un bon candidat en Amérique du Nord au même titre que le roseau exotique pour les marais filtrants [59]. Cependant, sa résistance aux maladies et aux ravageurs en situation de marais filtrant reste à démontrer.



Phragmites australis subsp. *americanus*



Phragmites australis subsp. *australis*

PHOTOS JACQUES BRISSON

5.0 MARAIS FILTRANT SURFACIQUE À FLUX HORIZONTAL

Ce type de marais (Fig. 16) est celui qui ressemble le plus aux zones humides naturelles, et les processus associés y sont essentiellement les mêmes. Il fonctionne le plus souvent sans pompes, alimenté en eau par la gravité, et est, par conséquent, très peu énergivore, en plus de nécessiter très peu d'entretien. Ce sont pour ces raisons que ce type de marais filtrant possède un très faible coût par unité de surface et peut être utilisé dans des situations où de grands débits d'eau doivent être traités. Bien qu'il soit parfois utilisé pour le traitement secondaire des eaux usées domestiques, son emploi est plus approprié pour le traitement des eaux faiblement chargées en polluants. Les marais filtrants surfaciques à flux horizontal sont donc surtout consacrés au traitement des rejets agricoles, de certains rejets industriels ou au traitement tertiaire de l'eau usée domestique [36]. Il est particulièrement bien adapté aux climats tropicaux et subtropicaux, où il peut fonctionner toute l'année. Au Québec, ce type de marais filtrant peut être utilisé de façon saisonnière, comme pour certaines eaux usées générées pendant la saison estivale (lixiviat, rejets agricoles, etc.) ou comme étape de polissage des eaux usées domestiques d'établissements saisonniers (camps de vacances, chalets, etc.). Cependant, il pourrait aussi être opérationnel toute l'année en serre ou à l'extérieur dans certaines situations très particulières (section 10.4).

5.1 ENCEINTE

Une enceinte imperméable est nécessaire pour isoler le marais filtrant surfacique, seulement lors de certains cas, notamment où la nappe phréatique est à moins d'un mètre de la surface ou lorsque des polluants précis ne peuvent être relâchés dans l'environnement. Cette membrane peut être composée de substrat argileux imperméable, de plastique et/ou d'une membrane géotextile [2]. Cependant, si le marais traite une eau peu chargée en contaminants, une enceinte imperméable pourrait ne pas être essentielle. Ce serait notamment le cas si le sol du site d'implantation est compatible avec l'enracinement des végétaux, si la distance avec la nappe phréatique est suffisante (c.-à-d., 1 m et plus) et si les risques de dissémination de la contamination sont faibles [2]. Pour éviter que l'eau ne déborde du marais, notamment lors de fortes pluies, une revanche suffisamment haute par rapport à la surface moyenne de l'eau doit border l'enceinte. Un plan d'urgence en cas de débordement doit aussi faire partie intégrante de la phase de conception en cas d'inondations [36].

5.2 SUBSTRAT

Puisque la majorité des processus d'enlèvement s'effectue dans la colonne d'eau, la seule considération concernant le substrat serait sa capacité de prodiguer des conditions propices aux fonctions souhaitées suivantes : bon enracinement des végétaux, anoxie pour la dénitrification, adsorption du phosphore, etc. [2]. En général, il a environ 20 à 30 cm d'épaisseur [12], et peut être composé de sable, de terre, de gravier (Fig. 17) ou du substrat présent sur le site d'implantation [36]. Les marais filtrants à plantes flottantes ne nécessitent pas de substrat.



PHOTO INSTITUT DE RECHERCHE EN BIOLOGIE VÉGÉTALE

Figure 16 — Bassin filtrant traitant les eaux des nappes phréatiques à Montréal-Est.



Figure 17 – Graviers grossiers utilisés comme substrat dans un marais filtrant surfacique.

5.3 VÉGÉTAUX

Les végétaux utilisés peuvent être non enracinés et/ou enracinés, flottants, submergés et/ou émergents. Les espèces flottantes non enracinées les plus utilisées à l'échelle mondiale sont, en climat chaud, la jacinthe d'eau (*Eichhornia crassipes*) et la laitue d'eau (*Pistia stratiotes*), alors qu'en milieu tempéré, la lentille d'eau (*Lemna minor*) peut être utilisée. Pour les espèces enracinées, un vaste choix est possible, mais en général, on va prioriser les plantes locales et indigènes, telles que la menthe du Canada (*Mentha canadensis*), l'élodée du Canada (*Elodea canadensis*), le grand nénuphar jaune (*Nuphar variegata*), le jonc épars (*Juncus effusus*), la pontédérie cordée (*Pontederia cordata*), etc. [2]. La superficie végétalisée peut être parsemée, mais typiquement, la végétation occupe plus de 50 % de la superficie [12].

En raison des faibles concentrations de polluants de l'affluent et de la faible surface de croissance pour le biofilm comparative-ment aux marais sous-surfaciques, un des rôles principaux des végétaux dans ce type de marais est d'absorber les polluants. Ils favorisent aussi la sédimentation, augmentent la diffusion d'oxygène via le système racinaire vers les profondeurs, ajoutent de la matière organique et des exsudats racinaires bénéfiques pour l'activité bactérienne et ainsi amplifient la dégradation des polluants [2].

5.4 HYDRAULIQUE

Typiquement, une pente de 0,5 % est suffisante pour faciliter le drainage des eaux à travers l'ouvrage via la gravité [59]. Toutefois, si la profondeur varie considérablement au sein du marais, une analyse hydraulique plus détaillée est nécessaire [36].

Pour déterminer la profondeur appropriée du bassin et du niveau de l'eau, il est essentiel de prendre en compte la

profondeur maximale à laquelle les espèces végétales sélectionnées peuvent survivre adéquatement. Généralement, la limite supérieure est de 60 centimètres, mais la majorité des marais possèdent une profondeur moyenne de seulement 30 centimètres. Cependant, les courts-circuits hydrauliques et les zones d'eau stagnante sont des problèmes couramment rencontrés pour ce type de marais, résultante de divers facteurs; l'accumulation de sédiments, la prolifération des algues, la croissance des plantes, etc. Une des options pour limiter ces problèmes consiste à créer des zones plus profondes, par bandes en alternance, placées perpendiculairement à la direction de l'écoulement [36]. La hauteur du niveau de l'eau peut alors varier entre 0,3 et 1,5 m [2]. Ces zones profondes, accentuant l'écoulement de l'eau, assurent ainsi l'oxygénation de la couche en surface, ce qui réduit le risque d'odeurs, d'émissions de pathogènes ou de moustiques vecteurs de maladies.

5.5 DIMENSIONNEMENT

Si on les compare aux autres types de marais filtrants, les marais surfaciques sont ceux qui nécessitent la plus grande superficie pour un même degré d'épuration. Ils possèdent aussi des niveaux d'enlèvement très variables en fonction du type de polluant visé. En fait, il n'existe pas de données spécifiques sur l'enlèvement de la charge de polluants par unité de surface dans la littérature. Chaque marais filtrant surfacique est unique et un dimensionnement adéquat nécessite la caractérisation de l'affluent, du climat local, des volumes d'eau à traiter et des objectifs d'enlèvement des polluants [2]. La taille de ce type de marais filtrant est habituellement déterminée en termes de volume ou de surface. La méthode volumique comprend le temps de rétention hydraulique nécessaire à l'abattement des polluants visés. La méthode surfacique détermine cette élimination en fonction de la surface totale du bassin [41].

5.6 PERFORMANCES

Les processus d'enlèvement des polluants prédominants dans ce type d'installation sont la décantation, l'activité microbienne et la photolyse. Puisque le courant dans le bassin d'eau est généralement faible, la décantation peut être optimisée. De plus, ce type de marais favorise à la fois l'activité microbienne aérobie et anoxique, dû à l'échange du plan d'eau avec l'oxygène de l'atmosphère et aux conditions présentes dans le substrat. Aussi, lorsque le système est mature, les débris des végétaux favorisent la formation d'une couche isolante qui contribue à éliminer l'oxygène dans les sédiments. Grâce à ces deux types d'activités microbiennes, la nitrification et la dénitrification sont possibles. Finalement, l'accessibilité des rayons ultra-violet du soleil aux zones d'eau libre contribue à la dégradation de certains polluants dans la colonne d'eau [36].

En règle générale, ce type de marais peut éliminer jusqu'à 80 % des matières en suspension (MES), de la demande biochimique en oxygène (DBO_5) et de l'ammonium (NH_4). Les taux d'enlèvement varient entre 30 et 50 % pour l'azote total (TN) et entre 10 et 20 % pour le phosphore total (TP). On observe également une réduction des coliformes de 1 log [36]. Cependant, lorsque la charge de phosphore dans l'affluent est supérieure à 0,1 g par m^2 de surface, ce type de dispositif ne permet pas de traiter efficacement ce polluant [41].

5.7 PROBLÈMES COURANTS

Les courts-circuits hydrauliques et les zones d'eau stagnante constituent un problème commun des marais filtrants surfaciques à flux horizontal, particulièrement pour les systèmes de grande surface où les bassins constituant le marais possèdent de grands méandres. Puisque l'eau traitée est exposée à l'air, des problèmes d'odeur peuvent survenir lorsque la charge est plus élevée. Des problèmes de croissance des végétaux y sont aussi davantage constatés que dans les autres types de marais filtrants. Certaines plantes peuvent être endommagées par le gel hivernal, alors que d'autres peuvent être sensibles aux variations d'oxygène dans l'eau, au courant ou aux vagues [2, 36].

