

# Guide pour l'étude des technologies conventionnelles de traitement des eaux usées d'origine domestique

## 8. Marais artificiels – Préliminaire

### **Coordination et rédaction**

Cette publication a été réalisée par la Direction des eaux usées municipales (DEUM) du ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). Elle a été produite par la Direction des communications du MELCCFP.

### **Renseignements**

Téléphone : 418 521-3830  
1 800 561-1616 (sans frais)

Formulaire : [www.environnement.gouv.qc.ca/formulaires/renseignements.asp](http://www.environnement.gouv.qc.ca/formulaires/renseignements.asp)  
Internet : [www.environnement.gouv.qc.ca](http://www.environnement.gouv.qc.ca)

### **Pour obtenir un exemplaire du document :**

Visitez notre site Web : [www.environnement.gouv.qc.ca](http://www.environnement.gouv.qc.ca)

Dépôt légal – 2023  
Bibliothèque et Archives nationales du Québec

Tous droits réservés pour tous les pays.

© Gouvernement du Québec – 2023

# Table des matières

<b>Liste des tableaux</b>	<b>8-vi</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>8-vii</b>
<b>Remerciements</b>	<b>8-viii</b>
<b>8. Marais artificiels</b>	<b>8-1</b>
<b>8.1 Généralités</b>	<b>8-1</b>
8.1.1 Descriptif de la technologie	8-1
8.1.2 Historique des installations au Québec et ailleurs	8-1
8.1.3 Plantes	8-2
<b>8.2 Conditions de conception</b>	<b>8-5</b>
8.2.1 Traitement préalable	8-5
8.2.2 Débits et charges	8-5
8.2.3 Facteurs de pointe	8-5
8.2.4 Température	8-5
8.2.5 Redondance	8-6
8.2.6 Bruit de fond	8-6
8.2.7 Évapotranspiration	8-6
8.2.8 Colmatage	8-6
<b>8.3 Marais à écoulement vertical</b>	<b>8-8</b>
8.3.1 Conditions de conception	8-9
8.3.2 Critères de conception	8-9
8.3.3 Alimentation en eaux usées	8-11
8.3.4 Collecte et évacuation de l'effluent	8-11
8.3.5 Aération	8-11
8.3.6 Terrassement et digues	8-12
<b>8.4 Marais à écoulement horizontal sous la surface</b>	<b>8-13</b>

8.4.1	Conditions de conception	8-14
8.4.2	Critères de conception	8-15
8.4.3	Milieu filtrant	8-19
8.4.4	Géométrie	8-20
8.4.5	Dispositifs d'entrée et de sortie	8-21
8.4.6	Terrassement et digues	8-21
<b>8.5</b>	<b>Marais à écoulement en surface</b>	<b>8-23</b>
8.5.1	Conditions de conception	8-23
8.5.2	Critères de conception	8-24
8.5.3	Hauteur d'eau	8-26
8.5.4	Géométrie	8-26
8.5.5	Dispositifs d'entrée et de sortie	8-27
8.5.6	Terrassement et digues	8-28
<b>8.6</b>	<b>Autres types de marais</b>	<b>8-29</b>
8.6.1	Systèmes hybrides	8-29
8.6.2	Bassins avec plantes aquatiques flottantes	8-29
8.6.3	Autres variantes	8-29
<b>8.7</b>	<b>Performances épuratoires</b>	<b>8-31</b>
8.7.1	Marais à écoulement vertical	8-31
8.7.2	Marais à écoulement horizontal sous la surface	8-31
8.7.3	Marais à écoulement en surface	8-33
8.7.4	Systèmes hybrides	8-33
<b>8.8</b>	<b>Installation</b>	<b>8-35</b>
8.8.1	Imperméabilisation	8-35
8.8.2	Mise en place des matériaux	8-35
8.8.3	Dispositifs d'entrée et de sortie	8-35
8.8.4	Accès au site	8-35

<b>8.9 Exploitation</b>	<b>8-37</b>
<b>8.10Résumé</b>	<b>8-38</b>
<b>8.11Références bibliographiques</b>	<b>8-40</b>

PRÉLIMINAIRE

## Liste des tableaux

Tableau 8.2-1 – Applications des différents types de marais artificiels .....	8-5
Tableau 8.4.2-1 – Paramètres du modèle de Reed et collab. (1995) .....	8-16
Tableau 8.4.2-2 – Caractéristiques des milieux filtrants des marais .....	8-16
Tableau 8.4.2-3 – Valeurs moyennes des coefficients pour l’approche basée sur le P-k-C* .....	8-18
Tableau 8.5.2-1 – Paramètres du modèle de Reed et collab. (1995) pour un marais à écoulement en surface .....	8-25
Tableau 8.5.2-2 – Paramètres du modèle de Kadlec et Knight (1996) pour un marais à écoulement en surface .....	8-26
Tableau 8.7.1-1 – Rendements des marais à écoulement vertical .....	8-31
Tableau 8.7.2-1 – Rendements moyens de marais à écoulement horizontal sous la surface ....	8-32
Tableau 8.7.3-1 – Rendement moyen des marais à écoulement en surface .....	8-33
Tableau 8.7.4-1 – Rendements moyens du système hybride de la Biosphère de Montréal .....	8-34

## Liste des figures

Figure 8.1.3-1 – Exemples de plantes .....	8-3
Figure 8.2.8-1 – Marais à écoulement vertical .....	8-8
Figure 8.3.6-1 – Marais à écoulement horizontal sous la surface.....	8-13
Figure 8.4.6-1 – Marais à écoulement en surface .....	8-23
Figure 8.8.4-1 – Exemples de dispositifs d’ajustement du niveau.....	8-36

PRÉLIMINAIRE

## Remerciements

### **Équipe de rédaction de FNX-INNOV**

Marc-André Desjardins, ing., Ph. D. – chargé de projet

Justine Duguet, ing., M. Sc. A. – chargée de projet adjointe et coordonnatrice

Pascale Mazerolle, ing., M. ing.

Et les autres ingénieurs du Service de traitement des eaux de FNX-INNOV.

### **Équipe de révision du MELCCFP**

Héloïse Bastien, ing., M. Sc. A. – DEUM – chargée de projet

Bernard Lavallée, ing., Ph. D. – DEUM

Bernard Patry, ing., Ph. D. – DPEU

### **Experts consultés (par ordre alphabétique de nom de famille)**

Yves Comeau, ing., Ph. D. – Polytechnique Montréal

Alain Roy, ing, M. Ing., et Dorothée Benoit, ing. – MAMH

Christian Vézina, ing. – Avizo Experts-Conseils

PRÉLIMINAIRE

## 8. Marais artificiels

### 8.1 Généralités

#### 8.1.1 Descriptif de la technologie

Les marais artificiels utilisés pour le traitement des eaux usées domestiques sont constitués d'un lit de sol ou d'un autre milieu, tel que du gravier ou du sable, sur lequel sont plantés des végétaux qui y développent un important réseau racinaire. L'assainissement des eaux usées s'effectue au moyen d'une combinaison de processus physiques, chimiques et biologiques, incluant la sédimentation, la précipitation, l'adsorption sur les particules de sol, l'assimilation par les plantes et les transformations microbiologiques.

#### 8.1.2 Historique des installations au Québec et ailleurs

Le traitement des eaux usées par marais artificiels a commencé à prendre de l'ampleur grâce aux travaux du Dr Seidel dans les années 1950-1960. On a alors proposé un système à étages multiples, appelé Max-Planck-Institute-Process ou Krefeld System, composé de deux premiers étages à écoulement vertical suivi d'étages à écoulement horizontal. La technologie des marais artificiels s'est alors répandue en Europe, puis à partir du milieu des années 1980 en Amérique du Nord. Cette technologie en forte demande en Amérique centrale, en Europe de l'Est et en Asie (Cole, 1998) est aussi utilisée sur le continent australien. Kadlec (2004, cité par Wallace et Knight, 2006) estime à plus de 50 000 le nombre total d'installations de type marais artificiel pour le traitement des eaux usées à travers le monde. La gamme de capacités des installations est très large, allant de systèmes servant des résidences isolées jusqu'à des stations d'épuration de dizaines de milliers de mètres cubes par jour.

Les marais artificiels ont été introduits au Québec à partir du début des années 1990 après la publication d'études sur les techniques de remplacement applicables à l'assainissement des eaux usées des petites agglomérations, coordonnées par la Société québécoise d'assainissement des eaux (SQAE). L'approche alors privilégiée est décrite en détail dans le guide technique intitulé *Systèmes de traitement des eaux usées par marais artificiels*, préparé par Les Consultants RSA, en janvier 1993. On compte actuellement environ 19 installations municipales de type marais artificiel (ou roseaux<sup>1</sup>) au Québec (MELCC, 2021).

Les marais artificiels peuvent prendre différentes formes selon le mode d'écoulement, les types de plantes, le milieu filtrant, etc. Les systèmes composés de plantes émergentes sont les plus répandus, mais il existe aussi des systèmes à base de plantes submergées, semi-aquatiques ou flottantes.

Les marais artificiels à base de plantes émergentes ou flottantes peuvent être :

1. à écoulement vertical ;
2. à écoulement horizontal sous la surface ;
3. à écoulement en surface.

Les types de marais artificiels les plus souvent utilisés dans le monde sont :

- ceux à écoulement en surface ;
- ceux à écoulement horizontal sous la surface.

---

<sup>1</sup> Variante de marais artificiel soumise à une fiche du CNTTEU et dont la conception n'est pas abordée dans le présent chapitre.

- les systèmes hybrides composés d'unités à écoulement vertical suivies d'unités à écoulement horizontal sous la surface ;
- les systèmes composés uniquement d'unités à écoulement vertical en série, qualifiés de « filière française ». Ce type de marais n'est pas abordé dans le présent chapitre.

### 8.1.3 Plantes

#### 8.1.3.1 Types de plantes

*Compte tenu du caractère envahissant du roseau commun exotique (Phragmites australis), le Ministère n'autorise plus de nouveaux systèmes de marais artificiels utilisant cette plante. Seuls les marais artificiels utilisant des plantes non envahissantes peuvent être implantés au Québec. Les roseaux communs exotiques présents dans les marais artificiels déjà existants n'ont pas à être remplacés, mais tout agrandissement d'un marais artificiel existant doit être effectué avec des plantes non envahissantes.*

Les performances de traitement des marais à infiltration sous-surfacique semblent peu liées à l'espèce de végétaux sélectionnée (Brisson et collab., 2006). Les macrophytes émergents sélectionnés devraient néanmoins présenter un système racinaire assez important pour fournir la surface nécessaire à la croissance microbienne et maintenir des conditions hydrauliques adéquates dans le substrat (en évitant le colmatage).

Les types de plantes émergentes répertoriés dans les marais artificiels sont principalement les *Typha* (quenouilles) et les scirpes<sup>2</sup>, mais aussi les *Sagittaria latifolia* (sagittaires à larges feuilles) et les *Phalaris arundinacea* (alpistes faux-roseau)<sup>3</sup> (Davis, 1995; Wallace and Knight, 2006; Kadlec et Wallace, 2009; Crites et collab., 2014; Dotro et collab., 2017). Dotro et collab. (2017) font également mention d'installations dans des climats tempérés ou froids qui ont donné des résultats très prometteurs avec l'utilisation de saules.

Les quenouilles sont des plantes à croissance rapide qui se propagent par les rhizomes. En un an, elles fournissent une couverture dense du marais avec des espacements d'environ 0,6 m entre chaque plant. La pénétration de leurs racines dans le sol est relativement superficielle ; jusqu'à environ 0,3 m de profond. Il est donc nécessaire d'ajuster la profondeur du milieu filtrant pour leur utilisation dans des marais à écoulement sous-surfacique. Ces plantes peuvent être submergées par plus de 0,3 m d'eau, mais tolèrent également des périodes de sécheresse (Crites et collab., 2014). Les espèces les plus communément rencontrées dans les marais artificiels sont les *Typha angustifolia* (massette à feuilles étroites) et les *Typha latifolia* (massette à larges feuilles) (Davis, 1995 ; Crites et collab., 2014).

Les scirpes ont une croissance modérée à rapide selon l'espèce. L'espacement des plants varie de 0,3 à 0,6 m. La pénétration de leurs racines dans le gravier est variable selon les espèces et peut atteindre environ 0,6 m. La plupart des espèces de scirpes peuvent être submergées en permanence par 0,15 m à 0,3 m d'eau, et certaines peuvent tolérer des conditions de sécheresse (Crites et collab., 2014).

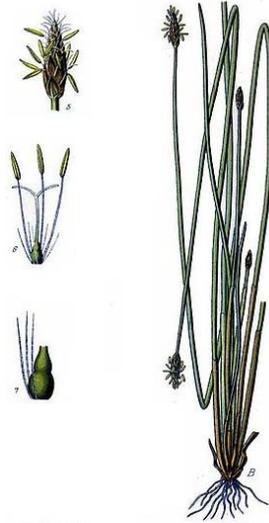
La Figure 8.1.3-1 présente différents exemples de plantes émergentes utilisées dans les marais artificiels.