5.8 OPÉRATION ET ENTRETIEN

Les marais filtrants surfaciques à flux horizontal nécessitent normalement très peu d'entretien. En premier lieu, une inspection périodique de l'ouvrage est nécessaire. Il faut notamment vérifier que les matériaux sont en bon état, qu'il n'y a pas de fuites, que le cheminement de l'eau et son flux sont optimaux. Dans ce dernier cas, il peut être nécessaire de nettoyer les bassins du marais en retirant l'excès d'algues et de sédiments. Ensuite, il est important de faire un suivi régulier de l'état des végétaux et de remplacer les végétaux morts. Dans des marais utilisant des plantes non enracinées où l'on cherche à retirer les nutriments absorbés, il faut réaliser une récolte régulière d'une partie des plantes et en disposer adéquatement.

Au début de la période hivernale dans les régions tempérées, on peut soit arrêter le traitement en stockant l'eau pour la traiter lorsque les températures seront plus clémentes, soit relever le niveau de l'eau avant la période de gel pour permettre la formation d'une couche de glace isolante [36]. Dans de rares cas, cette dernière technique peut permettre le fonctionnement du marais en période hivernale (voir exemple 11.1).

5.9 BÉNÉFICES ET LIMITES

Les marais filtrants surfaciques à flux horizontal sont moins coûteux et plus simples à construire et à opérer que d'autres types de marais filtrants. Ils ont aussi l'avantage d'être bien aérés grâce aux échanges continus entre l'eau et l'air. Ils sont cependant moins efficaces par unité de surface pour le traitement des eaux usées chargées en polluants trouvés communément dans ces eaux. Ils nécessitent donc une plus grande superficie pour traiter un même débit. Ils sont aussi plus spécifiquement adaptés au traitement tertiaire ou à des eaux usées peu chargées en polluants et sont pleinement fonctionnels dans les climats tropicaux et subtropicaux [2]. En milieu tempéré, comme au Québec, où il y a de longues périodes de gel, ils sont principalement limités à une utilisation saisonnière.

6.0 MARAIS FILTRANT SOUS-SURFACIQUE À FLUX HORIZONTAL

Ce type de marais filtrant (Fig. 18 et 19) est plus complexe à réaliser et engendre donc un coût un peu plus élevé par unité de surface qu'un marais surfacique. Ils restent toutefois nettement moins coûteux que la plupart des technologies traditionnelles de traitement des eaux. Ils sont bien adaptés au traitement secondaire et tertiaire. Le traitement primaire peut d'ailleurs être effectué sur place via une fosse septique ou un bassin de décantation [36]. Ce type de marais filtrant a aussi l'avantage d'être performant en climat froid, puisque l'eau est protégée du gel en circulant sous la surface [2]. Ils représentent la vaste majorité des marais filtrants utilisés au Québec.

6.1 ENCEINTE

L'ensemble du lit est isolé à l'aide d'une enceinte imperméable, généralement composée d'une combinaison d'un revêtement plastique et d'un géotextile [36], bien que tout autre type de matériau imperméable puisse être utilisé. La tuyauterie d'alimentation du bassin au niveau de l'affluent est généralement souterraine [63]. Les tuyaux de collecte de l'effluent sont souvent des tuyaux percés de trous situés sur toute la largeur du dispositif, présents en sortie de bassin. Ils sont habituellement reliés à un tuyau qui pivote pour ajuster le niveau de l'eau. Pour éviter que l'eau ne déborde du marais, une revanche suffisamment doit border l'enceinte, généralement entre 0,2 et 0,5 m de haut. [36].

6.2 SUBSTRAT

L'efficacité de ce type de marais est souvent liée au type de substrat utilisé. Plus ce dernier est de petite taille, plus le temps de séjour de l'eau dans le système est prolongé et plus les processus de dégradation des contaminants sont améliorés. Toutefois, un substrat plus fin augmente fortement le risque de

colmatage et diminue le débit d'alimentation. À l'inverse, un substrat de plus grande taille permet des taux de charge hydraulique plus élevés, mais réduit généralement l'efficacité d'enlèvement [36]. Un équilibre entre la taille du substrat et la formation du biofilm doit donc être établi pour réduire les risques de colmatage [63, 64]. Le substrat peut être du gravier ou du sable grossier libre (ou lavé) de particules fines et possédant un diamètre en moyenne de 2 à 10 mm. De plus, pour faciliter l'écoulement de l'eau, il est nécessaire d'ajouter un enrochement plus grossier aux extrémités du bassin, où se trouvent les tuyaux d'apport de l'affluent et de collecte de l'effluent. Il est aussi important de bien nettoyer cet enrochement avant de l'intégrer au bassin, pour éviter que la poussière ou les particules fines ajoutent inutilement des intrants à fort pouvoir colmatant. La profondeur du substrat est généralement comprise entre 0,5 et 0,7 m pour le traitement secondaire et tertiaire des eaux usées domestiques [2, 36].

6.3 VÉGÉTAUX

Les végétaux utilisés sont des plantes enracinées émergentes [2]. En Europe, ces marais sont typiquement plantés avec du roseau commun (*Phragmites australis* subsp. *australis*) en raison de son efficacité reconnue. Dans des régions tempérées où cette plante est envahissante, des espèces telles que la quenouille à larges feuilles (*Typha latifolia*), la sagittaire à larges feuilles (*Sagittaria latifolia*), le scirpe des étangs (*Schoenoplectus tabernaemontani*, syn., *Scirpus validus*) et l'iris de faux-acore (*Iris pseudacorus*) sont employées [65]. Dans les climats plus chauds, le papyrus (*Cyperus* spp.), les quenouilles (*Typha* spp.), les heliconias (*Heliconia* spp.) et les cannas (*Canna* spp.) sont utilisés [66].

Les végétaux augmentent la surface de croissance du biofilm et améliorent la filtration grâce à l'étendue de leur système racinaire (rhizosphère). Ils apportent également plusieurs bénéfices au système, notamment le transfert d'oxygène vers les racines. Bien que minime en comparaison à la charge reçue, ils ont une capacité d'absorption de divers polluants [67]. Par ailleurs, la perte d'eau par évapotranspiration augmente le



PHOTO OCLAIR ENVIRONNEMENT

Figure 18 — Marais filtrant sous-surfacique à flux horizontal au Québec.

temps de séjour de l'eau dans le marais, ce qui améliore les capacités de traitement du bassin. Les végétaux fournissent de la matière organique et des exsudats racinaires bénéfiques à l'activité bactérienne de la rhizosphère [36].

6.4 HYDRAULIQUE

Pour les marais de moins de 25 mètres de long, une pente minimale de 0,5 à 1 % est nécessaire pour assurer un bon écoulement gravitaire de l'eau [2]. Si le lit est de plus de 25-30 mètres, une analyse hydraulique plus approfondie est nécessaire. D'ordre général, le rapport longueur/largeur du bassin doit se situer entre 1 :2 et 1 :4 pour le traitement secondaire des eaux usées. Certains utilisent des rapports longueur/largeur plus élevés pour tenter de réduire les risques de colmatage dans les systèmes où l'affluent est très chargé. Inversement, pour les systèmes de traitement tertiaires des eaux usées, la largeur doit être plus grande que la longueur pour augmenter la superficie de la section transversale. La largeur du lit est souvent minimale à 5 mètres, pour faciliter la distribution uniforme de l'écoulement de l'eau et réduire les risques de courts-circuits hydrauliques, mais surtout doit être suffisante pour supporter les débits de pointe. Les tuyaux d'apport et de collecte possèdent des orifices régulièrement espacés (tous les 10 %), situés sur toute la largeur de l'extrémité du bassin. La profondeur totale du bassin varie en moyenne autour de 1 à 1,2 m et le niveau de l'eau entre 0,5 et 0,7 m (entre 5 et 10 centimètres sous la surface). Un plan d'urgence en cas de débordement doit aussi faire partie intégrante de la phase de conception en cas d'inondations [36].

6.5 DIMENSIONNEMENT

Il existe diverses méthodes de dimensionnement pour les marais filtrants sous-surfaciques à flux horizontal basé sur des critères surfaciques ($\text{m}^2/\text{personne équivalente}$) [36], des critères de taux de charge surfacique (maximum de grammes de polluant/ $\text{m}^2 \times \text{jour}$), ou des modèles théoriques ou empiriques de dégradation des polluants tels que l'approche P-k-C* [consulté 2]. Ces critères sont remarquablement similaires pour les pays climatiquement semblables, quelle que soit l'approche retenue [36]. La majorité des critères de dimensionnement spécifie un taux de charge maximal basé sur la surface du bassin. Ainsi, les données empiriques suggèrent une charge maximale de $250 \text{ g/m}^2 \times \text{jour}$ pour l'apport en matière organique. À noter que le débit maximal journalier doit être utilisé dans les calculs de dimensionnement. En règle générale, la surface nécessaire pour appliquer ce type de marais varie entre 3 et $10 \text{ m}^2/\text{PE}$ [2].

6.6 PERFORMANCES

La réduction de la charge de polluants à travers le marais dépend des concentrations de l'affluent et des taux de charge hydraulique. Puisque l'eau est sous la surface du dispositif et que le système est saturé, les conditions aérobies sont restreintes et l'élimination de l'ammonium est limitée. A contrario, ce type de marais peut être très efficace pour la dénitrification, à condition qu'il y ait suffisamment de composés carbonés [36].

Généralement, ce type de marais traitant des eaux usées domestiques (après traitement primaire) (Fig. 19) permet d'éliminer plus de 80 % des MES et de la DBO_5 , 55 % de la DCO, entre 20 et 30 % d'ammonium, entre 30 et 50 % d'azote total (TN), et de réduire les coliformes de 2 log. Pour le phosphore total (TP), le pourcentage d'enlèvement varie entre 10 et 20 % [36].



Figure 19 — Marais filtrant sous-surfacique à flux horizontal pour le traitement des eaux usées au Québec.

6.7 PROBLÈMES COURANTS

Le problème prépondérant pour ce type de marais est le colmatage, c'est-à-dire l'obstruction des espaces vides (pores). Le colmatage survient lorsque les pores dans lesquelles l'eau interstitielle circule sont obstruées par l'accumulation de matières en suspension ou par le biofilm qui a pris trop d'ampleur. Le colmatage est généralement le résultat d'une charge excessive de solides et/ou matière organique. Parfois même, il peut provenir d'un mauvais dimensionnement initial du marais filtrant et/ou d'un mauvais choix de substrat, ou celui-ci s'effrite et relâche des particules dans le système. Il est donc important de sélectionner un substrat approprié, de vérifier les charges hydrauliques et de s'assurer que les systèmes en amont sont adéquatement dimensionnés et fonctionnels. Les problèmes les plus communs, que ce soit au cours de la conception ou de l'exploitation, sont donc :

-  Un prétraitement (fosse septique ou bassin de décantation) non efficace ou mal dimensionné et/ou entretenu qui libère des solides vers le marais.
-  Un substrat non adapté (friable) ou mal lavé qui contient et libère des particules fines ou même qui possède des côtés tranchants qui peuvent endommager la membrane imperméable.
-  Une répartition inégale de l'affluent qui crée des zones plus chargées, menant à un court-circuit hydraulique et à un colmatage localisé.
-  Un nivellement inadéquat [36].

6.8 OPÉRATION ET ENTRETIEN

L'opération et l'entretien incluent plusieurs contrôles routiniers. En premier lieu, il est essentiel de faire un suivi régulier des systèmes de traitement situés en amont du marais filtrant. Les fosses septiques et les bassins de décantation doivent ainsi être vérifiés et vidangés au besoin. Il faut également s'assurer du bon état de l'équipement dans le dispositif et de vérifier la distribution et l'écoulement de l'eau. En effet, une distribution inégale de l'affluent et de l'effluent peut engendrer une distribution inégale des polluants, créant ainsi des régions plus chargées que d'autres pouvant entraîner un colmatage. Une

montée d'eau au-dessus de l'ouvrage et/ou une diminution de l'efficacité du traitement sont des signes de colmatage potentiel. Les flux hydrauliques dans les différents bassins du marais filtrant peuvent aussi être suivis grâce à des études de traçage avec des marqueurs colorés. Finalement, il faut suivre l'état de la végétation, particulièrement dans les premières années, pour s'assurer d'un bon établissement et, par la suite, d'un bon maintien. Il est aussi de mise d'enlever les plantes indésirables au cours des deux premières années de fonctionnement, pour qu'elles ne prennent pas la place aux espèces choisies. Dans les climats tempérés, la présence d'une litière peut être intéressante pour l'isolation, mais dans les climats chauds et arides, après un certain temps, elle peut devenir une nuisance en favorisant le colmatage [36]. Pour plus de détails, vous pouvez consulter la fiche technique sur l'entretien des phytotechnologies de la SQP [68].

6.9 BÉNÉFICES ET LIMITES

Les marais filtrants sous-surfaciques à flux horizontal possèdent des coûts d'opération relativement peu élevés et sont efficaces pour le traitement secondaire des eaux usées. Puisque l'eau reste sous la surface, les risques d'odeur ou de prolifération de moustiques vecteurs de maladie sont minimisés. Le milieu saturé sous la surface permet aussi de maximiser le contact entre l'eau à traiter et la rhizosphère, ce qui améliore les processus de biodégradation. Ce type de marais filtrant a l'avantage d'être performant en climat froid, puisque l'eau est protégée du gel.

En revanche, les marais filtrants sous-surfaciques à flux horizontal possèdent des zones faibles en oxygène, ce qui facilite la dénitrification, mais réduit la décomposition de la matière organique et la nitrification. De plus, ils présentent un risque élevé de colmatage, puisque les matières en suspension encore présente dans l'eau traversent directement le substrat. Pour limiter les risques de colmatage, un substrat adéquat, un débit conforme et un traitement primaire efficace sont essentiels si l'eau usée traitée est chargée en matière organique [2].

7.0 MARAIS FILTRANT SOUS-SURFACIQUE À ÉCOULEMENT VERTICAL

Dans ce type d'installation (Fig. 20 et 21), l'alimentation se fait par bâchées c'est-à-dire par dosage intermittent. Ces marais sont efficaces pour le traitement primaire et secondaire de l'eau usée domestique et exigent une plus petite superficie pour traiter un même volume d'eau. Deux modèles de pensée existent pour les marais verticaux, la filière classique, utilisant le marais vertical comme traitement secondaire avancé, et la filière très commune dite « française », où les eaux brutes sont envoyées sur le système. Celui-ci se fait en deux étages; le premier recevant les eaux brutes, et le second jouant le rôle de traitement secondaire avancé. Les marais filtrants verticaux sont sensibles aux climats froids, dus au risque de la pénétration du gel dans le marais et dans la tuyauterie lors de l'alimentation [2], ils sont donc moins appropriés au climat québécois. Il y aurait toutefois des façons de contourner cette problématique, notamment via l'usage de câbles chauffants et de matériaux isolants selon une étude pilote réalisée au Québec

(section 11.3) [68]. Ces marais filtrants sont souvent plus complexes et plus coûteux par unité de surface à installer que les autres, puisque les ouvrages de dosage et de répartition, ainsi que la quantité de tuyauterie, sont plus importants que dans la filière horizontale. En revanche, ils ont l'avantage d'être plus compacts et plus performants par unité de surface.

7.1 ENCEINTE

Le bassin comporte une enceinte imperméable dont la composition est similaire à celle des marais sous-surfaciques à écoulement horizontal, à savoir une membrane plastique et un géotextile, de béton ou d'autres matériaux imperméables. Une revanche importante doit être présente, en général plus grande que 30 cm [36].

7.2 SUBSTRAT

Le substrat est un point central du traitement dans les marais filtrants. Il sert de support au réacteur biologique que sont les bactéries épuratrices et comme filtre physique. Le substrat est constitué de gravier, de sable ou d'une combinaison des deux. Dans ce type de système, plusieurs types de substrat sont



PHOTO SIMON AMIOT.

Figure 20 — Prototype de marais filtrant sous-surfacique à flux vertical pour le traitement des eaux usées municipales au Québec.

utilisés, séparés en différentes couches filtrantes. Cette succession de couches de différentes granulométries permet de minimiser le colmatage et de fournir une filtration progressive. Du bas vers le haut, il y a tout d'abord une couche de substrat plus grossière positionnée au fond du bassin pour faciliter le drainage. Par-dessus, une couche de substrat intermédiaire (ou de transition) plus fine est ensuite déposée pour réaliser la transition entre la couche supérieure et la couche de drainage. Elle participe également à la filtration des MES. La granulométrie de cette couche de transition est régie par la loi des filtres, pour s'assurer qu'aucune migration entre la couche filtrante et la couche de drainage ne survienne. La couche supérieure est appelée la couche de filtration. Elle est composée de matériau granulaire relativement fin. C'est cette couche qui réalise la majorité de la filtration des eaux. Il est essentiel de calibrer convenablement la granulométrie de chacune des couches, puisque des granulométries trop éloignées pourraient mener à une migration des particules d'une couche vers l'autre et ainsi créer des courts-circuits hydrauliques, impactant définitivement la capacité de traitement du système [36].

7.3 VÉGÉTAUX

Les végétaux utilisés sont des plantes enracinées émergentes, et ici aussi, le roseau commun (*Phragmites australis* subsp. *australis*) est l'espèce la plus couramment utilisée [2]. On y retrouve aussi l'iris des marais (*Iris pseudacorus*), l'échinodorus à feuilles primitives (*Echinodorus palaefolius*) [70], la canne de Provence (*Arundo donax*), la canne des Indes (*Canna indica*) [71], et les quenouilles à feuilles étroites (*Typha angustifolia*) [72].

Les plantes doivent être physiquement robustes et permettre l'infiltration adéquate de l'eau grâce aux trous engendrés par les tiges et ainsi potentiellement réduire le colmatage. En effet, ces tiges, avec l'effet du vent, vont osciller dans toutes les directions et créer à leur base un cône dans la matière organique accumulée. Cette action va permettre à l'eau de s'infiltrer via la rhizosphère de ces plantes et passer au travers du substrat pour être traitée. Ces « trous » engendrés par les tiges permettent ainsi de réduire le colmatage. En outre, similairement aux autres marais, les plantes offrent une grande surface de contact à la croissance du biofilm, en plus d'améliorer grandement la filtration grâce à leur système racinaire. L'absorption par les végétaux joue ici un rôle mineur dans l'épuration comparativement à celui des communautés bactériennes qu'elles entretiennent.

7.4 HYDRAULIQUE

Les marais verticaux utilisent la gravité pour optimiser le traitement. En effet, les épaisseurs des couches granulaires que l'eau doit traverser verticalement augmentent l'efficacité générale du procédé. Pour amener l'eau usée au bassin, si le dénivelé est suffisant, l'usage de siphons auto-amorçant permet d'assurer l'alimentation par bâchées du marais sans recourir à l'électricité. Dans le cas contraire, un système de pompage doit être installé, pour relever les eaux jusqu'au bassin de dosage comprenant le siphon. L'eau, quittant le bassin de dosage, passe en général par un ouvrage de répartition pour alimenter le marais.