<sup>2</sup> Dans la littérature, le terme « scirpe » regroupe souvent les plantes de la famille des *Cyperaceae* dont les genres *Scirpus* et *Schoenoplectus*.

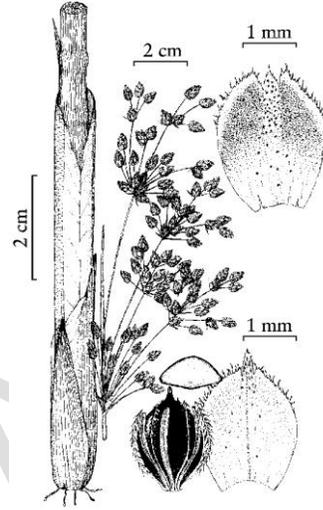
<sup>3</sup> Étant donné le caractère envahissant de l'alpiste roseau exotique, on doit éviter l'utilisation de cette espèce. Toutefois, considérant son utilisation répandue au Québec, en agriculture et en stabilisation des sols, on peut tolérer son implantation dans les marais artificiels.



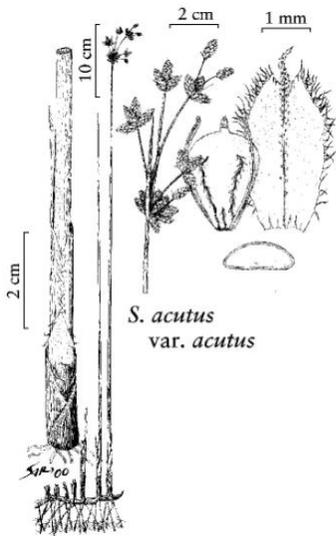
a) *Typha latifolia*<sup>4</sup>



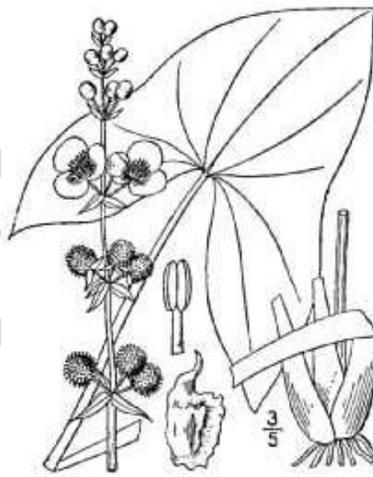
b) Scirpe des marais<sup>4</sup>  
(*Scirpus* ou *Eleocharis palustris*)



c) *Schoenoplectus tabernaemontani*<sup>5</sup>  
(anciennement *Scirpus validus*)



d) *Schoenoplectus acutus*<sup>5</sup>  
(anciennement *Scirpus acutus*)



e) *Sagittaria latifolia*<sup>6</sup>



f) *Phalaris arundinacea*<sup>6</sup>

**Figure 8.1.3-1 – Exemples de plantes**

<sup>4</sup> Meyer C. (2020). *Dictionnaire des Sciences Animales*, Montpellier, France, Cirad. [\[http://dico-sciences-animales.cirad.fr/\]](http://dico-sciences-animales.cirad.fr/) [(consulté le 2020/03/22)].

<sup>5</sup> Boufford, D., et E. Fumaria. (1993). *Flora of North America*, Flora of North America Association, New York and Oxford. vol. 23. [\[http://floranorthamerica.org/Schoenoplectus tabernaemontani\]](http://floranorthamerica.org/Schoenoplectus_tabernaemontani) et [\[http://floranorthamerica.org/Schoenoplectus acutus var. acutus\]](http://floranorthamerica.org/Schoenoplectus_acutus_var._acutus) (consultés le 2022/04/01).

<sup>6</sup> USDA-NRCS PLANTS Database, Britton, N. L., et A. Brown (1913). *An illustrated flora of the northern United States, Canada and the British Possessions*, Kentucky Native Plant Society, New York. [\[https://plants.sc.egov.usda.gov/home/plantProfile?symbol=ELPAP\]](https://plants.sc.egov.usda.gov/home/plantProfile?symbol=ELPAP) et [\[https://plants.sc.egov.usda.gov/home/plantProfile?symbol=PHAR3\]](https://plants.sc.egov.usda.gov/home/plantProfile?symbol=PHAR3) (consultés le 2022/04/01).

### **8.1.3.2 Rôle des plantes**

Le rôle des plantes est principalement physique ; le système racinaire augmente la surface disponible pour les microorganismes, permet une meilleure filtration des matières particulaires et peut favoriser le maintien de la conductivité hydraulique du milieu filtrant. De plus, dans un climat froid comme celui du Québec, la végétation permet une certaine isolation du lit filtrant pendant l'hiver.

Les critères de sélection des plantes sont principalement basés sur :

1. leur capacité à se développer ainsi que celle des rhizomes à s'étaler, pour prévenir la colonisation du marais par d'autres espèces de plantes ;
2. le développement de leur système racinaire, en termes de biomasse et de profondeur, pour assurer un traitement des eaux performant.

### **8.1.3.3 Plantation**

La mise en place initiale s'effectue à une densité d'environ quatre (4) plants par mètre carré pour les marais à écoulement sous-surface (horizontal et vertical). Cela permet généralement de faucher les plantations après deux (2) ans. La densité est cependant dépendante des objectifs de croissance des plantations, ainsi que de l'espèce (ou la combinaison d'espèces) sélectionnée. Pour les marais à écoulement en surface, la densité de plantation initiale visée est d'environ 10 000 plants par hectare. Une densité supérieure à 100 000 plants par hectare devrait être atteinte à l'équilibre lorsque le marais aura atteint sa maturité.

On trouvera dans la littérature scientifique des renseignements plus détaillés sur le choix de la méthode de plantation des végétaux ainsi que sur les précautions à prendre, comme la régulation de l'humidité du milieu et l'ajustement du niveau d'eau (dont Kadlec et Knight, 1996 ; Reed et collab., 1995 ; Davis, 1995). Les deux principales méthodes de mise en place de la végétation sont la transplantation de jeunes plants produits à partir de semis et la transplantation de rhizomes. Ces méthodes sont utilisées de préférence au printemps.

La croissance des végétaux dans le marais devrait être surveillée, en particulier les premières saisons, pour éliminer les espèces non souhaitées qui pourraient nuire à la croissance des macrophytes sélectionnés. Au besoin, le filtre devrait être désherbé.

## 8.2 Conditions de conception

Le Tableau 8.2-1 résume l'application recommandée des différents types de marais artificiels au Québec. Comme chaque type de marais artificiel est utilisé à une étape de traitement différente, les conditions de conception particulières à chacun d'eux sont spécifiées dans leur section respective.

**Tableau 8.2-1 – Applications des différents types de marais artificiels**

Type de marais	Application
Marais à écoulement vertical	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Traitement secondaire</li><li>2. Première étape d'un système hybride</li><li>3. Traitement de polissage</li></ol>
Marais à écoulement horizontal sous la surface	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Traitement secondaire d'eaux diluées (<math>DBO_5 \leq 100</math> mg/l)</li><li>2. Dernière étape d'un système hybride ou d'une filière de traitement comportant des procédés aérobies</li></ol>
Systèmes hybrides	Traitement secondaire
Marais à écoulement en surface	Traitement de polissage

### 8.2.1 Traitement préalable

Le traitement préalable requis dépend du type de marais artificiel et est détaillé dans la section correspondante.

### 8.2.2 Débits et charges

Les ouvrages expansifs comme les marais artificiels sont généralement conçus sur la base du débit moyen journalier. La conception hydraulique devrait toutefois être vérifiée pour le débit maximal.

Les systèmes de traitement par marais artificiel ne sont pas compatibles avec les réseaux unitaires, et tout apport significatif d'eaux parasites par captage est évité en raison du prétraitement qui est généralement constitué d'une fosse septique. En effet, les pointes de débit qui surviennent lors des périodes de précipitation ou de fonte des neiges risquent d'emporter les matières qui s'étaient déposées dans la fosse septique et de colmater le marais en aval.

### 8.2.3 Facteurs de pointe

Les marais étant précédés d'une fosse septique ou d'un autre marais, les pointes de débit sont relativement atténuées par le ou les systèmes en amont. Les marais devraient cependant être munis de trop-pleins pour évacuer l'eau en cas de forts débits ou de fortes précipitations.

### 8.2.4 Température

Concernant l'hydraulique, les conduites d'entrée et de sortie du système devraient être conçues de façon à éviter la stagnation de l'eau et à prévenir le gel. Une conception adéquate permettra d'exploiter les différents types de marais, même en saison hivernale.

En ce qui concerne les performances de traitement, de basses températures peuvent avoir un effet négatif sur l'efficacité du système, notamment pour l'enlèvement de l'azote (nitrification), qui devient presque nul en hiver (Kadlec et Wallace, 2009). De plus, lorsqu'une couche de glace se forme à la surface du marais,

les échanges d'oxygène sont réduits, ce qui peut favoriser des conditions anaérobies dans le milieu. La littérature indique cependant que l'enlèvement des matières particulaires peut parfois augmenter en hiver (Kadlec et Wallace, 2009).

### **8.2.5 Redondance**

Quel que soit le type de marais, il est recommandé d'installer au moins deux (2) unités en parallèle de manière à pouvoir continuer le traitement malgré l'arrêt d'une unité pour entretien ou toute autre raison.

### **8.2.6 Bruit de fond**

Les marais artificiels étant des écosystèmes complets, leurs cycles biogéochimiques (comprenant les cycles de vie des microorganismes et des plantes) produisent des résidus, appelés « bruit de fond », qui contribuent entre autres aux concentrations de DBO<sub>5</sub>, de MES, d'azote et de phosphore mesurées à l'effluent (Crites et collab., 2014 ; Dotro et collab., 2017). Plus le marais est alimenté en eaux chargées, plus le bruit de fond risque d'être élevé. Il peut, de plus, varier en fonction des saisons. Les bruits de fond rapportés dans la littérature varient légèrement selon les auteurs. Les valeurs typiques à considérer pour la conception des différents marais artificiels sont présentées dans leur section respective.

### **8.2.7 Évapotranspiration**

L'évapotranspiration dans un marais artificiel complètement végétalisé est importante. Par exemple, des débits d'effluent nuls ont été notés à l'installation de traitement de la Biosphère de Montréal lors des chaudes journées d'été sans pluie pendant lesquelles on observait une faible fréquentation du site (Brisson et Vincent, 2009). L'évapotranspiration peut avoir un effet significatif sur le bilan hydraulique du système et conséquemment, sur les performances épuratoires du marais (Chazarenc et collab., 2010; Kadlec et Wallace, 2009). L'évapotranspiration augmente notamment le temps de rétention hydraulique du marais, mais concentre certains polluants (US EPA, 1999). Il est cependant difficile d'intégrer ce paramètre dans les critères de dimensionnement des marais artificiels, car il n'y a pas encore de consensus parmi les experts relativement à l'incidence des conditions environnementales sur les résultats (Queluz et collab., 2018).

### **8.2.8 Colmatage**

Il a été démontré que la présence des végétaux dans le milieu filtrant permet d'augmenter sa conductivité hydraulique, comparativement à un lit non végétalisé (Cordeiro De Paoli et collab., 2013). Bien qu'il puisse être évité avec une conception et une exploitation adéquates du système, le colmatage des marais artificiels à écoulement sous-surfacique demeure un aspect critique et un problème commun. Ce colmatage peut être causé par la croissance importante de la biomasse et l'accumulation de particules organiques, inorganiques ou autres débris microbiens dans le lit (Dotro et collab., 2017).

Dans les marais à écoulement horizontal sous la surface, le colmatage dû au biofilm survient principalement dans la zone d'entrée. Deux facteurs déterminent la formation et l'étendue du biofilm : 1) la charge organique appliquée sur la section transversale de l'écoulement des eaux usées dans cette zone et 2) la granulométrie du sable filtrant. Actuellement, les interactions entre ces deux facteurs sont peu documentées (Wallace et Knight, 2006). Austin et collab. (2007) ont proposé un modèle reposant sur le calcul du ratio entre les taux de réaction et de transport de masse pour prédire la formation de la biomasse dans ce type de marais et le colmatage induit par le biofilm. Toutefois, d'autres essais pilotes et études devraient être réalisés pour confirmer l'applicabilité de la méthode d'Austin et collab. (2007). Par ailleurs, les critères de taux de charge établis dans la documentation technique ne sont valables que pour une certaine gamme de diamètres de sable et ils ne peuvent être extrapolés pour des sols de granulométrie différente (Wallace et Knight, 2006).