Une fois la lame d'eau créée sur l'ensemble de la surface en activité, elle va procéder à son passage dans le milieu granulaire, en réalisant un effet piston. Elle est en mesure de transférer de la surface au milieu filtrant granulaire, grâce à l'action mécanique des plantes et aux racines ayant colonisé le milieu. Cet effet piston a plusieurs avantages. L'eau passe de façon uniforme au travers du milieu filtrant granulaire. La lame d'eau créant une barrière imperméable, cet effet de piston vient renouveler l'ensemble de l'air contenu dans le milieu granulaire, et ainsi favoriser l'oxygénation du milieu et la biodégradation aérobie. De plus, en descendant, la lame d'eau crée un appel d'air au travers de la rhizosphère. Les eaux sont récupérées par un système de drainage au fond du lit filtrant, afin de les acheminer vers les étapes de traitement subséquentes ou vers l'exutoire du système. La charge hydraulique maximale ciblée est de $80 \text{ L/m}^2 \times \text{jour}$ (300 L/m^2 pour le système français). L'intervalle entre les bâchées doit être situé entre 3 et 6 heures [36].

Certaines filières de traitement, faisant usage de plusieurs bassins de marais verticaux juxtaposés, alimentent ces bassins par intermittence, d'autres étant laissés au repos. Cette approche, qui permet d'alimenter seulement quelques zones, évite une surcharge du système. Pour les marais filtrants de grandes tailles (> 100 personnes-équivalentes), il est usuel de diviser le marais en plusieurs bassins de traitement et en zones de repos [36].



PHOTO LAURIANNE BÉDARD.

Figure 21 — Marais filtrant sous-surfacique à flux vertical pour le traitement des eaux usées en Martinique.

7.5 DIMENSIONNEMENT

Il existe différentes modalités de mise en place et de fonctionnement de ces installations. En raison de la variété des procédés et des méthodes d'alimentation qui peuvent être rencontrés, il est difficile de faire une synthèse des méthodes de dimensionnement. En règle générale, c'est le débit journalier maximum qui doit être utilisé lors du design du dispositif [2]. La profondeur du bassin et les épaisseurs de substrat peuvent aussi varier considérablement entre les installations; où es couches de substrat utilisées, varient communément entre 0,5 et 1 m pour le traitement des eaux usées domestiques [36, 73]. Typiquement, la surface de bassin requise pour le traitement est la plus faible des trois types de marais. Elle varie entre 1,2 et 5 m²/personnes-équivalentes pour le traitement des eaux usées domestiques [36].

7.6 PERFORMANCES

Les marais filtrants sous-surfaciques à flux vertical sont performants et couramment utilisés pour le traitement secondaire et tertiaire des eaux usées [33]. Toutefois, ils possèdent des mécanismes très variés (aération forcée, bâchées, etc.) et les quantités d'oxygène, les taux de charge hydrauliques et les temps de rétention de l'eau dans le système peuvent être très différents entre deux installations. Il est donc très difficile d'établir les taux d'enlèvement fixes à l'aide des données empiriques [2]. Ils démontrent toutefois tous une capacité importante de dégradation de la matière organique. En effet, le milieu de traitement étant bien oxygéné, l'enlèvement des composés carbonés est performant, tout comme la nitrification. La dénitrification est aussi possible, si, pendant un certain temps, le système est saturé en eau. Elle est toutefois insuffisante pour obtenir de hauts taux d'enlèvement de l'azote total. Ce type de marais filtrant est aussi efficace pour la filtration des MES, grâce au substrat et aux systèmes racinaires. L'efficacité d'enlèvement est souvent reliée au substrat utilisé [36].

En règle générale, un marais vertical composé d'un lit principal de sable (0,06 à 4 mm de diamètre) montre des taux d'abattement supérieurs à 90 % pour les MES, la DBO₅, et l'ammonium. Il peut aussi réduire les communautés de coliformes de 2 à 4 log [36]. Toutefois, le taux d'enlèvement est de moins de 20 % pour l'azote total et se situe entre 10 et 20 % pour le phosphore total.

7.7 PROBLÈMES COURANTS

À l'instar des marais sous-surfaciques à flux horizontal, l'enjeu le plus commun rencontré avec ce type de marais est le colmatage. Les problèmes les plus communs, que ce soit au cours de la conception ou de l'exploitation, sont donc les suivants :

-  Un prétraitement non efficace ou mal entretenu qui libère des solides en excès vers le marais.
-  Un substrat non adapté ou mal lavé qui contient et libère des particules fines menant encore une fois au colmatage prématuré du système.
-  Une répartition inégale de l'affluent qui crée des zones plus chargées, menant à un court-circuit hydraulique et à un colmatage localisé.
-  Un drainage déficient, menant à un déficit d'aération du système.
-  Des granulats qui possèdent des côtés tranchants pouvant endommager l'enceinte imperméable.
-  Un nivellement inadéquat [36].

7.8 OPÉRATION ET ENTRETIEN

L'opération et l'entretien des marais sous-surfaciques à flux vertical demandent plus de contrôles routiniers que les deux autres types de marais. Il est primordial, dans un premier temps, de valider l'efficacité du système, et plus particulièrement de l'azote, en suivant les performances de la nitrification. Ensuite, si le traitement primaire est effectué sur place à l'aide d'un autre marais (par exemple les systèmes français très efficaces pour l'enlèvement du carbone) ou d'autres installations, il est nécessaire d'évacuer périodiquement les boues

provenant de ce traitement pour éviter tout transfert vers le marais filtrant. Au cours des premières années, un suivi accru de la végétation est aussi nécessaire, consistant notamment à l'enlèvement des espèces indésirables et à la gestion des rebuts. Si le système est non saturé et qu'il peut y avoir des risques de gel, il est aussi important de vérifier que l'eau est complètement évacuée des conduites, pour éviter le bris des équipements. Cette étape doit être accomplie à l'automne et après l'enlèvement des végétaux en prévision de la saison hivernale. Enfin, si le marais fonctionne à l'aide de siphons, il est important de remplacer ces derniers après quelques années d'emploi, car la partie en caoutchouc a tendance à devenir poreuse, ce qui contribuerait à laisser passer l'eau usée [36].

7.9 BÉNÉFICES ET LIMITES

Les marais filtrants sous-surfaciques à flux vertical ont l'avantage d'être très efficaces pour l'enlèvement des MES, du carbone et de l'ammonium. Ils nécessitent une plus petite superficie d'opération que les deux autres types mentionnés pour un même niveau d'épuration sur les paramètres mentionnés ci-dessus. Sa configuration permet en effet un apport régulier en oxygène qui facilite la dégradation de la matière organique, en plus de réaliser la nitrification. Le risque de colmatage y est aussi plus modéré, dû à l'action des plantes, ils sont donc généralement très efficaces pour le traitement secondaire. Puisque l'eau reste sous la surface du dispositif, les risques d'odeurs et de moustiques vecteurs de maladies sont fortement diminués [2].

Les coûts de construction et d'opération sont toutefois plus élevés en raison de la quantité d'équipement requis pour son fonctionnement, et la quantité de tuyaux supplémentaire à prévoir. De plus, dans le cas où la topographie ne permet pas un écoulement gravitaire, une station de relevage est nécessaire [12]. L'épuration complète des composés azotés y est également limitée par l'absence de zones anoxiques. Ils sont, de plus, sensibles aux climats froids en raison du risque de gel dans le marais et la tuyauterie [2].

8.0 MODIFICATIONS SUPPLÉMENTAIRES

8.1 AÉRATION FORCÉE

L'aération forcée implique l'usage d'un système d'aération intégré pour les marais saturés seulement. Cet ajout d'oxygène au système est réalisé à l'aide d'un compresseur et de tuyaux perforés de distribution (nommés diffuseurs) situés au fond du bassin, qui permettent l'ascension de bulles d'air à travers le substrat. Cet oxygène gazeux est transféré en oxygène dissous, ce qui permet l'augmentation de la capacité de dégradation de divers polluants, notamment de la matière organique, et permet d'apporter suffisamment d'oxygène pour réaliser la nitrification, qui demande une concentration en oxygène dissous supérieure à celle requise pour dégrader la matière organique [74].

8.2 RECIRCULATION

La recirculation consiste à faire passer de l'eau traitée une seconde fois au travers du dispositif. Elle peut être opérée selon diverses configurations que ce soit pour un seul type de marais [75], ou pour les marais hybrides (généralement un marais sous-surfacique à flux vertical suivit d'un flux horizontal,

comme le système français) [76]. La recirculation est employée principalement pour augmenter l'efficacité d'enlèvement de l'azote total en améliorant les rendements de la nitrification et de la dénitrification.

8.3 ÉTAPES ADDITIONNELLES CIBLANT LE PHOSPHORE

Le phosphore est le polluant commun le plus difficile à éliminer en marais filtrant. Plusieurs solutions sont explorées dans la littérature scientifique, notamment la confection de substrats réactifs possédant une capacité d'adsorption plus élevée. Similairement aux substrats classiques, cette capacité est limitée dans le temps, mais la saturation du substrat réactif est retardée de quelques années. Une autre option consiste en l'ajout d'un bassin ou réservoir non planté en amont ou en aval du marais filtrant avec un substrat hautement réactif, qui peut être remplacé périodiquement et qui fait office de filtre. Lorsqu'il est saturé, il est plus facilement remplaçable que le bassin du marais filtrant dans son intégralité. Il est aussi possible de faire précipiter le phosphore à l'aide de sels chimiques, à base de fer ou d'aluminium. Ce procédé est aussi réalisé à l'extérieur du marais filtrant, notamment dans une fosse ou un bassin situé en amont ou en aval [2, 36].



9.0 MARAIS FILTRANTS AU QUÉBEC : ÉTAT DES LIEUX

L'implantation des marais filtrants au Québec en est encore à un stade embryonnaire. Le climat rigoureux, une réglementation stricte et des essais non concluants semant la méfiance auprès du ministère de l'Environnement et des utilisateurs potentiels, sont à la source de la lente implantation de cette phytotechnologie. Nous présentons un bref bilan des différents marais filtrants établis au Québec selon qu'ils traitent des eaux usées domestiques collectives, résidentielles, ou industrielles.