Dans tous les cas, il est important de s'assurer que les charges appliquées respectent la capacité de conception du système pour limiter le colmatage. De plus, un suivi du colmatage du marais artificiel est

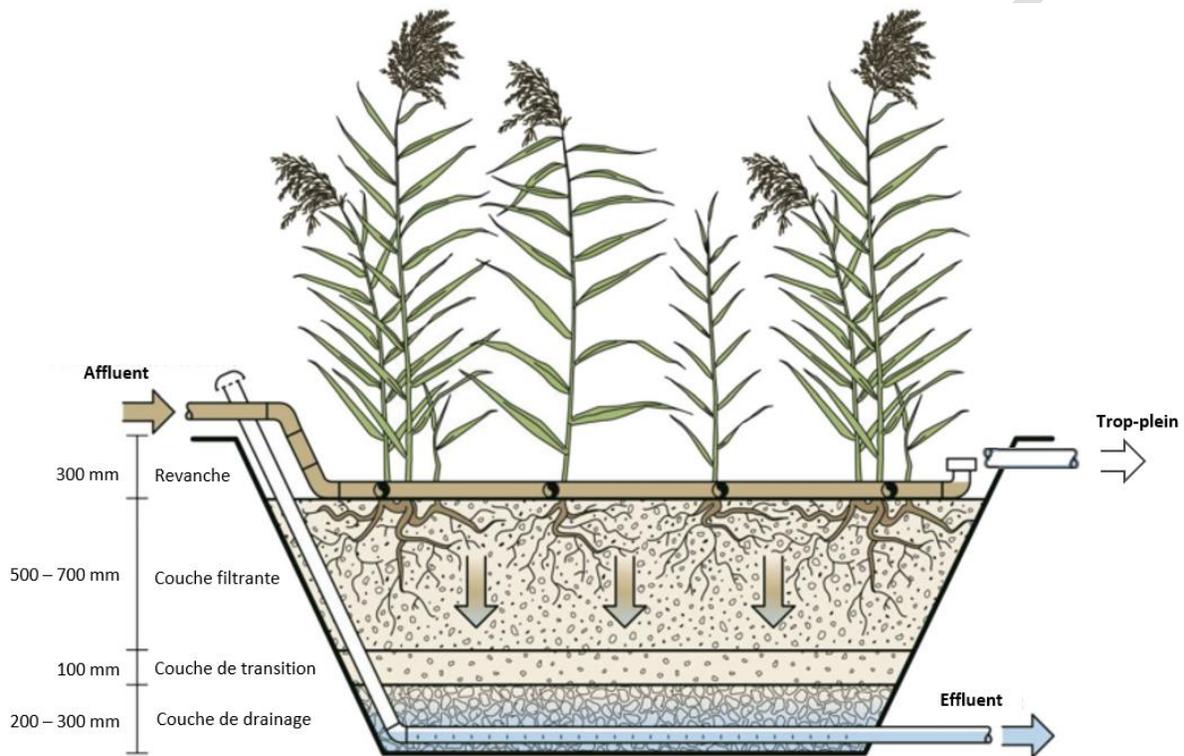
nécessaire, car, même s'il n'est que partiel, les performances épuratoires risquent d'être grandement altérées (Winter et Goetz, 2003).

PRÉLIMINAIRE

### 8.3 Marais à écoulement vertical

*Les marais à écoulement vertical peuvent être utilisés directement en aval d'une fosse septique et sont généralement suivis d'unités à écoulement horizontal sous la surface (voir systèmes hybrides).*

Les marais à écoulement vertical sont alimentés de façon intermittente et sont, par conséquent, non saturés. Les eaux usées sont distribuées sur la surface du lit et percolent à travers le milieu filtrant et les racines des plantes jusqu'à un réseau de conduites perforées situé dans une couche drainante au fond du lit. La Figure 8.2.8-1 présente un schéma typique d'un marais à écoulement vertical.



**Figure 8.2.8-1 – Marais à écoulement vertical**

**Adaptée de Dotro et collab. (2017)**

Les marais à écoulement vertical ont été peu utilisés dans les premières générations de marais artificiels, mais ils ont suscité un regain d'intérêt dans les années 1990, particulièrement en Europe (Cooper et Green, 1995; Haberl et collab., 1995; Brix, 1994a; von Felde et Kunst, 1997; Wittgren et Maehlum, 1997; Reed et collab., 1995). Ce type de marais est d'ailleurs privilégié au Danemark depuis 1998 (Brix, 2007). Malgré un plus faible temps de rétention, les lits à écoulement verticaux présenteraient de meilleures performances que les lits à écoulement horizontal sous la surface en raison d'une meilleure oxygénation du milieu filtrant attribuable à l'écoulement en conditions non saturées (Pandley, 2013).

La « filière française » est constituée de deux étapes de lits à écoulement vertical en série et comporte un dégrillage grossier sans fosse septique en amont (Boutin et collab., 1999; Boutin et collab., 1997; Morvannou et collab., 2015). Ces lits semblent fonctionner exclusivement avec des phragmites (Dotro et collab., 2017) et donnent d'excellents résultats. En revanche, en raison du caractère envahissant de cette espèce de plantes émergentes, la filière française de lits verticaux n'a pas été abordée dans le présent chapitre.

Des essais ont été réalisés en Australie avec des marais à écoulement vertical ascendant, donc saturés comme dans le cas des marais à écoulement horizontal (Breen et Chick, 1995; Heritage et collab., 1995; Chick et Mitchell, 1995). Bien que cette approche semble intéressante, elle n'est pas traitée dans le présent guide parce que les renseignements obtenus sur son application à grande échelle et son comportement à long terme sont actuellement insuffisants.

### **8.3.1 Conditions de conception**

#### **8.3.1.1 Traitement préalable**

Les marais à écoulement vertical sont précédés d'un système de traitement primaire, généralement une fosse septique. Cette étape est très importante, car un traitement primaire insuffisant pourrait conduire à un colmatage prématuré du filtre (Dotro et collab., 2017).

#### **8.3.1.2 Redondance**

Les systèmes de traitement par marais à écoulement vertical ayant un débit moyen de plus de 0,6 m<sup>3</sup>/d devraient être composés de plusieurs unités parallèles (minimum deux, préférentiellement quatre) (DWA, 2017). En général, un quart de la surface totale devrait être en phase de repos (Dotro et collab., 2017). Cette mise au repos dure environ une semaine (DWA, 2017).

### **8.3.2 Critères de conception**

Les marais à écoulement vertical s'apparentent à la fois aux filtres à sable intermittents et aux lits bactériens constitués de pierre. Ce type de marais comporte toutefois certaines particularités, notamment la présence de racines et de rhizomes de plantes dans le milieu filtrant et le mode d'alimentation.

L'approche utilisée pour la conception des filtres à sable est empirique. Elle est basée sur un taux de charge hydraulique (TCH) à long terme déterminé à partir de l'expérience acquise dans de nombreuses installations. Ces critères empiriques ne peuvent être transposés à des milieux et à des modes d'alimentation différents. Pour la conception de lits bactériens, on a utilisé divers modèles mathématiques basés sur le taux de charge hydraulique, la hauteur du filtre et d'autres constantes propres au milieu. En revanche, aucune étude scientifique ne permet de transposer l'application de ces modèles à la conception des marais à écoulement vertical.

Une approche empirique a donc été retenue pour la conception des marais à écoulement vertical. Les critères à retenir sont principalement les taux de charge surfacique et les caractéristiques du lit d'écoulement (nature et profondeur des couches).

#### **8.3.2.1 Superficie et taux de charge (hydraulique et organique)**

La littérature scientifique européenne recommande que la surface maximale d'un lit vertical ne dépasse pas 400 m<sup>2</sup> pour garantir une distribution uniforme de l'eau à la surface du lit (Dotro et collab., 2017). La superficie de l'ensemble des unités est calculée de façon à obtenir un taux de charge hydraulique moyen inférieur ou égal à 80 L.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> (DWA, 2017). Cependant, si les marais ne sont utilisés que pendant la période estivale, le taux de charge hydraulique peut être augmenté à 200 L.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> (Dotro et collab., 2017).

Le taux de charge organique moyen par rapport à la superficie totale des unités devrait être limitée à 20 g DCO.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> (Dotro et collab., 2017 ; DWA, 2017), soit 10 g DBO<sub>5</sub>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> pour des eaux usées d'origine domestique prétraitées présentant un ratio typique DCO/DBO de 2,0 (DWA, 2017). Il est possible de diminuer le taux de charge hydraulique appliqué au marais pour respecter le taux de charge massique si les eaux usées sont plus chargées.

### 8.3.2.2 Caractéristiques du lit d'écoulement

La Figure 8.2.8-1 présente les différentes couches de substrat composant typiquement un marais à écoulement vertical. Le lit est aménagé de la façon suivante, en commençant par le fond :

- Couche de drainage :  
Outre l'évacuation de l'effluent, cette couche facilite l'apport d'oxygène dans la partie inférieure du filtre. Elle est constituée de 200 mm à 300 mm d'épaisseur de pierre lavée d'au moins 10 mm de diamètre.
- Couche de transition :  
Cette couche est mise en place pour prévenir la migration du substrat filtrant dans la couche de drainage sous-jacente. Elle contient 100 mm d'épaisseur de gravier lavé de 2 à 8 mm de diamètre (DWA, 2017).
- Couche filtrante :  
C'est le milieu filtrant dans lequel les végétaux sont plantés. Par ailleurs, il s'agit de la couche la plus critique, car c'est la plus sujette au colmatage. Elle est constituée de 500 mm à 700 mm d'épaisseur de sable filtrant lavé de 0,06 mm à 2 mm de diamètre et présentant (DWA, 2017) :
  - un diamètre effectif  $D_{10}$  compris entre 0,2 mm et 0,4 mm ;
  - un coefficient d'uniformité ( $C_u$ ) inférieur à 5 ;
  - une perméabilité ( $K$ ) d'environ  $10^{-4}$  m/s.
- Couche de surface (au besoin, non représentée à la Figure 8.2.8-1) :  
Cette couche, plus grossière que la couche filtrante, peut être ajoutée dans le but d'éviter l'érosion du lit lors des périodes d'alimentation (Dotro et collab., 2017). Une couche de surface trop épaisse peut toutefois limiter l'apport en oxygène dans le milieu filtrant et mener à des pertes de performance (Langergraber, 2009). Elle comporte 50 mm à 100 mm d'épaisseur maximum de gravier de 4 mm à 8 mm de diamètre (Dotro et collab., 2017).

Pour assurer la stabilité des couches et éviter la migration des matériaux fins vers les matériaux plus grossiers sous-jacents, il est recommandé de vérifier l'application de la loi de Terzaghi (Dotro et collab., 2017 ; DWA, 2017) :

- $D_{15}$  du matériau grossier  $\leq 4 D_{85}$  du matériau fin.

Les Consultants RSA (1993) recommandent de plus les critères suivants pour assurer une conductivité hydraulique relative suffisante entre les matériaux :

- $D_{15}$  du matériau grossier  $\geq 5 D_{15}$  du matériau fin ;
- $K$  du matériau grossier  $\geq 100 K$  du matériau fin (Les consultants RSA, 1993).

La nature des matériaux et l'épaisseur des couches dépendent des caractéristiques de l'affluent appliqué au marais et du protocole d'alimentation utilisé. De plus, les performances de traitement sont grandement influencées par les matériaux utilisés. Par exemple, avec un matériau de granulométrie plus fine, de plus hauts taux d'enlèvement peuvent être atteints puisque l'eau s'écoule plus lentement dans le lit, mais les risques de colmatage augmentent. À l'opposé, des matériaux plus grossiers permettent des taux de charge hydraulique plus élevés et réduisent les risques de colmatage, mais les performances épuratoires sont diminuées. En augmentant l'épaisseur du milieu filtrant, il est possible de surmonter en partie la baisse de performance attribuable à l'augmentation de la granulométrie (Dotro et collab. 2017).

### 8.3.2.3 Caractéristiques pour une utilisation en polissage

Les marais à écoulement vertical peuvent être utilisés comme procédé de polissage (par exemple après un premier marais vertical). Les concentrations à l'affluent correspondent alors à celles d'un effluent

secondaire (25 mg/l de DBO<sub>5</sub> et de MES typiquement). Les critères de conception sont les mêmes que pour un marais vertical utilisé comme traitement secondaire (DWA, 2017).

Des essais pilotes ont été réalisés à Alma de 1994 à 1997 (Les Consultants RSA, 1999) en utilisant des marais à écoulement vertical qui recevaient l'effluent d'étangs aérés. Ceux-ci ont démontré qu'avec un milieu filtrant constitué d'une couche de sable de 600 mm d'épaisseur, un marais vertical pouvait effectivement accomplir un traitement de polissage.

### **8.3.3 Alimentation en eaux usées**

L'alimentation des marais à écoulement vertical se fait de façon intermittente avec des doses environ toutes les six (6) heures (Kadlec et Wallace, 2009). Le filtre devrait se vider complètement entre chaque dose pour éviter des conditions de sol saturé (ce type de conditions requerrait de l'aération).

Le système de distribution devrait garantir la bonne répartition des eaux usées sur toute la surface du lit de façon que le volume entier du marais contribue au traitement (Dotro et collab., 2017). Divers systèmes de distribution peuvent être envisagés tels que le système à alimentation intermittente par chasse d'eau (pompage ou siphon si la pente naturelle du terrain le permet) et le système de distribution sous faible pression (voir chapitre 6 – section 6.3.3.3). Il faut s'assurer que le système d'alimentation demeure fonctionnel dans les conditions hivernales du Québec. Les conduites devraient d'ailleurs se vider après chaque dosage pour prévenir le gel (Dotro et collab., 2017). Elles devraient également être protégées des rayons ultraviolets. La mise en place d'une couche isolante (p. ex. du paillis) au-dessus du système de distribution peut être intéressante pour prévenir le gel (Dotro et collab., 2017; Wallace, 2005). Si du paillis est utilisé, on devrait se limiter aux matières organiques bien décomposées pour ne pas nuire aux performances du traitement. Pour être efficace, l'isolant devrait être réparti uniformément sur la surface, ce qui nécessite de le considérer comme une partie intégrante du système de marais filtrant lors de la conception (Wallace, 2005).