9.1 TRAITEMENT DE L'EAU USÉE DOMESTIQUE

9.1.1 MUNICIPALITÉS, ÉTABLISSEMENTS COMMERCIAUX, INSTITUTIONNELS OU COMMUNAUTAIRES QUI GÉNÈRENT PLUS DE 3 240 L/D

L'établissement d'une installation de traitement des eaux usées des municipalités, établissements commerciaux, institutionnels ou communautaires (à un débit supérieur à 3 240 L/d) relève de l'Article 22 de la *Loi sur la qualité de l'environnement* et du *Règlement sur les ouvrages municipaux d'assainissement des eaux usées*. La réalisation d'un nouveau système de traitement des eaux à des fins de recherche et d'expérimentation doit faire l'objet d'une demande préalable d'autorisation du ministère de l'Environnement (MELCCFP). Les différentes approches conventionnelles utilisées pour traiter les eaux usées domestiques sont détaillées dans le « *Guide pour l'étude des technologies conventionnelles de traitement des eaux usées d'origine domestique (2023)* », ci-après nommé *Le Guide* [77]. Les différents types de marais filtrants autorisés et leurs caractéristiques y sont décrits. Les concepteurs ont tout intérêt à en suivre les directives, puisque les analystes du Ministère s'appuient sur le *Guide* pour évaluer l'acceptabilité du système proposé et de la conformité aux normes fixées.

Il existe des marais filtrants dans quelques municipalités et établissements commerciaux, dont une grande proportion développée par HG Environnement entre 2006 et 2013, avant que la compagnie ne cesse ses activités. En date de 2023, il y avait 19 installations municipales de marais filtrants artificiels dans la province [77]. Il faut noter que, bien que la majorité des marais filtrants existants aient été plantés avec du roseau exotique, il est dorénavant interdit d'utiliser cette espèce, ou toute autre espèce exotique, dans les nouveaux marais filtrants. Depuis 2013, aucun nouveau marais commercial n'avait été construit, année de la fin des opérations de HG Environnement. Seules la réparation et la réhabilitation de ces systèmes sont encore possibles, mais peu de professionnels ont les compétences pour le réaliser. La plupart du temps, il est recommandé aux propriétaires de changer de technologie, du fait de la méconnaissance de ces systèmes par les ingénieurs.

Les municipalités québécoises Piopolis, Saint-Martyrs-Canadiens et Notre-Dame-de-Stanbridge,

Saint Valentin font usage de marais filtrants pour assainir les eaux usées. La ville de Québec diminue l'impact des eaux de ruissellement sur la qualité de l'eau d'un lac à proximité (Fig. 22). Les haltes routières de Rivière-Beaudette et Melbourne, le motel Colibri et l'Auberge le Baluchon sont aussi des instances québécoises connues qui utilisent cette phytotechnologie pour les eaux usées domestiques.

9.1.2 EAUX USÉES DOMESTIQUES RÉSIDENTIELLES

Le traitement des eaux usées domestiques des résidences isolées (6 chambres à coucher ou moins), des commerces (appelés autres bâtiments), des terrains de camping, etc., rejetant un débit de moins de 3 240 L/d et non connectés à un réseau d'assainissement collectif, doivent se conformer au *Règlement sur l'évacuation et le traitement des eaux usées des résidences isolées*, Ch. Q2, r.22 (2023) [78]. Un contrat d'entretien est d'ailleurs obligatoire lorsque le système est certifié et installé sur une propriété [79]. Ce sont les municipalités qui sont responsables de la mise en application de cette réglementation. Les diverses technologies permises pour traiter l'eau de ces sites sont notamment les fosses septiques avec champ d'épuration, les cabinets à fosses sèches, les fosses de rétention, etc. Mais ces technologies standards ne sont pas toujours applicables, notamment en raison du manque d'espace, de sols non perméables, etc. L'ensemble des technologies permises peuvent être consultées dans le guide suivant : « *Guide technique : Traitement des eaux usées des résidences isolées (2015)* » [79].

Les technologies non spécifiées dans ce guide, c.-à-d., les approches dites non conventionnelles, nécessitent une certification du Bureau des normes du Québec (BNQ) et doivent effectuer des tests sur un banc d'essai sur une période minimale d'un an. À ce jour, un seul système de marais filtrant a reçu les certifications nécessaires en 2003 (BNQ-3680-910). Anciennement nommé « *Le roseau épurateur* » de Roseau Épurateur Inc. puis « *Phytofiltre* » par HG Environnement, il est maintenant nommé « *Écophyltre* » et appartient aujourd'hui à Biofiltra Inc [80]. Une reprise des activités est amorcée par Biofiltra Inc., suggérant une nouvelle phase active d'implantations de marais filtrants.

9.1.3 EAUX USÉES INDUSTRIELLES

Les caractéristiques des eaux industrielles varient énormément selon la nature de l'industrie et du type de rejets. Par conséquent, les installations proposées sont analysées au cas par cas, et doivent faire l'objet d'une demande d'autorisation MELCCFP, conformément à l'Article 22 de la *Loi sur la qualité de l'environnement* [77].

Il existe une dizaine de marais filtrants liés aux effluents des industries à ce jour. Par exemple, l'usine Sartigan traite les eaux usées provenant du processus de séchage du bois par marais filtrant, alors que les fermes Valdo et Grégoire Fortin et font de même pour traiter les eaux laitières.

9.2 OBSTACLES AU DÉVELOPPEMENT DES MARAIS FILTRANTS AU QUÉBEC

Sans surprise, le climat est un enjeu considérant le gel hivernal, limitant l'utilisation libre de certains types de marais filtrants ou obligeant à des adaptations qui peuvent être contraignantes. Le très performant système Français, par exemple, ne pourrait pas être implanté à l'identique au Québec, sauf si utilisé de façon saisonnière, ce qui ne convient pas à tous les secteurs d'activité. De plus, la faible performance des marais filtrants comme la plupart des autres technologies de traitement de l'eau face à l'enlèvement du phosphore constitue un autre obstacle. L'ajout d'une étape distincte de traitement peut résoudre ce problème, mais vient tout même complexifier la chaîne de traitement. Les limites dans l'utilisation du roseau commun exotique (*Phragmites australis* subsp. *australis*) apportent aussi une contrainte supplémentaire, car bien que d'autres espèces aient déjà fait leurs preuves, l'utilisation de ce végétal n'en demeure pas moins une valeur sûre.

La réglementation n'est pas particulièrement favorable au développement des marais filtrants au Québec. Par exemple, l'efficacité du traitement est le plus souvent évaluée sur la base de la concentration des polluants en sortie de dispositif, ce qui sous-estime sa véritable performance. En effet, en raison de la quantité d'eau perdue par évapotranspiration, la quantité d'eau à la sortie du marais peut être significativement moindre qu'à son entrée. Ainsi, les polluants peuvent y être plus concentrés sans pour autant avoir augmenté en termes de charge. Le calcul de bilans de masse, où la charge brute des polluants à l'entrée et à la sortie serait mesurée, offre ainsi une meilleure appréciation de l'efficacité des marais filtrants qu'une simple comparaison des concentrations.

Le traitement des eaux usées résidentielles nécessite l'obtention de la certification BNQ qui est très coûteuse à obtenir et qui implique la mise en place d'un banc d'essai sur une période d'un an. Or, pour un marais filtrant, la première année

d'opération est peu représentative de son efficacité sur le long terme. D'une part, parce que l'enlèvement du phosphore y est surestimé, le substrat neuf étant en mesure d'adsorber le polluant avant que la saturation ne survienne et, d'autre part, parce que les végétaux prennent au moins un an avant d'atteindre leur maturité et jouer leur plein rôle épurateur. Une fois que la certification BNQ a été obtenue pour un système, toute future modification est proscrite ou exigerait une nouvelle certification (donc la mise en place d'un nouveau banc d'essai) ce qui décourage l'innovation.

Un autre obstacle majeur à l'établissement des marais filtrants au Québec est le manque d'expertise. Le traitement de l'eau relève du domaine de l'ingénierie et, jusqu'à tout récemment, les écoles d'ingénierie au Québec n'enseignaient peu ou pas du tout l'approche du traitement de l'eau par marais filtrant. En outre, la réputation des marais filtrants a souffert de l'inefficacité de certains systèmes déficients implantés au Québec.

9.3 POURQUOI RESTER OPTIMISTE?

D'une part, parce qu'au cours des 20 dernières années, plusieurs recherches québécoises ont permis d'évaluer des solutions pour pallier aux principaux obstacles de l'implantation des marais filtrants au Québec. Ces études ont testé l'efficacité d'espèces autres que le roseau commun, en développant des approches pour protéger les marais à flux vertical contre le gel hivernal et en testant des méthodes économiques et simples pour traiter le phosphore.

D'autre part, parce qu'il y a un intérêt grandissant au Québec pour des approches écologiques alternatives aux méthodes traditionnelles pour résoudre les problèmes environnementaux, comme en font foi les succès de la Société québécoise de phytotechnologie. Cet intérêt ne peut que se transmettre aux nouvelles cohortes d'étudiants en ingénierie, citoyens et décideurs qui expriment leur volonté à apprendre, développer et appliquer ces nouvelles approches.