Le lecteur est invité à se référer au chapitre 6 en ce qui concerne les systèmes de distribution. Dotro et collab. (2017) et la DWA (2017) recommandent que les conduites de distribution aient un diamètre d'environ 40 mm avec des ouvertures d'au moins 8 mm de diamètre pour éviter leur blocage par des solides. Les ouvertures devraient être réparties de façon égale à la surface du lit à raison d'une ouverture par m<sup>2</sup> de lit.

### **8.3.4 Collecte et évacuation de l'effluent**

La collecte de l'effluent se fait au moyen de conduites de drainage munies d'orifices ou de fentes. Elles sont placées dans la couche de drainage, selon les mêmes critères que pour les filtres granulaires intermittents (voir chapitre 7 – section 7.2.5).

Bien que les marais à écoulement vertical soient normalement exploités en mode lit ruisselant, donc non noyés, des chambres d'ajustement du niveau d'eau sont nécessaires à la sortie des unités. Elles permettent de maintenir une hauteur d'eau dans le filtre ou de le noyer au besoin pour gérer la croissance des plantes. Le système de régulation devrait être adapté aux conditions froides et fonctionner efficacement lorsque de forts débits intermittents sont appliqués.

Des informations complémentaires sur les dispositifs d'entrée et de sortie sont disponibles à la section 8.8.3.

### **8.3.5 Aération**

Les lits verticaux ne présentent pas de système d'aération. L'aération se fait naturellement grâce à l'alimentation intermittente. Lors des dosages, la percolation des eaux usées dans le milieu filtrant pousse de l'air vers les couches inférieures du lit, ce qui assure une oxygénation adéquate de l'ensemble des strates.

L'apport d'oxygène dans le filtre peut également être favorisé au moyen d'évents, reliés aux conduites de drainage ou situés directement dans la couche de pierre. Les Consultants RSA (1993) recommandent l'installation d'évents tous les 16 m<sup>2</sup>.

### **8.3.6 Terrassement et digues**

La surface du lit devrait être bien nivelée et parfaitement horizontale pour permettre une distribution uniforme des eaux usées sur toute la surface. Le fond du lit peut être de niveau ou comporter une légère pente vers la sortie pour en faciliter le drainage. Les Consultants RSA (1993) recommandent que les parois du marais soient les plus verticales possible pour assurer un écoulement uniforme dans le lit.

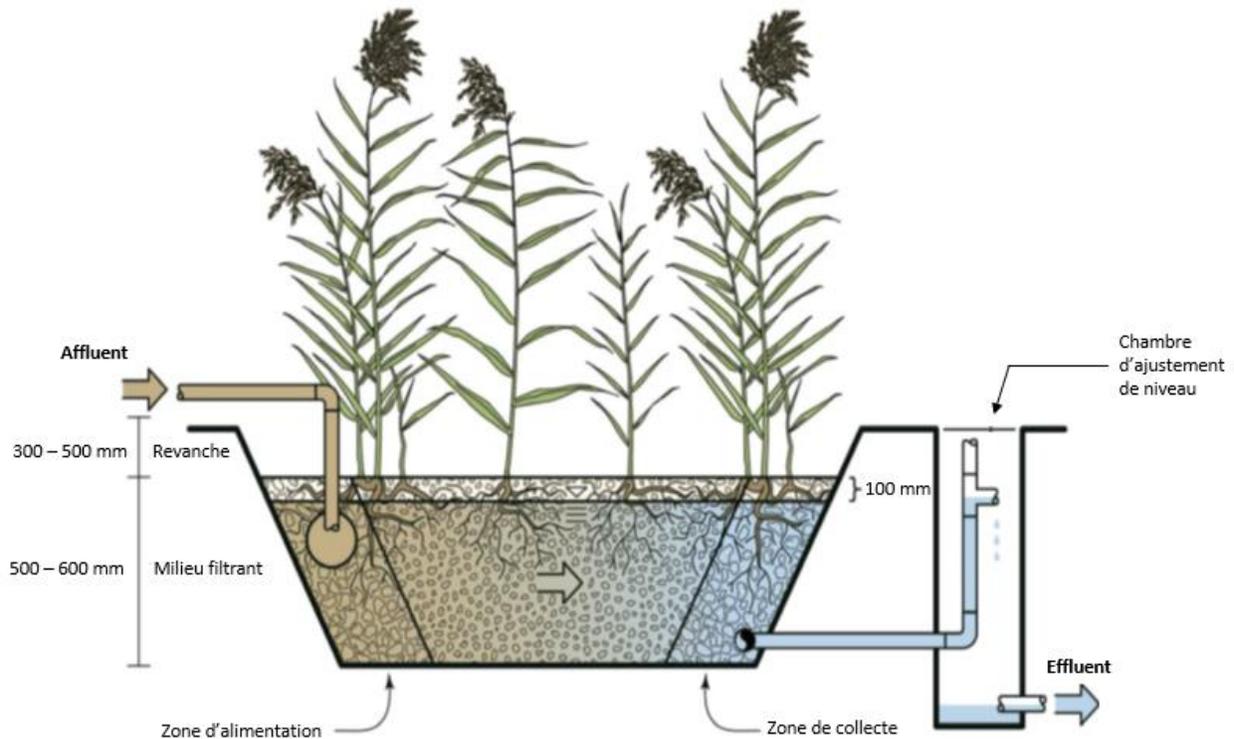
On devrait prévoir une revanche de 300 mm au-dessus de la surface du milieu filtrant (DWA, 2017). Un trop-plein d'urgence est recommandé pour protéger les digues, surtout si le système de traitement est susceptible de recevoir des eaux de captage.

PRÉLIMINAIRE

## 8.4 Marais à écoulement horizontal sous la surface

*Les marais à écoulement horizontal sous la surface utilisés pour le traitement des eaux usées d'origine domestique devraient préférablement être précédés d'unités à écoulement vertical ou d'un autre système de traitement aérobique. Il n'est pas recommandé d'installer des marais à écoulement horizontal sous la surface directement après une fosse septique.*

Les marais à écoulement horizontal sous la surface sont constitués de bassins remplis d'un milieu poreux dans lequel poussent des plantes émergentes. Les eaux usées s'écoulent horizontalement sous la surface à travers le milieu et les racines des plantes. La Figure 8.3.6-1 schématise un marais à écoulement horizontal sous la surface.



**Figure 8.3.6-1 – Marais à écoulement horizontal sous la surface**

Adaptée de Dotro et collab. (2017)

En Europe, les marais à écoulement horizontal sous la surface sont le plus souvent utilisés comme traitement secondaire, bien qu'au Royaume-Uni ils soient aussi utilisés comme traitement de polissage. Des banques de données sur les systèmes existants au Danemark (Schierup et collab., 1990; Kadlec et Knight, 1996) et au Royaume-Uni (Cooper, 2007) font état de plusieurs marais de ce type utilisés en traitement secondaire.

## 8.4.1 Conditions de conception

### 8.4.1.1 Traitement préalable

Dans les marais à écoulement horizontal sous la surface, les apports en oxygène sont relativement limités. Lorsqu'ils sont utilisés pour le traitement d'eaux usées domestiques, ils sont principalement en condition anaérobie ou anoxique (Kadlec et Knight, 1995, Knight, 1997, Hammer et Knight, 1994, Reed et collab., 1995, Reed et Brown, 1995, Wood, 1995, Dotro et collab., 2017). Ce type de conditions limite la nitrification. Des problèmes de court-circuitage en surface ont aussi été observés dans plusieurs installations en Europe (Haberl et collab., 1995, Schierup et collab., 1990, Brix, 2007).

En raison des problèmes liés aux conditions anaérobies, plusieurs auteurs recommandent l'ajout d'unités à écoulement vertical en amont (Brix, 1994a; Cooper et Green, 1995; Platzler et Netter, 1994). Dans le guide technique intitulé *Systèmes de traitement des eaux usées par marais artificiels* (Les Consultants RSA, 1993), il est recommandé d'installer des unités à écoulement vertical en amont des unités à écoulement horizontal si la concentration de l'affluent des marais (effluent de la fosse septique) dépasse 100 mg/l de DBO<sub>5</sub>.

Compte tenu des incertitudes qui demeurent quant au bon fonctionnement des marais à écoulement horizontal sous la surface utilisés en traitement secondaire, et considérant les tendances qui se dégagent de la littérature scientifique, il y a lieu d'adopter une attitude conservatrice. Par conséquent, les marais artificiels à écoulement horizontal sous la surface ne devraient pas recevoir un affluent ayant une concentration supérieure à 100 mg/l de DBO<sub>5</sub>. Ils ne devraient donc pas être utilisés directement en aval d'une fosse septique. Pour limiter les taux de charge appliqués, ces marais sont généralement utilisés en deuxième étape de traitement secondaire.

### 8.4.1.2 Température

En principe, l'activité biologique est sensible à la température. Toutefois, les résultats disponibles sur le rendement des installations existantes ne permettent pas d'établir clairement une variation de la constante d'enlèvement de la DBO<sub>5</sub> en fonction de la température dans les marais à écoulement horizontal sous la surface (Kadlec et Knight, 1996). Une baisse de rendement en conditions hivernales a été notée surtout pour des installations à milieu plus grossier, dont le taux de charge en DBO<sub>5</sub> se situait entre 5 et 20 g de DBO<sub>5</sub>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> (Findlater et collab., 1990). La constante d'enlèvement de la DBO<sub>5</sub> calculée à partir des résultats de suivi de l'installation de la Biosphère à Montréal (IRVB, 1998), dont le taux de charge en DBO<sub>5</sub> était de 3,17 g de DBO<sub>5</sub>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>, s'est révélée indépendante de la température (comprise entre 8 °C et 26 °C).

À défaut de connaître les conditions spécifiques du projet qui influenceront sur les températures des eaux usées, la température moyenne de conception recommandée par Les Consultants RSA est de 16 °C pour la période estivale et de 5 °C pour la période hivernale.

Reed et collab. (1995) ainsi que Crites et collab. (2014) proposent un modèle de calcul de la température de l'eau dans les marais, mais ce modèle peut être difficile à appliquer compte tenu des renseignements nécessaires à son utilisation. De plus, la précision additionnelle qu'il pourrait apporter pourrait être considérée comme peu significative en regard des inconnues ou des imprécisions sur l'effet de la température et sur la valeur des constantes des modèles de conception.

## 8.4.2 Critères de conception

### 8.4.2.1 Temps de rétention hydraulique

Le temps de rétention hydraulique d'un marais à écoulement horizontal sous la surface se calcule à l'aide de la formule suivante (Crites et collab., 2014 ; Dotro et collab., 2017) :

$$\text{Équation 08.01 : } \tau = \frac{A h \varepsilon}{Q}$$

où :

- $\tau$  : temps de rétention hydraulique (d) ;
- A : superficie du marais (longueur  $\times$  largeur) ( $m^2$ ) ;
- h : hauteur d'eau dans le marais (m) ;
- $\varepsilon$  : porosité du milieu filtrant (adimensionnelle) ;
- Q : débit au travers du marais ( $m^3/d$ ).

Normalement, le débit au travers du marais devrait se calculer comme la moyenne des débits d'affluent et d'effluent du marais. Toutefois, l'évaluation de la perte d'eau par évaporation et des gains par précipitation est difficile à établir. Pour des raisons de simplification, seul le débit d'affluent est pris en compte dans le calcul du temps de rétention (Dotro et collab., 2017).

### 8.4.2.2 Enlèvement de la matière organique et de l'azote

Diverses approches ont été utilisées pour établir la superficie des marais artificiels à écoulement horizontal sous la surface. Les principales sont celles basées sur :

1. le temps de rétention hydraulique (section 8.4.2.2.1) ;
2. la charge hydraulique superficielle (section 8.4.2.2.2) ;
3. le P-k-C\* (section 8.4.2.2.3).

La littérature présente aussi des équations basées sur des analyses statistiques de régression effectuées à partir de données de suivi d'installations existantes. Ces équations ne tiennent pas compte des paramètres de conception et d'exploitation des installations et sont donc difficilement applicables comme base de conception.