10.0 EXEMPLES DE MARAIS FILTRANTS EXISTANTS

10.1 MARAIS SOUS SURFACIQUE À ÉCOULEMENT HORIZONTAL : AUBERGE LE BALUCHON



PHOTO JACQUES BRISSON

Type d'eau	Domestique
Volume moyen	135 m ³ /jour
Type de marais	Sous-surfacique à écoulement horizontal
Superficie du marais	4176 m ²
Espèces végétales	Roseau commun (<i>Phragmites australis</i> subsp. <i>australis</i>)
Localisation	Auberge le Baluchon, 3550 Chemin des Trembles, Saint-Paulin, QC J0K 3G0
Année de mise en fonction	2007
Conception	HG Environnement

Le marais filtrant implanté à l'Auberge Le Baluchon en 2007 épure les eaux usées des usagers. Un traitement primaire de ces eaux usées est réalisé à l'aide d'une fosse septique. Les eaux de cuisine plus chargées sont, quant à elles, dirigées vers un séparateur d'huiles et graisses, puis un bioréacteur pour être prétraitées avant d'être incorporées aux eaux usées à la sortie de la fosse septique. Une fois combinées, elles sont redirigées vers le traitement secondaire et tertiaire composé de quatre

marais filtrants sous-surfaciques à flux horizontal opérés en parallèle. Le substrat des marais est majoritairement du sable, de la matière organique et d'autres constituants minéraux possédant une bonne capacité d'adsorption. Une aération forcée est présente, grâce à des conduites d'air approvisionnées par un compresseur (diffuseur) pour un meilleur enlèvement du carbone et de l'azote.

10.2 MARAIS SOUS-SURFACIQUE À FLUX VERTICAL : SAINT-ROCH-DE-L'ACHIGAN



PHOTO SIMON AMIOT

Type d'eau	Eaux usées municipales
Volume moyen	200L/bâchées
Type de marais	Surfacique à écoulement vertical
Superficie du marais	45,2 m ²
Espèces végétales	Cultivar de saule : <i>Salix miyabeana</i> « SX67 »
Localisation	Saint-Roch-de-l'Achigan
Année de mise en fonction	2016, démantelé en 2018 (Projet PhytoVal-P)
Conception	Phytoval-P; équipe dirigée par Yves Comeau, professeur à Polytechnique Montréal

Cette installation a fait partie d'un projet de recherche scientifique (PhytoVal-P financé par le CRIBIQ et le CRSNG) pour le traitement des eaux usées municipales de Saint-Roch-de-l'Achigan entre 2015 et 2018. Un traitement primaire, constitué d'une unité mobile de traitement, a été installé en amont pour le traitement primaire des eaux usées. La particularité de ce marais filtrant est qu'il restait en fonction pendant la période hivernale. Effectivement, tous les tuyaux externes entre la fosse septique de décantation et les tuyaux de distribution ont été protégés du froid par des câbles chauffants, recouverts d'une feuille d'aluminium, en plus d'une isolation en mousse de polystyrène extrudé et d'un contreplaqué pour assurer une protection contre les précipitations et les températures

extrêmes de l'hiver québécois. Le marais était composé de quatre unités pilotes de surface individuelle (4,5 × 2,5 m) toutes alimentées également, possédant une profondeur de lit de 1,2 m. Le substrat était composé de diverses couches, de haut au bas; 30 cm d'un mélange de gravier (Ø 14 à 40 mm), 30 cm de gravier (Ø 2,5 à 5 mm), 30 cm de sable, 10 cm de gravier (Ø 2,5 à 5 mm), 5 cm de gravier (Ø 14 à 20 mm) et, au fond du bassin, 15 cm de gravier (Ø 20 à 40 mm). Cette composition du substrat offrait une capacité de filtration élevée. L'étude a démontré qu'un débit d'alimentation régulier permettait le bon fonctionnement des activités hivernales, en plus d'un enlèvement de la matière organique élevée [69].

10.3 MARAIS HYBRIDE : LA BIOSPHERE DE MONTRÉAL



PHOTO GILLES VINCENT

Type d'eau	Eaux usées des usagers du musée
Volume moyen	10 m ³ /jour
Type de marais	Hybride : Sous-surfacique et surfacique à écoulement horizontal.
Superficie du marais	800 m ²
Espèces végétales	Roseau commun (<i>Phragmites australis</i> subsp. <i>australis</i>), Scirpe lacustre (<i>Scirpus lacustris</i>), Quenouille à feuille large (<i>Typha latifolia</i>), Élodée du Canada (<i>Elodea canadensis</i>) et Iris versicolore (<i>Iris versicolor</i>).
Localisation	La biosphère, île Notre-Dame, Montréal
Année de mise en fonction	1995
Conception	Projet de collaboration : Michel Radoux (Fondation Universitaire Luxembourgeoise), JeanLouis Breton (Sodenco Inc.), Marc Marin (Groupe Steica Inc), Jacques Trottier (Soprin Inc), Gilles Vincent (Jardin botanique de Montréal)

En 1995, la Biosphère, un musée de l'Environnement, implante un marais filtrant hybride pour traiter ses eaux usées. Ce marais hybride est composé de trois types de marais; un marais sous-surfacique à écoulement horizontal, un à écoulement vertical et un marais filtrant surfacique. Le traitement primaire de ce système est une fosse septique. Le premier marais, le marais sous-surfacique horizontal possède une superficie de 400 m² et contient l'espèce végétale aujourd'hui interdite, le roseau commun (*Phragmites australis* subsp. *australis*). Il est divisé en deux lits indépendants, pouvant fonctionner simultanément ou en alternance. À la suite de son séjour dans le premier marais, l'eau passe dans le deuxième bassin surfacique, d'environ 300 m² colonisé de scirpes lacustres, de quenouilles à feuilles larges et d'iris versicolore. Finalement, l'eau est dirigée vers la dernière unité, le marais surfacique, divisé en deux profondeurs (2 x 50 m²), une zone peu profonde où se trouve la menthe du Canada et ensuite un bassin plus profond (1 m) planté d'élodée du Canada [81]. Depuis son établissement, la végétation des différents marais a grandement évolué, et le roseau commun a essentiellement colonisé l'ensemble du système au détriment des autres espèces. Le traitement est resté performant malgré ce changement, ce qui n'est pas étonnant considérant l'efficacité connue de ce roseau en marais filtrant. Au moment d'écrire ces lignes, le système avait été désactivé depuis quelques années, mais une mise à jour prochaine est prévue.

10.4 BASSIN FILTRANT : K8

PHOTO YVES POITEVIN

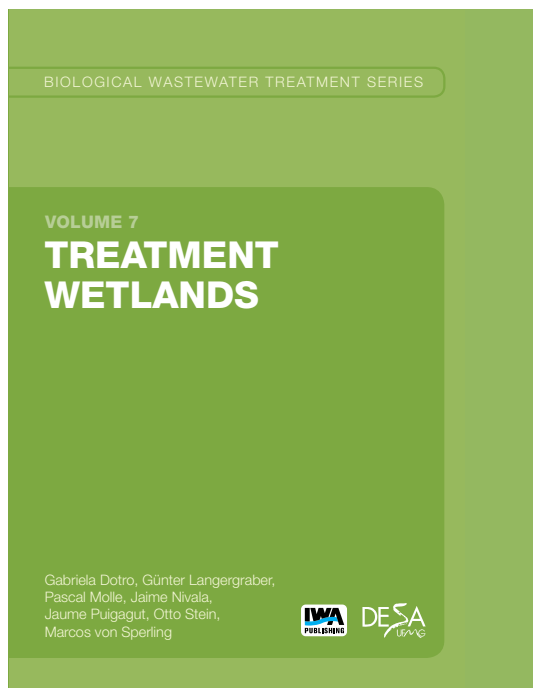


Type d'eau	Eaux souterraines contaminées
Volume moyen	60 – 129 m ³ /jour
Type de marais	Surfacique à écoulement horizontal
Superficie du marais	1800 m ²
Espèces végétales	Grand nénuphar jaune (<i>Nuphar variegata</i>), Jonc épars (<i>Juncus effusus</i>), Myrique baumier (<i>Myrica gale</i>), Pontédérie cordée (<i>Pontederia cordata</i>), Potamot émergé (<i>Potamogeton epihydrus</i>), Quenouille à feuilles larges (<i>Typha latifolia</i>), Scirpe cyprès (<i>Scirpus cyperinus</i>), Acore odorant (<i>Acorus calamus</i>), Rubanier à fruits verts (<i>Sparganium emersum</i>), Saule discoloré (<i>Salix discolor</i>), Saule noir (<i>Salix nigra</i>), etc.
Localisation	Emplacement délimité par la rue Sainte-Catherine, le boulevard Montréal-Est, la rue Sherbrooke et l'avenue Durocher. Ville de Montréal-Est.
Année de mise en fonction	Construction en 2018 et mise en fonction en 2019
Conception	Yves Poitevin, B.A.P. architecte paysagiste, CDGU ingénierie urbaine, Institut de recherche en biologie végétale et Fiducie des Installations pétrochimiques de Montréal-Est.

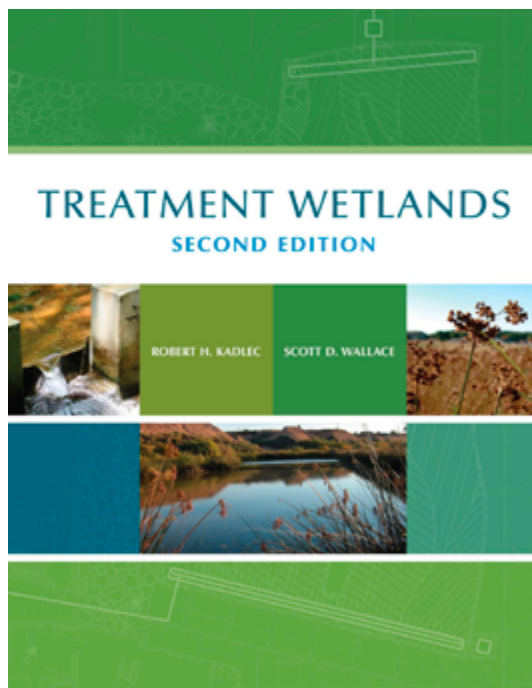
Ce bassin filtrant traite les eaux souterraines contaminées d'un secteur nommé « Zone K8 » dans la municipalité de Montréal-Est. Ces eaux souterraines sont polluées par plusieurs contaminants : hydrocarbures pétroliers (C10-C50), hydrocarbures aromatiques polycycliques, benzène, toluène, éthylbenzène et xylène, isopropylbenzène et autres composés organiques volatils et des composés phénoliques. À l'aide de 25 puits et pompes, cette eau souterraine est acheminée vers la surface et dirigée vers le marais filtrant surfacique. L'ouvrage est composé de plusieurs bassins de profondeurs variées, dont un bassin de décantation et une cascade permettant l'oxygénation

de l'eau en amont du dispositif, et possède une grande variété de végétaux. Depuis sa mise en fonction, la quenouille à feuilles larges a colonisé l'ensemble des bassins et son développement est contrôlé, essentiellement par arrachage des rhizomes surnuméraires. L'eau circule à travers les méandres, sur une durée moyenne d'environ 150 minutes et est recircularisée pour un séjour minimal de 48 heures dans le bassin filtrant. L'eau est traitée par le système tout l'année. L'eau traitée pourrait être ensuite directement acheminée vers l'égout municipal; toutefois, elle est actuellement envoyée dans un bassin de traitement de Parachem, une compagnie située à proximité [82].

II.0 OUTILS EN LIGNE, GUIDES ET RESSOURCES



Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., & Von Sperling, M. (2017). Treatment wetlands (p. 172). IWA publishing.



Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2008). Treatment wetlands. Second Edition. CRC press.



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.phyto-techno.com.



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.

12.0 DROITS DE REPRODUCTION

Comment citer :

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.

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 telle que mentionné ci-haut;
- 🍃 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

INFO@PHYTOTECHNO.COM



PHOTO INSTITUT DE RECHERCHE EN BIOLOGIE VÉGÉTALE.

13.0 RÉFÉRENCES

- [1] 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>
- [2] Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2008). *Treatment wetlands*. Second Edition. CRC press.
- [3] Seidel, K. (1955). Die Flechtbinse, *Scirpus Lacustris* L. *Ökologie, Morphologie und Entwicklung, ihre Stellung bei den Völkern und ihre Wirtschaftliche Bedeutung*. Stuttgart, Germany, p 37-52.
- [4] Kotsia, D., Deligianni, A., Fyllas, N. M., Stasinakis, A. S., & Fountoulakis, M. S. (2020). Converting treatment wetlands into "treatment gardens" : Use of ornamental plants for greywater treatment. *Science of the Total Environment*, 744, 140889.
- [5] Hammer, D. A., Pullin, B. P., McCaskey, T. A., Eason, J., & Payne, V. W. E. (2020). Treating livestock wastewaters with constructed wetlands. In *Constructed wetlands for water quality improvement* (pp. 343-347). CRC Press.
- [6] Rozema, E. R., VanderZaag, A. C., Wood, J. D., Drizo, A., Zheng, Y., Madani, A., & Gordon, R. J. (2016). Constructed wetlands for agricultural wastewater treatment in Northeastern North America : A review. *Water*, 8(5), 173.
- [7] Huang, X. F., Ye, G. Y., Yi, N. K., Lu, L. J., Zhang, L., Yang, L. Y.,... & Liu, J. (2019). Effect of plant physiological characteristics on the removal of conventional and emerging pollutants from aquaculture wastewater by constructed wetlands. *Ecological Engineering*, 135, 45-53.
- [8] Terzakis, S., Fountoulakis, M. S., Georgaki, I., Albantakis, D., Sabathianakis, I., Karathanasis, A. D.,... & Manios, T. (2008). Constructed wetlands treating highway runoff in the central Mediterranean region. *Chemosphere*, 72(2), 141-149.
- [9] Higgins, M. J., Rock, C. A., Bouchard, R., & Wengrezynek, B. (2020). Controlling agricultural runoff by use of constructed wetlands. In *Constructed wetlands for water quality improvement* (pp. 359-367). CRC Press.
- [10] Karathanasis, A. D., & Johnson, C. M. (2003). Metal removal potential by three aquatic plants in an acid mine drainage wetland. *Mine Water and the Environment*, 22, 22-30.
- [11] Johnson, K. D., Martin, C. D., Moshiri, G. A., & McCrory, W. C. (2018). Performance of a constructed wetland leachate treatment system at the Chunchula Landfill, Mobile County, Alabama. In *Constructed Wetlands for the Treatment of Landfill Leachates* (pp. 57-70). CRC Press.
- [12] Vymazal, J. (2010). Constructed wetlands for wastewater treatment. *Water*, 2(3), 530-549.
- [13] Wallace, S. D. (1999, November). On-site remediation of petroleum contact wastes using subsurface-flow wetlands. In *Wetlands & Remediation II : Second International Conference on Wetlands & Remediation* (pp. 125-132).
- [14] Billore, S. K., Singh, N., Ram, H. K., Sharma, J. K., Singh, V. P., Nelson, R. M., & Dass, P. (2001). Treatment of a molasses based distillery effluent in a constructed wetland in central India. *Water Science and Technology*, 44(11-12), 441-448.
- [15] Finlayson, M., Chick, A., Von Oertzen, I., & Mitchell, D. (1987). Treatment of piggery effluent by an aquatic plant fiber. *Biological Wastes*, 19(3), 179-196.
- [16] Revitt, D. M., Shutes, R. B. E., Jones, R. H., Forshaw, M., & Winter, B. (2004). The performances of vegetative treatment systems for highway runoff during dry and wet conditions. *Science of the Total Environment*, 334, 261-270.
- [17] McGill, R., Basran, D., Flindall, R., & Pries, J. (2000). Vertical-flow constructed wetland for the treatment of glycol-laden stormwater runoff at Lester B. Pearson International Airport. In *Proceedings of the 7th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control* (pp. 1080-1081). Lake Buena Vista, FL, USA : University of Florida and IWA.
- [18] Kern, J., & Idler, C. (1999). Treatment of domestic and agricultural wastewater by reed bed systems. *Ecological Engineering*, 12(1-2), 13-25.
- [19] Aslam, M. M., Malik, M., Baig, M. A., Qazi, I. A., & Iqbal, J. (2007). Treatment performances of compost-based and gravel-based vertical flow wetlands operated identically for refinery wastewater treatment in Pakistan. *Ecological engineering*, 30(1), 34-42.
- [20] Société québécoise de phytotechnologie (2014). LES LITS DE SÉCHAGE PLANTÉS DE MACROPHYTES. Fiches techniques de la SQP. www.phytotechno.com
- [21] Pavlineri, N., Skoulikidis, N. T., & Tsihrintzis, V. A. (2017). Constructed floating wetlands : a review of research, design, operation and management aspects, and data meta-analysis. *Chemical Engineering Journal*, 308, 1120-1132.

- [22] Shahid, M. J., Arslan, M., Ali, S., Siddique, M., & Afzal, M. (2018). Floating wetlands : a sustainable tool for wastewater treatment. *Clean–Soil, Air, Water*, 46(10), 1800120.
- [23] Borne, K. E. (2014). Floating treatment wetland influences on the fate and removal performance of phosphorus in stormwater retention ponds. *Ecological engineering*, 69, 76-82.
- [24] Chen, Z., Kuschik, P., Paschke, H., Kästner, M., Müller, J. A., & Köser, H. (2014). Treatment of a sulfate-rich groundwater contaminated with perchloroethene in a hydroponic plant root mat filter and a horizontal subsurface flow constructed wetland at pilot-scale. *Chemosphere*, 117, 178-184.
- [25] Wu, Q. T., Gao, T., Zeng, S., & Chua, H. (2006). Plant-biofilm oxidation ditch for in situ treatment of polluted waters. *Ecological Engineering*, 28(2), 124-130.
- [26] Bédard, L. et J. Brisson. 2025. LES MARAIS FILTRANTS. *Guides techniques de la Société québécoise de phytotechnologie*. Université de Montréal et Société québécoise de phytotechnologie. www.phytotechno.com.
- [27] 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.
- [28] Rosenqvist, H., Aronsson, P., Hasselgren, K., & Perttu, K. (1997). Economics of using municipal wastewater irrigation of willow coppice crops. *Biomass and Bioenergy*, 12(1), 1-8.
- [29] Venturi, P., Gigler, J. K., & Huisman, W. (1999). Economical and technical comparison between herbaceous (*Miscanthus x giganteus*) and woody energy crops (*Salix viminalis*). *Renewable Energy*, 16(1-4), 1023-1026.
- [30] Bédard, L. et J. Brisson. 2025. LES MARAIS FILTRANTS À EFFLUENT NUL. *Guides techniques de la Société québécoise de phytotechnologie*. Université de Montréal et Société québécoise de phytotechnologie. www.phytotechno.com.
- [31] Liu, Y., Liu, X., Lu, S., Zhao, B., Wang, Z., Xi, B., & Guo, W. (2020). Adsorption and biodegradation of sulfamethoxazole and ofloxacin on zeolite : Influence of particle diameter and redox potential. *Chemical engineering journal*, 384, 123346.
- [32] Hussain, S. A., & Prasher, S. O. (2011). Understanding the sorption of ionophoric pharmaceuticals in a treatment wetland. *Wetlands*, 31, 563-571.
- [33] Tolker-Nielsen, T. (2015). Biofilm development. *Microbial Biofilms*, 51-66.
- [34] Liang, W., Wu, Z. B., Cheng, S. P., Zhou, Q. H., & Hu, H. Y. (2003). Roles of substrate microorganisms and urease activities in wastewater purification in a constructed wetland system. *Ecological Engineering*, 21(2-3), 191-195.
- [35] Nguyen, P. M., Afzal, M., Ullah, I., Shahid, N., Baqar, M., & Arslan, M. (2019). Removal of pharmaceuticals and personal care products using constructed wetlands : effective plant-bacteria synergism may enhance degradation efficiency. *Environmental science and pollution research*, 26, 21109-21126.
- [36] Dotro, G., Langergraber, G., Molle, P., Nivala, J., Puigagut, J., Stein, O., & Von Sperling, M. (2017). *Treatment wetlands* (p. 172). IWA publishing.
- [37] Henze, M., van Loosdrecht, M. C., Ekama, G. A., & Brdjanovic, D. (Eds.). (2008). *Biological wastewater treatment*. IWA publishing.
- [38] Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the total environment*, 380(1-3), 48-65.
- [39] Reddy, K. R. (1994). Soil Processes Regulating Water Quality in Wetlands.
- [40] Duffus, J. H. (2002). « Heavy metals » a meaningless term? (IUPAC Technical Report). *Pure and applied chemistry*, 74(5), 793-807.
- [41] R. H. Kadlec et R. L. Knight (1996). *Treatment Wetlands*. Lewis Publishers, New York., vol. 81, 1996.
- [42] Yu, G., Li, P., Wang, G., Wang, J., Zhang, Y., Wang, S., ... & Chen, H. (2021). A review on the removal of heavy metals and metalloids by constructed wetlands: bibliometric, removal pathways, and key factors. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 37(9), 157.
- [43] Březinová, T., & Vymazal, J. (2015). Evaluation of heavy metals seasonal accumulation in *Phalaris arundinacea* in a constructed treatment wetland. *Ecological Engineering*, 79, 94-99.
- [44] Weber, K. P., & Legge, R. L. (2008). Pathogen removal in constructed wetlands. *Wetlands : Ecology, Conservation & Restoration*, 1-35.