#### 8.4.2.2.1 Approche basée sur le temps de rétention hydraulique

L'approche basée sur le temps de rétention hydraulique (TRH) est recommandée par plusieurs auteurs (Reed et collab., 1995 ; Les Consultants RSA, 1993 ; Crites et collab., 2014). Deux différents modèles sont proposés pour établir la hauteur d'eau dans le marais. Celui de Reed et collab. (1995) est basé sur une valeur moyenne, tandis que celui des Consultants RSA (1993) propose d'intégrer la loi de Darcy sur la longueur du marais pour tenir compte de la courbure théorique de la nappe d'eau entre l'entrée et la sortie. Le modèle de Reed et collab. (1995) est une simplification raisonnable, sachant que la hauteur d'eau recommandée à la sortie correspond au minimum à 80 % de la hauteur d'eau à l'entrée du marais (section 8.4.4.2). Le modèle proposé (Reed et collab., 1995 ; Crites et collab., 2014) est le suivant :

- Calcul de la concentration à l'effluent :

$$\text{Équation 08.02 : } C_e = C_a e^{-k_T \tau}$$

$$\text{Équation 08.03 : } k_T = k_{20} \theta^{(T-20)}$$

où :

$C_e$  : concentration de substrat à l'effluent (mg/l) ;  
 $C_a$  : concentration de substrat à l'affluent (mg/l) ;  
 $k_T$  : constante d'ordre 1 à la température T ( $d^{-1}$ ) ;  
 $\tau$  : temps de rétention hydraulique (d) ;  
 $\theta$  : coefficient de température de la constante  $k_T$  (adimensionnel).

Les valeurs proposées pour les paramètres du modèle sont indiquées au Tableau 8.4.2-1.

**Tableau 8.4.2-1 – Paramètres du modèle de Reed et collab. (1995)**

Paramètre	Unité	DBO <sub>5</sub>	AAT <sup>(1)</sup>	NO <sub>x</sub> -N <sup>(3)</sup>
$k_{20}$	$d^{-1}$	1,10	0,107 <sup>(2)</sup>	1,00
$\theta$	-	1,06	1,048	1,15

Notes :

- Bien que la nitrification s'exerce sur l'azote ammoniacal, il est recommandé de supposer que tout l'azote total Kjeldahl (NTK) sera ammonifié et susceptible d'être nitrifié.
  - Variable selon la profondeur des racines (voir cas particulier ci-dessous). Valeur typique utilisée dans le modèle de Bavor et collab. (1986).
  - Dans le calcul de la dénitrification, il faut considérer les NO<sub>x</sub> de l'affluent du marais et tenir compte de la nitrification qui s'exercera dans le marais.
- Calcul de la superficie requise :

**Équation 08.04 :** 
$$A = \frac{Q (\ln C_a - \ln C_e)}{k_T h \varepsilon}$$

où :

A : superficie requise (m<sup>2</sup>) ;  
Q : débit (m<sup>3</sup>/d) ;  
 $C_a$  : concentration de substrat à l'affluent (mg/l) ;  
 $C_e$  : concentration de substrat à l'effluent (mg/l) ;  
 $k_T$  : constante d'ordre 1 à la température T ( $d^{-1}$ ) ;  
h : hauteur d'eau (m) ;  
 $\varepsilon$  : porosité du milieu filtrant (adimensionnelle).

La porosité du milieu filtrant ( $\varepsilon$ ) se situe entre 0,30 et 0,45 selon le matériau granulaire utilisé. Des valeurs de porosité et de conductivité hydraulique en fonction du diamètre effectif ( $D_{10}$ ) du milieu sont présentées au Tableau 8.4.2-2.

**Tableau 8.4.2-2 – Caractéristiques des milieux filtrants des marais**

Type de milieu	Diamètre effectif $D_{10}$ (mm)	Porosité $\varepsilon$ (%)	Conductivité hydraulique K (m/d)
Sable grossier	2	28-32	100-1 000
Sable graveleux	8	30-35	500-5 000
Gravier fin	16	35-38	1 000-10 000
Gravier moyen	32	36-40	10 000-50 000
Gravier grossier	128	38-45	50 000-250 000

## Cas particulier pour le calcul de l'enlèvement de l'azote

L'apport d'oxygène dans le marais à écoulement horizontal sous la surface se fait par le système racinaire des végétaux plantés dans le milieu filtrant. La profondeur du réseau racinaire est donc cruciale pour l'enlèvement de l'azote ammoniacal, car les eaux usées s'écoulant sous la zone de pénétration des racines ne seront pas nitrifiées en raison des conditions anaérobies (Crites et collab., 2014). Il est donc important de sélectionner des plantes dont les racines pénètrent profondément dans le sol, comme les scirpes (Crites et collab., 2014). La profondeur du lit devrait par conséquent être limitée à la profondeur maximale que peuvent atteindre les racines des plantes sélectionnées si la nitrification est requise (Crites et collab., 2014). Le paramètre  $k_{20}$  pour la nitrification peut être calculé en fonction de la profondeur de pénétration des racines à l'aide de la formule suivante (Crites et collab., 2014) :

**Équation 08.05 :** 
$$k_{20,AAT} = 0,01854 + 0,3922 (r_z)^{2,6077}$$

où :

$k_{20,AAT}$  : constante de nitrification à 20 °C (d<sup>-1</sup>) ;

$r_z$  : fraction de la profondeur du milieu filtrant dans laquelle les racines ont pénétré (adimensionnel).

La valeur de  $k_{20,AAT}$  serait donc de 0,4107 d<sup>-1</sup> si les racines pénètrent entièrement dans le milieu filtrant et de 0,01854 d<sup>-1</sup> si le marais ne présente aucune végétation. Pour un milieu constitué de gravier et dans lequel les racines ont atteint entre 50 et 60 % de la profondeur du lit,  $k_{20}$  équivaut à 0,107 d<sup>-1</sup>. Cette valeur est celle reprise dans le modèle de Bavor et collab. (1986).

Pour maximiser la pénétration des racines dans le milieu filtrant, il est important de prendre des mesures dès les premières années d'exploitation. Celles-ci sont décrites à la section 8.4.3. Sans ces mesures, il est conservateur de présumer que le réseau racinaire atteindra seulement 50 % de la profondeur du milieu filtrant (Crites et collab., 2014). Malgré ces mesures, il ne faut pas prétendre que la pénétration des racines dans le média sera complète.

### 8.4.2.2 Approche basée sur la charge hydraulique superficielle

Bien qu'elle soit présente dans la littérature, l'approche basée sur la charge hydraulique superficielle est de moins en moins utilisée dans la conception des marais à écoulement horizontal sous la surface. En effet, ce modèle présume un écoulement piston idéal, ce qui a été démenti plusieurs fois (Dotro et collab., 2017) et entraîne une surestimation des performances. De plus, même si certaines valeurs de  $k$  (constante d'ordre 1) sont répertoriées, ces dernières varient beaucoup d'une référence à l'autre et présentent certaines imprécisions notamment en ce qui concerne l'effet de la température. Il n'est donc pas recommandé d'utiliser cette approche pour le dimensionnement d'un système.

### 8.4.2.3 Approche basée sur P-k-C\*

L'approche P-k-C\* présentée dans la littérature plus récente est basée sur une équation de cinétique qui modifie l'équation 08.02 de premier ordre. D'une part, elle tient compte des bruits de fond (section 8.2.6) ou concentrations limites non nulles dans le marais (Dotro et collab., 2017). D'autre part, cette méthode utilise les principes du modèle des réservoirs en série (*tanks-in-series*, TIS) pour ajuster l'équation d'écoulement, qui n'est ni un piston parfait ni un réacteur parfaitement mélangé, et tenir compte de la dégradation des polluants. Par exemple, la quantité de matière organique diminue au fur et à mesure que l'eau progresse dans le filtre, ce qui modifie les propriétés hydrauliques du système (Kadlec et Wallace, 2009 ; Dotro et collab., 2017).

La superficie du filtre peut être calculée à l'aide des formules suivantes (Dotro et collab., 2017) :

$$\text{Équation 08.06 : } A = \frac{P Q}{k_s} \left[ \left( \frac{C_a - C^*}{C_e - C^*} \right)^{1/P} - 1 \right]$$

où :

A : superficie requise (m<sup>2</sup>) ;  
 P : nombre apparent de réservoirs en série (adimensionnel) ;  
 Q : débit (m<sup>3</sup>/d) ;  
 k<sub>s</sub> : constante surfacique d'ordre 1 modifiée (m/d) ;  
 C<sub>a</sub> : concentration à l'affluent (mg/l) ;  
 C\* : bruit de fond (mg/l) ;  
 C<sub>e</sub> : concentration à l'effluent (mg/l).

Le nombre apparent de réservoirs en série (P) se détermine par des études de traçage. Il tient compte de la diminution du taux d'enlèvement du substrat au fil de l'écoulement de l'eau dans le marais (Dotro et collab., 2017). Le paramètre P est donc associé à la biodégradabilité du substrat et traduit l'efficacité hydraulique du marais.

Des valeurs moyennes pour les coefficients de l'équation 08.06 sont présentées au Tableau 8.4.2-3.

**Tableau 8.4.2-3 – Valeurs moyennes des coefficients pour l'approche basée sur le P-k-C\***

Paramètre	Unité	DBO <sub>5</sub>	AAT	Azote total
P	-	3	6	6
C*	mg/l	5 <sup>(1)</sup>	0	1
k <sub>s</sub>	m/d	0,101 <sup>(1)</sup>	0,031	0,023

<sup>(1)</sup> Pour un affluent présentant une concentration entre 30 mg et 100 mg de DBO<sub>5</sub>/l

Source : Dotro et collab. (2017)

Il est recommandé d'ajuster ces valeurs selon les caractéristiques du marais à concevoir. D'une part, le nombre apparent de réservoirs en série (P) dépend de la géométrie du marais. En effet, plus le marais est de forme allongée (grand ratio longueur/largeur), plus l'écoulement se rapproche d'un type piston. Ainsi, plus la concentration de substrat à l'effluent est faible et plus le paramètre P est élevé. Au contraire, un ratio longueur/largeur faible implique une diminution de la valeur de P.

D'autre part, les coefficients d'enlèvement souvent rapportés dans la littérature prennent la forme d'une constante surfacique (k<sub>s</sub>), car, historiquement, les végétaux utilisés et conséquemment les profondeurs des marais variaient peu (généralement 0,6 m de profondeur). Cependant, avec la diversification des plantes émergentes sélectionnées, les marais peuvent maintenant être construits avec des profondeurs variables. L'utilisation d'une constante volumique (k<sub>v</sub>) tend donc à se généraliser. Le lien mathématique entre k<sub>s</sub> et k<sub>v</sub> est le suivant :

$$\text{Équation 08.07 : } k_s = k_v \varepsilon h$$

où :

k<sub>s</sub> : constante surfacique d'ordre 1 modifiée (m/d) ;  
 k<sub>v</sub> : constante volumique d'ordre 1 modifiée (d<sup>-1</sup>) ;  
 ε : porosité du milieu filtrant (adimensionnel) ;  
 h : hauteur d'eau (m).

L'approche P-k-C\* contient des variables empiriques ( $k_s$  ou  $k_v$ , P et C\*) dont les informations particulières peuvent être difficiles à obtenir. L'utilisation des données de la littérature ne peut se faire que si les installations sont comparables (Dotro et collab., 2017). Une bonne compréhension du modèle et des valeurs empiriques utilisés (vérification de leur validité) est donc essentielle pour ne pas surestimer les performances du système. Une explication plus détaillée de cette approche est fournie par Kadlec et Wallace (2009).

#### 8.4.2.3 Enlèvement des MES

L'enlèvement des MES dans un marais à écoulement sous-surfacique est associé au phénomène physique de filtration. Il ne s'agit pas d'un critère de conception limitant puisque l'enlèvement des MES se produit très rapidement comparativement à l'enlèvement de la DBO<sub>5</sub> ou de l'azote. Crites et collab. (2014) proposent de calculer la concentration de MES à l'effluent du marais à l'aide des équations suivantes, pour des taux de charge hydraulique compris entre 0,004 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> et 0,75 m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup> :

**Équation 08.08 :**  $C_{e,MES} = C_{a,MES} (0,1058 + 0,11 TCH)$

**Équation 08.09 :**  $TCH = \frac{Q}{A}$

où :

$C_{e,MES}$  : concentration de MES à l'effluent (mg/l) ;

$C_{a,MES}$  : concentration de MES à l'affluent (mg/l) ;

TCH : taux de charge hydraulique (m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>) ;

Q : débit (m<sup>3</sup>/d) ;

A : superficie du marais (m<sup>2</sup>).

#### 8.4.3 Milieu filtrant

Le milieu granulaire sert à la fois de filtre pour le traitement des eaux usées et de support pour les plantes. Il devrait avoir une conductivité hydraulique suffisante pour permettre l'écoulement des eaux usées sous la surface sans qu'il y ait de problèmes d'accumulation d'eau, d'écoulement préférentiel et de ravinement en surface, susceptibles d'entraîner une baisse de rendement. Finalement, le milieu filtrant permet de capter des matières particulières et fournit la surface nécessaire au développement de la biomasse qui dégrade les contaminants (USEPA, 1999).

Le milieu filtrant est généralement constitué d'un matériau granulaire (sable grossier, gravier) ayant une conductivité hydraulique d'au moins 1 x 10<sup>-1</sup> cm/s. Il faut éviter le silt. Les particules devraient être de forme arrondie; on doit éviter les pierres anguleuses ou les arêtes vives.

Les zones d'alimentation et de collecte, soit les deux extrémités du marais, sont généralement remplies de matériaux plus grossiers, tels que du gravier, pour faciliter la distribution et le drainage de l'eau dans le filtre.

Au cours des premières années d'exploitation, alors que l'établissement des plantes est en cours, il peut être bénéfique d'ajouter une couche de pailis en surface pour protéger le lit et éviter le gel du milieu filtrant en hiver (Dotro et collab., 2017).

Comme les nutriments et l'eau nécessaires à la croissance des plantes sont disponibles sur toute l'épaisseur du milieu filtrant, il est possible que les racines s'étendent peu profondément. On devrait alors prendre des mesures pour stimuler la pénétration des racines en profondeur. Crites et collab. (2014) rapportent diverses techniques comme :

- abaisser graduellement le niveau d'eau dans le marais chaque automne. Il faut compter au moins trois (3) années avant d'atteindre une pénétration complète des racines.

- construire le marais en trois cellules parallèles et n'exploiter que deux cellules par mois (rotation mensuelle) durant la saison estivale. Les racines dans la cellule au repos devraient s'étendre en profondeur au fur et à mesure que les plantes consomment l'eau et les nutriments. Le fonctionnement sur deux cellules en été doit permettre le respect des normes de rejet à l'effluent.

## 8.4.4 Géométrie

Il est recommandé de diviser la superficie totale en au moins deux lits parallèles de façon à assurer une redondance (voir section 8.2.5).

### 8.4.4.1 Profondeur de lit

La profondeur du lit est liée à la profondeur de pénétration des racines des plantes. En général, l'épaisseur du milieu filtrant est de 0,5 m à 0,6 m, et le niveau de l'eau est d'environ 0,4 m à 0,5 m (US EPA, 2000). On recommande normalement une épaisseur de sol de 0,05 m à 0,10 m au-dessus du niveau de l'eau (Dotro et collab., 2017).

### 8.4.4.2 Gradient hydraulique

Le gradient hydraulique correspond à la différence de niveau d'eau entre l'entrée et la sortie du marais par rapport à sa longueur. Il est recommandé que la hauteur d'eau à la sortie soit d'au moins 80 % de la hauteur maximale à l'entrée. À titre d'exemple, pour une hauteur d'eau de 0,6 m à l'entrée et une longueur d'écoulement de 5,0 m, la différence de niveau entre l'entrée et la sortie utilisée pour les calculs de conception est de 0,12 m, soit 20 % de la hauteur d'eau à l'entrée. Le gradient hydraulique maximal qui en résulte est de 0,024 m/m. Le gradient hydraulique et le choix de la porosité du milieu filtrant sont deux facteurs qui gouvernent la géométrie du marais.

### 8.4.4.3 Longueur

La longueur du marais dans le sens de l'écoulement est établie à l'aide de la loi de Darcy. Elle vise à s'assurer que les pertes de charge dans le milieu se situent à l'intérieur de la différence de niveau d'eau voulue entre l'entrée et la sortie. Une longueur minimale de 3,0 m est toutefois recommandée pour assurer une bonne efficacité de traitement et prévenir les risques d'écoulement préférentiel (Les Consultants RSA, 1993).

L'expression simplifiée de la loi de Darcy peut s'écrire de la façon suivante :

**Équation 08.10:** 
$$A_{TV} = \frac{Q}{K i}$$

où :

$A_{TV}$  : section transversale (m<sup>2</sup>) ;

$Q$  : débit (m<sup>3</sup>/s) ;

$K$  : conductivité hydraulique (m/s) ;

$i$  : gradient hydraulique (m/m).

Aux fins de conception, l'hypothèse que la conductivité hydraulique à long terme sera plus grande que la conductivité initiale du milieu ne devrait jamais être posée. De nombreux systèmes conçus selon cette hypothèse en Europe ont connu des problèmes d'écoulement en surface. En effet, la croissance des racines des plantes peut favoriser au mieux un maintien de la conductivité hydraulique, mais pas une augmentation (Brix, 1994b).

Certains auteurs (Crites et Tchobanoglous, 1998 ; Reed et collab., 1995) suggèrent même d'introduire un facteur de sécurité en utilisant une conductivité hydraulique de conception de 3 à 10 fois inférieure à la valeur mesurée.

#### 8.4.4.4 Largeur

Puisque les contraintes hydrauliques limitent la longueur d'écoulement, la largeur des marais peut être plus grande que la longueur, du moins dans les grands systèmes. Il faut en revanche s'assurer que les eaux usées sont réparties uniformément sur toute la largeur du marais. Pour ce faire, la largeur maximale du lit filtrant recommandée est de 25 m à 30 m (Dotro et collab., 2017). Si la largeur totale requise est plus grande, le marais devrait être divisé en plusieurs sections.

Il est important de limiter le ratio longueur/largeur du marais pour éviter un écoulement en surface. Les recommandations actuelles sont d'utiliser un ratio compris entre 0,25 : 1 et 4 : 1 (Crites et collab., 2014). Il est possible de calculer la largeur minimale requise pour une cellule à l'aide de l'équation suivante (Crites et collab., 2014) :

Équation 08.11 : 
$$W = \frac{1}{h_{\text{moy}}} \sqrt{\frac{Q A}{m K}}$$

où :

W : largeur requise(m) ;

$h_{\text{moy}}$  : hauteur d'eau moyenne (m) ;

Q : débit moyen ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) ;

A : superficie de la cellule ( $\text{m}^2$ ) ;

m : portion du gradient hydraulique disponible pour assurer la hauteur d'eau requise (adimensionnelle, exprimée en décimal) ;

K : conductivité hydraulique du milieu filtrant (m/d).

La valeur de m est typiquement comprise entre 5 % et 20 % de la hauteur d'eau potentiellement disponible. Pour concevoir le marais, il est recommandé d'utiliser une valeur de m inférieure ou égale à 20 % et de ne considérer qu'un tiers de la valeur (typique ou mesurée) de k pour allouer un facteur de sécurité suffisant en raison du colmatage potentiel du milieu filtrant et d'autres aléas non prévisibles au moment de la conception (Crites et collab., 2014). Pour les projets de grande taille, il est recommandé de mesurer la conductivité hydraulique du milieu filtrant sélectionné (Crites et collab., 2014).

#### 8.4.5 Dispositifs d'entrée et de sortie

L'alimentation d'un marais à écoulement horizontal sous la surface se fait le plus souvent de façon continue. Pour obtenir une distribution uniforme du débit, il est recommandé que l'alimentation sous-surfacique s'effectue avec des conduites en « T » ou des orifices répartis à intervalles de 10 % de la largeur du lit (US EPA, 1999). Les conduites sont installées dans une tranchée remplie de pierres lavées dont le diamètre se situe entre 25 mm et 100 mm.

La collecte de l'effluent peut aussi se faire au moyen d'une tranchée de pierres lavées de même diamètre que celles de la tranchée de distribution dans le sens de la largeur du marais. Une conduite munie d'orifices ou de fentes est placée au fond de la tranchée.

Des informations complémentaires sur les dispositifs d'entrée et de sortie sont disponibles à la section 8.8.3.

#### 8.4.6 Terrassement et digues

Le fond du lit peut être horizontal ou avoir une légère pente descendante de 0,5 % à 2 % dans le sens de l'écoulement pour en faciliter le drainage au besoin. La surface du milieu filtrant devrait avoir une légère pente ascendante vers la sortie pour prévenir le ravinement et le cheminement préférentiel en surface en cas d'incapacité hydraulique. Le fond et la surface du lit devraient être de niveau dans le sens de la largeur, c'est-à-dire perpendiculaire à l'écoulement.

Les digues ont généralement une revanche de 0,3 m à 0,5 m au-dessus de la surface du lit. Elles devraient avoir une hauteur suffisante pour permettre d'inonder la surface dans le but d'assurer la croissance sélective des plantes souhaitées. La revanche permet également de contenir temporairement l'eau qui pourrait s'accumuler en cas de pointe hydraulique et ainsi d'éviter les débordements par-dessus les digues.

PRÉLIMINAIRE

## 8.5 Marais à écoulement en surface

Sur la base des renseignements disponibles et des expériences réalisées ailleurs, il est recommandé que l'utilisation des marais à écoulement en surface pour le traitement des eaux usées d'origine domestique soit limitée au traitement de polissage de l'effluent d'un traitement secondaire aérobie.

Les marais à écoulement en surface (Figure 8.4.6-1) sont constitués de canaux ou de bassins de faible profondeur, dans lesquels les eaux usées cheminent à travers les plantes émergentes et la litière accumulée au-dessus d'une couche de sol servant de milieu pour l'enracinement des plantes.

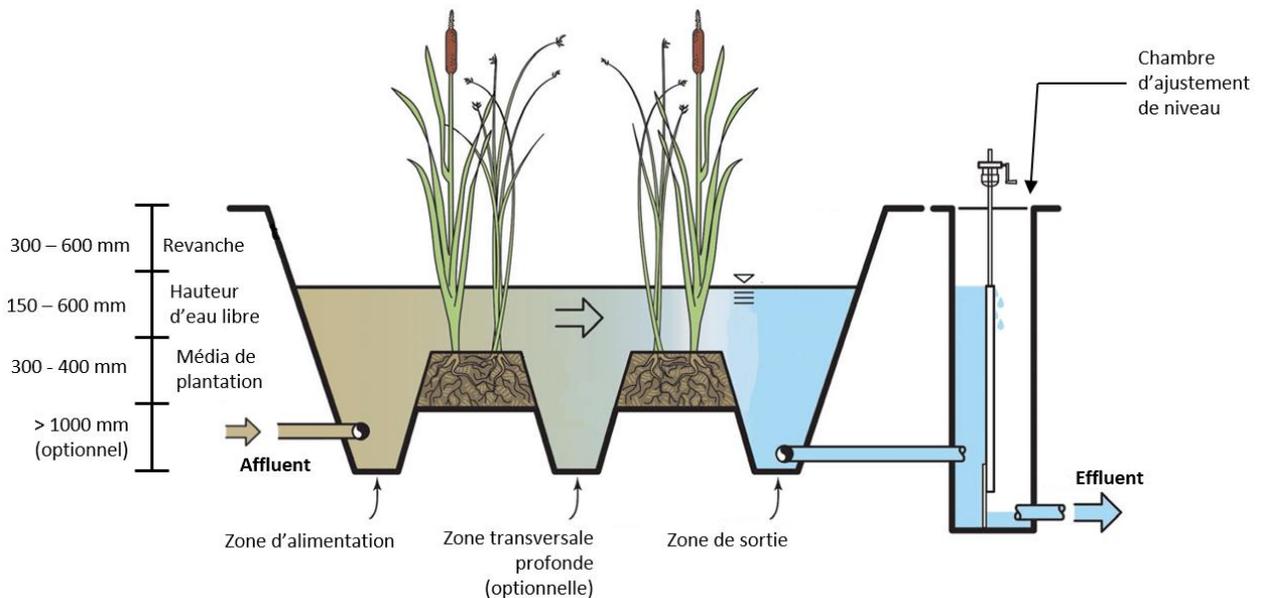


Figure 8.4.6-1 – Marais à écoulement en surface

Adaptée de Dotro et collab. (2017)

### 8.5.1 Conditions de conception

#### 8.5.1.1 Traitement préalable

Les marais artificiels inventoriés et documentés aux États-Unis sont principalement des marais à écoulement en surface. Ils sont surtout utilisés pour le polissage de l'effluent d'un traitement secondaire (Kadlec et Wallace, 2009). En effet, la concentration des eaux usées appliquée est en moyenne de 30 mg/l de DBO<sub>5</sub> et de 46 mg/l de MES, selon la banque de données nord-américaine préparée pour l'EPA (Knight et collab., 1993).

L'étude de cas la mieux documentée est celle de Listowell, en Ontario, où des marais à écoulement en surface ont été installés à l'effluent d'un étang aéré complètement mélangé et d'un étang non aéré (Herskowitz, 1986). Cette étude recommande que les eaux soient préalablement traitées au moyen d'un procédé aérobie produisant un effluent suffisamment riche en oxygène de manière à prévenir les problèmes de toxicité attribuables au sulfure d'hydrogène ou à l'azote ammoniacal.

Par ailleurs, les marais à écoulement en surface soumis à des charges organiques élevées peuvent être plus propices à la prolifération d'insectes et au dégagement d'odeurs. Il est donc recommandé que l'utilisation de ce type de marais pour le traitement des eaux usées d'origine domestique soit limitée au polissage d'un effluent secondaire aérobie.

### 8.5.1.2 Température

Pour une hauteur d'eau de l'ordre de 30 cm et des conditions climatiques estivales, les modèles utilisés pour la conception des marais à écoulement en surface donnent des résultats à peu près équivalents. La principale différence réside dans l'hypothèse relative à l'effet de la température sur l'enlèvement de la DBO<sub>5</sub>. Elle serait négligeable selon Kadlec et Knight (1996) ( $\theta = 1,00$ ), et significative selon Reed et collab. (1995) ( $\theta = 1,06$ ), ce deuxième modèle étant plus conservateur par temps froid. En théorie, l'enlèvement de la DBO<sub>5</sub> devrait être dépendant de la température dans la mesure où il s'agit d'un phénomène de synthèse biologique. Pour des applications en traitement tertiaire, il est possible que l'effet de la température soit moindre étant donné qu'une part importante de la DBO<sub>5</sub> à l'affluent du marais est sous forme particulaire (biomasse produite par le système de traitement secondaire). L'état actuel des connaissances ne permet pas d'établir de façon claire l'incidence de la température sur un marais de polissage. Il revient au concepteur d'appliquer la valeur de  $\theta$  qu'il jugera la plus appropriée en fonction des conditions d'application visées.