- [45] Schröder, P., Navarro-Aviñó, J., Azaiz, H., Goldhirsh, A. G., DiGregorio, S., Komives, T.,... & Wissing, F. (2007). Using phytoremediation technologies to upgrade waste water treatment in Europe. *Environmental Science and Pollution Research-International*, 14, 490-497.
- [46] Nawaz, T., & Sengupta, S. (2019). Contaminants of emerging concern : occurrence, fate, and remediation. In *Advances in water purification techniques* (pp. 67-114). Elsevier.
- [47] Zhang, J., Sun, B., Xiong, X., Gao, N., Song, W., Du, E.,... & Zhou, G. (2014). Removal of emerging pollutants by Ru/TiO₂-catalyzed permanganate oxidation. *Water Research*, 63, 262-270.
- [48] Matamoros, V., & Bayona, J. M. (2008). Behavior of emerging pollutants in constructed wetlands. *Emerging Contaminants from Industrial and Municipal Waste : Removal Technologies*, 199-217.
- [49] Brix, H. (1997). Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water science and technology*, 35(5), 11-17.
- [50] Brix, H. (2003, May). Plants used in constructed wetlands and their functions. In *1st International Seminar on the use of Aquatic Macrophytes for Wastewater Treatment in Constructed Wetlands*, edit. Dias V., Vymazal J. Lisboa, Portugal (pp. 81-109).
- [51] Bowden, W. B., Glime, J. M., & Riis, T. (2017). Macrophytes and bryophytes. In *Methods in Stream Ecology, Volume 1* (pp. 243-271). Academic Press.
- [52] Tanner, C. C. (1996). Plants for constructed wetland treatment systems – a comparison of the growth and nutrient uptake of eight emergent species. *Ecological engineering*, 7(1), 59-83.
- [53] Muerdter, C. P., Smith, D. J., & Davis, A. P. (2020). Impact of vegetation selection on nitrogen and phosphorus processing in bioretention containers. *Water Environment Research*, 92(2), 236-244.
- [54] Ravichandran, M. K., Yoganathan, S., & Philip, L. (2021). Removal and risk assessment of pharmaceuticals and personal care products in a decentralized greywater treatment system serving an Indian rural community. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6), 106832.
- [55] Fraser, L. H., Carty, S. M., & Steer, D. (2004). The interacting effects of temperature and plant community type on nutrient removal in wetland microcosms. *Bioresource Technology*, 94, 185-192.
- [56] Brisson, J., Rodriguez, M., Martin, C. A., & Proulx, R. (2020). Plant diversity effect on water quality in wetlands : a meta-analysis based on experimental systems. *Ecological Applications*, 30(4), e02074.
- [57] Du, Y., Pan, K., Yu, C., Luo, B., Gu, W., Sun, H.,... & Chang, J. (2018). Plant diversity decreases net global warming potential integrating multiple functions in microcosms of constructed wetlands. *Journal of Cleaner Production*, 184, 718-726.
- [58] Vymazal, J. (2011). Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow : a review. *Hydrobiologia*, 674(1), 133-156.
- [59] Rodríguez, M., & Brisson, J. (2015). Pollutant removal efficiency of native versus exotic common reed (*Phragmites australis*) in North American treatment wetlands. *Ecological engineering*, 74, 364-370.
- [60] Jodoin, Y., Lavoie, C., Villeneuve, P., Theriault, M., Beaulieu, J., & Belzile, F. (2008). Highways as corridors and habitats for the invasive common reed *Phragmites australis* in Quebec, Canada. *Journal of applied ecology*, 45(2), 459-466.
- [61] Grebenshchykova, Z., Frédette, C., Chazarenc, F., Comeau, Y., & Brisson, J. (2020). Establishment and potential use of woody species in treatment wetlands. *International journal of phytoremediation*, 22(3), 295-304.
- [62] Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MELCC]. (2023). *Guide pour l'étude des technologies conventionnelles de traitement des eaux usées d'origine domestique*. Direction des politiques du secteur municipal. Service de l'expertise technique en eau. Gouvernement du Québec.
- [63] Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2008). *Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow* (Vol. 14). Springer science & business media.
- [64] Griffin, P. W. L. C., Wilson, L., & Cooper, D. (2008, November). Changes in the use, operation and design of sub-surface flow constructed wetlands in a major UK water utility. In *Proceedings of the 11th International Conference on Wetland Systems for Water Pollution Control* (pp. 1-7). Vikram University and IWA Indore, India.
- [65] Wallace, S. D., & Knight, R. L. (2006). Small-scale constructed wetland treatment systems : feasibility, design criteria, and O&M requirements. (No Title).

- [66] Rani, S. H. C., Din, M., Md, F., Yusof, M., Mohd, B., & Chelliapan, S. (2011). Overview of Subsurface Constructed Wetlands Application in Tropical Climates. *Universal Journal of Environmental Research & Technology*, 1(2).
- [67] Brix, H. (1994). Functions of macrophytes in constructed wetlands. *Water Science and Technology*, 29(4), 71-78.
- [68] Société québécoise de phytotechnologie. 2024. L'ENTRETIEN DES PHYTOTECNOLOGIES, Fiches techniques de la Société québécoise de phytotechnologie. 47 pages. www.phytotechno.com.
- [69] Grebenshchykova, Z., Brisson, J., Chazarenc, F., & Comeau, Y. (2020). Two-year performance of single-stage vertical flow treatment wetlands planted with willows under cold-climate conditions. *Ecological Engineering*, 153, 105912.
- [70] Perdana, M. C., Sutanto, H. B., & Prihatmo, G. (2018, April). Vertical Subsurface Flow (VSSF) constructed wetland for domestic wastewater treatment. In *IOP Conference Series : Earth and Environmental Science* (Vol. 148, p. 012025). IOP Publishing
- [71] Zhu, S. X., Ge, H. L., Ge, Y., Cao, H. Q., Liu, D., Chang, J.,... & Chang, S. X. (2010). Effects of plant diversity on biomass production and substrate nitrogen in a subsurface vertical flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, 36(10), 1307-1313.
- [72] Koottatep, T., Polprasert, C., Oanh, N. T. K., Heinss, U., Montangero, A., & Strauss, M. (2001). Septage dewatering in vertical-flow constructed wetlands located in the tropics. *Water Science and Technology*, 44(2-3), 181-188.
- [73] Brix, H., & Johansen, N. H. (2004). Guidelines for the Establishment of Reed Bed Systems up to 30 PE. Århus, Økologisk Byfornyelse og Spildevandsrensning No.52, Miljøstyrelsen. Miljøministeriet, Copenhagen, Denmark (in Danish), 2004.
- [74] Wallace, S., Nivala, J., & Meyers, T. (2008). Statistical analysis of treatment performance in aerated and nonaerated subsurface flow constructed wetlands. *Wastewater treatment, plant dynamics and management in constructed and natural wetlands*, 171-180.
- [75] 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.
- [76] Ayaz, S. C., Aktaş, Ö., Findık, N., Akça, L., & Kınacı, C. (2012). Effect of recirculation on nitrogen removal in a hybrid constructed wetland system. *Ecological Engineering*, 40, 1-5.
- [77] Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs [MELCCFP]. (2023). *Guide pour l'étude des technologies conventionnelles de traitement des eaux usées d'origine domestique – version préliminaire*. Gouvernement du Québec.
- [78] Gouvernement du Québec. *Règlement sur l'évacuation et le traitement des eaux usées des résidences isolées*. [En ligne, consulté le 18-10-2023] <https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/rc/Q-2,%20r.%2022/20150302>
- [79] Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs [MELCCFP]. (2015). *Guide technique sur le traitement des eaux usées des résidences isolées*. Gouvernement du Québec.
- [80] Biofiltra. (2020). *Écophyltre : notre solution marais filtrants*. [En ligne, consulté le 17-03-2024]. Available : <https://www.biofiltra.ca>.
- [81] Brisson, J., & Vincent, G. (2009). The treatment wetland of the Montreal Biosphere : 15 years later. *IWA specialist group on use of macrophytes in water pollution control. Newsletter*, 35, 35-39.
- [82] Fiducie des installations pétrochimiques de Montréal-Est. *Description du projet*. [En ligne, consulté le 11-03-2024] <https://www.fipme.ca/description-projet.html>