Durant la saison hivernale, le traitement continue d'offrir une bonne performance d'enlèvement des matières en suspension malgré la présence d'une couche de glace. L'enlèvement de la matière organique et de l'azote peut être en revanche faible, voire absent (Kadlec et Wallace, 2009). L'ajout d'un bassin de rétention peut être envisagé pour éviter un non-respect des normes de rejet durant la saison froide. Si le marais est utilisé pendant l'hiver, il est recommandé de monter son niveau d'eau avant la formation de la couche de glace. Une fois cette dernière formée, le niveau d'eau pourra être légèrement abaissé. Ceci permettra d'avoir un espace d'air entre la glace et la surface de l'eau qui assurera une meilleure isolation, préviendra le développement de conditions anaérobies et protégera les plantes (Dotro et collab., 2017).

## 8.5.2 Critères de conception

Différentes approches peuvent être adoptées pour établir la superficie des marais à écoulement en surface conçus pour le traitement des eaux usées. Il n'y a pas de consensus des spécialistes sur une méthode à privilégier. Deux de ces approches sont présentées ci-après, l'une basée sur le temps de rétention hydraulique et l'autre basée sur la charge hydraulique superficielle.

Une autre approche basée sur le principe d'une culture fixée qui tient compte de la surface spécifique dans le marais (tiges des plantes, litières, surface du sol) est présentée dans la littérature. Étant donné qu'elle est complexe à appliquer, cette méthode ne sera pas détaillée ici. La documentation technique fournit également des équations basées sur des analyses statistiques de régression effectuées à partir de données de suivi d'installations existantes. Comme pour les marais à écoulement sous-surfacique, l'absence d'informations sur les paramètres de conception et d'exploitation rend ces équations difficilement applicables dans d'autres contextes.

### 8.5.2.1 Approche basée sur le temps de rétention hydraulique

Cette approche basée sur le temps de rétention hydraulique (Reed et collab., 1995 ; Crites et collab., 2014) est la même que celle qui s'applique aux marais à écoulement horizontal sous la surface (équations 08.02 à 08.04). On devrait toutefois adapter les valeurs des constantes.

De plus, le temps de rétention hydraulique se calcule à l'aide de l'équation 08.01 (voir section 8.4.2.1).

Les valeurs proposées pour les paramètres du modèle sont présentées au Tableau 8.5.2-1.

**Tableau 8.5.2-1 – Paramètres du modèle de Reed et collab. (1995) pour un marais à écoulement en surface**

Paramètre	Unité	DBO <sub>5</sub>	AAT <sup>(1)</sup>	NO <sub>x</sub> -N <sup>(2)</sup>
k <sub>20</sub>	d <sup>-1</sup>	0,678	0,2187	1,000
θ	-	1,06	1,048	1,15
ε	-	0,65 à 0,9 <sup>(3)</sup>		
C*	mg/l	6	0,2	0,2
h <sup>(4)</sup>	m	0,3 à 0,6		

Notes :

1. Bien que la nitrification s'exerce sur l'azote ammoniacal, il est recommandé de supposer que tout l'azote total Kjeldahl (NTK) sera ammonifié et susceptible d'être nitrifié.
2. Dans le calcul de la dénitrification, il faut considérer les NO<sub>x</sub> de l'affluent du marais et tenir compte de la nitrification qui s'exercera dans le marais.
3. Gamme ajustée selon l'information donnée par Crites et collab. (2014). Étant donné qu'il n'y a pas de milieu filtrant dans un marais à écoulement en surface, Dotro et collab. (2017) considèrent même une porosité égale à 1,0.
4. Hauteur d'eau libre

Source : Crites et collab. (2014).

Crites et collab. (2014) recommandent d'appliquer un facteur de sécurité de 15 % à 25 % sur la surface calculée en fonction de l'incertitude entourant les données utilisées et de la sévérité des exigences de rejet.

Similairement à l'équation 08.08, l'enlèvement des MES dans un marais à écoulement en surface peut se calculer à l'aide de l'équation suivante (Crites et collab., 2014) :

**Équation 08.12 :** 
$$C_{e,MES} = C_{a,MES} (0,1139 + 0,00213 \cdot 10^{-4} TCH)$$

où :

C<sub>e,MES</sub> : concentration de MES à l'effluent (mg/l) ;

C<sub>a,MES</sub> : concentration de MES à l'affluent (mg/l) ;

TCH : taux de charge hydraulique (m<sup>3</sup>.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>).

Un bruit de fond en MES de 6 mg/l est attendu (Crites et collab., 2014).

### 8.5.2.2 Approche basée sur la charge hydraulique superficielle

Cette approche est basée sur la réduction des contaminants en fonction de la charge hydraulique superficielle appliquée au marais (Kadlec et Knight, 1996). Elle présuppose que le volume de rétention supplémentaire au-delà d'une certaine hauteur d'eau contribue peu au traitement, entre autres parce que l'épaisseur de litière est limitée et que la surface de contact avec le sol n'augmente pas. Les auteurs de cette approche considèrent que la température n'a pas d'incidence sur le rendement, sauf pour l'azote. Ils considèrent toutefois un bruit de fond ou une concentration limite pour chaque paramètre, compte tenu de la nature même des marais.

- Calcul de la superficie requise (Crites et collab., 2014) :

**Équation 08.13 :** 
$$A = \frac{Q}{k_T} \ln \left( \frac{C_a FS - C^*}{C_e - C^*} \right)$$

où :

A : superficie requise (m<sup>2</sup>) ;  
 Q : débit (m<sup>3</sup>/d) ;  
 k<sub>T</sub> : constante d'ordre 1 à la température T (d<sup>-1</sup>) ;  
 C<sub>a</sub> : concentration à l'affluent (mg/l) ;  
 FS : facteur de sécurité (adimensionnel) ;  
 C\* : bruit de fond (mg/l) ;  
 C<sub>e</sub> : concentration à l'effluent (mg/l).

- Calcul de la concentration à l'effluent (Crites et collab., 2014) :

**Équation 08.14 :** 
$$C_e = C^* + (C_a - C^*) e^{\left(\frac{-k_T A}{Q}\right)}$$

La valeur de k<sub>T</sub> peut être ajustée en fonction de la température en utilisant la relation d'Arrhenius :

**Équation 08.15 :** 
$$k_T = k_{20} \theta^{(T-20)}$$

Les valeurs proposées pour les paramètres du modèle sont présentées au Tableau 8.5.2-2.

**Tableau 8.5.2-2 – Paramètres du modèle de Kadlec et Knight (1996) pour un marais à écoulement en surface**

Paramètre	Unité	DBO <sub>5</sub>	MES	AAT	NO <sub>x</sub> -N	N <sub>org</sub>	N <sub>T</sub>	P <sub>T</sub>	CF
k <sub>20</sub>	m/d	0,093	2,740	0,049	0,096	0,047	0,060	0,033	0,205
θ	-	1,00	1,00	1,04	1,09	1,05	1,09	1,00	1,00
C*	mg/l	3,5 + 0,053 C <sub>a</sub>	5,1 + 0,16 C <sub>a</sub>	0,00	0,00	1,50	1,50	0,02	300
FS	-	0,590	0,526	0,400	0,400	0,555	0,625	0,555	0,333

Source : Crites et collab. (2014)

### 8.5.3 Hauteur d'eau

La hauteur d'eau libre au-dessus de la litière du marais à écoulement en surface devrait être limitée au niveau maximal d'immersion que peuvent supporter les plantes sélectionnées. Dans tous les cas, la limite haute est au maximum de 0,60 m (Dotro et collab., 2017). La hauteur d'eau libre se situe généralement entre 0,15 m et 0,45 m (Kadlec et Wallace, 2009), et la valeur typique est de 0,30 m (Dotro et collab., 2017). Le niveau d'eau devrait pouvoir être augmenté en hiver pour tenir compte de l'épaisseur de glace susceptible de se former et de l'augmentation du temps de rétention qui pourrait être requise.

### 8.5.4 Géométrie

La superficie des marais à écoulement surfacique indiquée dans la littérature va de quelques mètres carrés à plusieurs kilomètres carrés (Kadlec et Wallace, 2009). Il est préférable de prévoir au moins deux cellules de façon à assurer une redondance (voir section 8.2.5) si l'une d'elles devait être contournée.

La forme des bassins peut être adaptée aux contraintes du site. Il faut cependant favoriser un écoulement le plus uniforme possible pour utiliser la superficie entière des marais et prévenir le court-circuitage. Il est recommandé que le rapport longueur/largeur soit compris entre 2 : 1 et 4 : 1 (Crites et collab., 2006, cités par Kadlec et Wallace, 2009). Si l'on utilise un rapport longueur/largeur très élevé, il peut être requis de vérifier la vitesse d'écoulement et la perte de charge dans le bassin.

La vitesse dans la zone d'entrée devrait être comprise entre 0,3 m/s et 0,5 m/s (Crites et collab., 2014).

La vitesse d'écoulement dans le reste du marais devrait demeurer suffisamment faible pour favoriser la sédimentation et prévenir une remise en suspension des particules. On recommande une vitesse linéaire inférieure à 0,2 m/s (US Army Corps of Engineers, 2000, cité par Kadlec et Wallace, 2009). En général, la vitesse d'écoulement dans les marais existants est bien inférieure à cette vitesse critique. Kadlec et Wallace (2009) rapportent qu'elle dépasse rarement 100 m/d soit 0,001 m/s.

L'ajout de zones profondes perpendiculaires au sens de l'écoulement et dépourvues de plantes peut favoriser une répartition plus uniforme du débit dans le marais. Elles sont généralement situées à l'amont et à l'aval du marais où se trouvent les dispositifs d'entrée et de sortie. Des zones intermédiaires optionnelles peuvent également être ajoutées au centre du marais.

Le calcul de perte de charge peut avoir pour effet de limiter la longueur du marais ou d'augmenter le gradient hydraulique. Ce calcul peut se faire très simplement à l'aide de la formule suivante (Kadlec et Wallace, 2009) :

**Équation 08.16 :** 
$$v = a h^{(b-1)} i^c$$

où :

v : vitesse d'écoulement (m/s) ;  
a, b, c : paramètres de friction (adimensionnels) ;  
h : hauteur d'eau à partir du fond du marais (m) ;  
i : gradient hydraulique (m/m).

Les valeurs des paramètres sont les suivantes (Kadlec et Wallace, 2009) :

- $a = 1,0 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  (végétation dense) ;
- $b = 5,0 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$  (végétation éparse) ;
- $b = 3,0$  ;
- $c = 1,0$ .

Kadlec et Wallace (2009) fournissent des explications détaillées pour le calcul des pertes de charge.

### 8.5.5 Dispositifs d'entrée et de sortie

L'alimentation du marais se fait par gravité ou sous pression (Kadlec et Wallace, 2009). La distribution des eaux à l'entrée et leur évacuation à la sortie se font généralement en plusieurs points à l'aide de conduites en « T » perforées. Le diamètre des orifices et leur espacement dépendent du débit (Crites et collab., 2014). Le diamètre des orifices devrait toutefois être d'au moins 5 mm pour éviter leur colmatage par les MES présentes dans l'affluent (Kadlec et Wallace, 2009). Dans le cas d'une alimentation sous pression, il est recommandé de prévoir de nombreux orifices et une grande section transversale du marais pour limiter les risques d'érosion (Kadlec et Wallace, 2009).

Il est important lors de la construction de s'assurer que les conduites sont installées de niveau et que le sol est bien compacté pour qu'elles le restent pendant toute la durée de vie du procédé. Il peut être nécessaire de les soutenir à l'aide d'une base en béton (Crites et collab., 2014).

Il est recommandé de prévoir un port de nettoyage sur chaque conduite pour les déboucher en cas de colmatage (Crites et collab., 2014). Il est également recommandé de prévoir une conduite de dérivation permettant l'alimentation du marais en cas de colmatage du dispositif de distribution (Kadlec et Wallace, 2009).

Pour protéger les conduites d'alimentation et d'évacuation du gel, il est recommandé de les installer dans le marais en dessous du niveau que peut atteindre la couche de glace (Kadlec et Wallace, 2009). Si les conduites d'alimentation et d'évacuation sont situées au même niveau que le lit, la végétation et la litière

peuvent s'y introduire et boucher les orifices. Pour éviter cela, une zone profonde peut être installée à l'entrée et à la sortie du marais (Crites et collab., 2009). La zone profonde devrait descendre au moins 1,0 m en dessous du fond du lit végétalisé (Kadlec et Wallace, 2009 ; voir Figure 8.4.6-1). Il est également possible d'installer les conduites sur un enrochement grossier (pierre de 70 mm à 150 mm de diamètre) (Crites et collab., 2014).

On devrait installer un dispositif d'ajustement du niveau de l'eau dans le marais.

Des informations complémentaires sur les dispositifs d'entrée et de sortie sont disponibles à la section 8.8.3.

### **8.5.6 Terrassement et digues**

Le fond des marais devrait être nivelé avec une tolérance de l'ordre de 3 cm. On peut prévoir une pente d'environ 0,5 % pour en faciliter le drainage. La couche de terre arable enlevée lors de l'excavation peut être réutilisée comme couche de fond. L'épaisseur de cette couche est d'au moins 20 cm et peut aller jusqu'à 30-40 cm pour la mise en place des plantes.

La conception des digues devrait être faite dans les règles de l'art du génie civil et en suivant les considérations géotechniques requises pour en assurer la stabilité et l'étanchéité. La largeur au sommet des digues devrait respecter les recommandations de la CNESST pour assurer la sécurité des opérateurs (voir notamment le chapitre 9 – section 9.2.5.3). Elle devrait être d'au moins 3 m, si la circulation d'un véhicule y est prévue (Kadlec et Wallace, 2009). La pente typique des talus (projection horizontale : projection verticale) est de 2 : 1 à 3 : 1. On recommande une revanche de 300 à 600 mm (voir Figure 8.4.6-1).

## 8.6 Autres types de marais

### 8.6.1 Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides sont des systèmes composés de marais à écoulement vertical suivis de marais à écoulement horizontal sous la surface. Ils peuvent être utilisés directement en aval d'une fosse septique, comme traitement secondaire d'eaux usées d'origine domestique. Les caractéristiques de ces deux étapes de traitement sont celles décrites aux sections 8.3 et 8.4.

### 8.6.2 Bassins avec plantes aquatiques flottantes

Des systèmes de traitement d'eaux usées constitués de bassins recouverts de plantes aquatiques flottantes, telles les jacinthes d'eau ou les lenticules, sont utilisés principalement aux États-Unis. Au Québec, des expériences ont été menées en introduisant des plantes aquatiques flottantes à la surface d'étangs aérés dans le but de remplacer les coagulants chimiques ajoutés pour la déphosphatation des eaux usées (Le Groupe Steica inc., 1996). Des jacinthes d'eau ont été utilisées à Saint-Élie d'Orford alors que des lenticules ont été implantées à Roxton-Pond. La récolte des plantes aquatiques s'avère nécessaire pour maintenir l'efficacité de la déphosphatation. Aucun système de traitement par des plantes aquatiques flottantes n'a été réalisé pour le traitement secondaire d'eaux usées domestiques dans les conditions climatiques du Québec.

Les systèmes comprenant des plantes aquatiques flottantes ne sont pas inclus dans les technologies de traitement par marais artificiels aux fins du présent guide. Des cas particuliers d'utilisation saisonnière, principalement pour la déphosphatation, pourraient être considérés, mais ils devraient faire l'objet d'une analyse au cas par cas.

### 8.6.3 Autres variantes

#### Généralités

D'autres systèmes commerciaux utilisant des plantes dans le traitement des eaux usées d'origine domestique peuvent faire appel à des concepts ou à des milieux spécifiques autres que ceux prévus dans ce guide. Ces variantes devraient être classées selon la procédure applicable aux nouvelles technologies.

#### Marais à écoulement vertical à étages

La DWA (2017) propose un système composé de deux étages de marais à écoulement vertical. Le milieu filtrant du premier étage est du gravier fin de 2-8 mm et celui du second est du sable grossier de 0-4 mm. Ce système est utilisé comme traitement secondaire. Il permet d'atteindre, sans recirculation de l'effluent, environ 60 % d'enlèvement de l'azote total en période estivale, ce qui est supérieur au marais à écoulement vertical à un seul étage (voir section 8.7.1).

#### Marais aérés

Il existe également des marais à écoulement horizontal sous la surface et des marais à écoulement vertical aérés. Ces marais aérés sont exploités en condition saturée (DWA, 2017). Ils sont composés d'un milieu filtrant plus grossier (gravier 8-16 mm) pour favoriser la répartition de l'oxygène dans le filtre (DWA, 2017). Le système d'aération devrait être dimensionné en considérant la demande en oxygène pour l'enlèvement des contaminants organiques et azotés. La concentration d'oxygène dissous dans le milieu filtrant devrait être supérieure à 2 mg/l (DWA, 2017). Une capacité d'aération insuffisante peut induire des conditions anaérobies qui auront un effet sur les performances épuratoires du système. Pour éviter l'apparition de zones non aérées, les murs du marais aérés devraient être verticaux (aucune pente) (DWA, 2017).

Les marais aérés peuvent atteindre de meilleures performances épuratoires que ceux sans aération, surtout en ce qui concerne l'enlèvement de l'azote total. Une aération intermittente (succession de cycles avec et sans aération) permet même d'accroître cet enlèvement. Aucune recirculation de l'effluent n'est requise. L'aération intermittente permet d'enlever jusqu'à 50 % de l'azote total dans un marais à écoulement horizontal sous la surface et jusqu'à 75 % de l'azote total dans un marais à écoulement vertical (DWA, 2017).

Une couche isolante à la surface du marais à écoulement vertical (avec du paillis, par exemple) est recommandée pour éviter que le lit gèle en hiver (Dotro et collab., 2017).

### **Recirculation de l'effluent**

Des systèmes à recirculation de l'effluent ont fait l'objet de plusieurs recherches depuis les années 2000. Au Danemark, la moitié de l'effluent des marais à écoulement vertical est retournée dans la fosse septique lorsque la superficie des lits dépasse 90 m<sup>2</sup> (Dotro et collab., 2017). Cette recirculation de l'effluent en tête du traitement primaire (Dotro et collab., 2017) ou en tête du marais à écoulement vertical (DWA, 2017) a notamment pour but d'améliorer l'enlèvement de l'azote total.

PRÉLIMINAIRE

## 8.7 Performances épuratoires

### 8.7.1 Marais à écoulement vertical

Comme indiqué à la section 8.3.2, la conception des marais à écoulement vertical est basée sur des critères empiriques. La performance attendue provient de résultats publiés dans la littérature pour diverses installations existantes.

Le Tableau 8.7.1-1 présente les rendements rapportés par Dotro et collab. (2017) pour les marais à écoulement vertical.

**Tableau 8.7.1-1 – Rendements des marais à écoulement vertical**

Paramètre	DBO <sub>5</sub>	MES	AAT	N <sub>T</sub>	P <sub>T</sub>	CF
Enlèvement	>90 %	>90 %	>90 %	<20 %	10-20 %	2-4 log

Source : Dotro et collab. (2017).

En ce qui concerne les coliformes fécaux, la DWA (2017) considère plutôt un abattement de 1,5-2,5 logs.

La documentation relative aux marais à écoulement vertical ne permet pas d'évaluer une baisse de rendement en conditions froides comme celles du Québec. À défaut de données représentatives, il y a lieu d'adopter une approche conservatrice et de considérer un rendement similaire à celui d'autres systèmes de traitement biologique expansifs. Ainsi, un enlèvement moindre de la DBO<sub>5</sub> équivalent à celui normalement prévu pour des étangs aérés pourrait être considéré, soit 60 % d'enlèvement l'hiver.

Selon la DWA (2017), un marais vertical utilisé en traitement secondaire et conçu en suivant les critères présentés à la section 8.3.2 est en mesure de respecter minimalement les concentrations à l'effluent suivantes :

- ≤ 40 mg/l de DBO<sub>5</sub>.
- ≤ 150 mg/l de DCO.
- ≤ 10 mg-N/l d'AAT si la température est supérieure à 12 °C.

### 8.7.2 Marais à écoulement horizontal sous la surface

Une base de données regroupant les performances de 71 marais artificiels à écoulement horizontal sous la surface utilisés comme traitement secondaire au Danemark a été compilée par Schierup en 1990 (Kadlec et Knight, 1996). Ces marais étaient généralement précédés d'un traitement primaire rudimentaire. Leurs rendements moyens sont présentés au Tableau 8.7.2-1. Le taux de charge hydraulique moyen appliqué à ces installations était de 50 L.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>.

Le Tableau 8.7.2-1 présente également les concentrations moyennes mesurées à l'effluent de trois stations d'épuration municipales québécoises de type marais à écoulement horizontal sous la surface entre 2009 et 2013.

**Tableau 8.7.2-1 – Rendements moyens de marais à écoulement horizontal sous la surface**

Paramètre	Danemark <sup>[A]</sup> Kadlec et Knight (1996)			Québec <sup>[B]</sup> SOMAEU	Dotro et collab. (2017)
	Concentration (mg/l)		Rendement	Concentration (mg/l) Effluent	Rendement
	Affluent	Effluent			
DBO <sub>5</sub>	128	18	86 %	5,5	> 80 %
MES	163	27	83 %	7,9	> 80 %
N <sub>T</sub>	37	21	43 %	nd	30-50 %
NTK	nd	nd	nd	nd	nd
AAT	21	14	33 %	nd	20-30 %
NO <sub>x</sub>	4,1	2,0	51 %	nd	nd
P <sub>tot</sub>	9,1	5,8	36 %	2,0	10-20 %
Coliformes fécaux	nd	nd	nd	Min : 36 Max : 5,7 x 10 <sup>4</sup>	2 logs

<sup>[A]</sup> Moyenne de 71 installations

<sup>[B]</sup> Moyennes des données de trois stations d'épuration (SOMAEU) compilées de 2009 à 2013

Dotro et collab. (2017) indiquent que l'effluent des marais à écoulement horizontal sous la surface présente généralement des concentrations de DBO<sub>5</sub> et de MES inférieures à 20 mg/l, ce qui est similaire aux résultats du Tableau 8.7.2-1. D'autres auteurs rapportent également d'excellents rendements, notamment Geller (1997) qui a compilé des résultats d'installations situées dans les pays germaniques.

Les conditions anaérobies voire anoxiques limitent la nitrification. À moins que l'affluent soit peu chargé en azote ou que les charges organiques appliquées soient faibles, des concentrations d'azote ammoniacal relativement élevées peuvent être attendues à l'effluent, comme il est indiqué au Tableau 8.7.2-1.

Selon Dotro et collab. (2017), l'enlèvement moyen du phosphore se situe entre 10 % et 20 % sur un horizon à long terme. Il est possible que les rendements les plus importants (36 % et 68 %) présentés au Tableau 8.7.2-1 aient été obtenus sur des durées plus courtes. Lors des premières années d'exploitation, l'enlèvement du phosphore peut effectivement atteindre des performances bien supérieures aux valeurs moyennes à long terme.

Les performances de désinfection sont de l'ordre de deux unités logarithmiques pour l'abattement des coliformes fécaux, et leur concentration à l'effluent varie typiquement de 10<sup>3</sup> à 10<sup>4</sup> UFC/100 ml (Burgan et Sievers, 1994; Rivera et collab., 1995; Gersberg et collab., 1989; Mankin et Powell, 1998).

Sur la base des renseignements ci-dessus, les concentrations attendues à l'effluent de marais à écoulement horizontal sous la surface sont approximativement les suivantes :

- 20 à 25 mg/l de DBO<sub>5</sub>C.
- 20 à 25 mg/l de MES.
- 10<sup>4</sup> UFC/100 ml de coliformes fécaux.

Une attention devrait cependant être portée à l'aspect hydraulique, car ces performances peuvent être réduites en cas d'écoulement préférentiel à la surface du milieu. C'est particulièrement le cas pour l'abattement des coliformes fécaux.

### 8.7.3 Marais à écoulement en surface

Une base de données nord-américaine sur les marais à écoulement en surface appliqués comme traitement de polissage d'effluents secondaire a été préparée par la US EPA. Un sommaire des rendements moyens à long terme est présenté par Kadlec et Knight (1995). Les concentrations moyennes à l'affluent et à l'effluent pour différents paramètres sont résumées au Tableau 8.7.3-1. Ce tableau présente également les performances des marais à écoulement en surface suggérées par Dotro et collab. (2017).

**Tableau 8.7.3-1 – Rendement moyen des marais à écoulement en surface**

Paramètre	Base de données nord-américaine (Kadlec et Knight, 1995)		Dotro et collab. (2017)	
	Concentration (mg/l) Affluent	Concentration (mg/l) Effluent	Rendement	Rendement
DBO <sub>5</sub>	30,3	8,00	74 %	> 80 %
MES	45,6	13,5	70 %	> 80 %
N <sub>T</sub>	nd	nd	nd	30-50 %
NTK	7,60	4,31	43 %	nd
AAT	4,88	2,23	54 %	> 80 %
NO <sub>x</sub>	5,56	2,15	61 %	nd
P <sub>tot</sub>	3,78	1,62	57 %	10-20 %
Coliformes fécaux	nd	nd	nd	1 log

Comme pour les marais à écoulement horizontal sous la surface, Dotro et collab. (2017) rapportent des taux d'enlèvement du phosphore total à long terme de l'ordre de 10 à 20 %. Il est possible que le rendement moyen plus important (57 %) calculé à partir de la base de données nord-américaine présenté au Tableau 8.7.3-1 ait été obtenu sur des durées plus courtes. Il est donc préférable de se fier au rendement suggéré par Dotro et collab. (2017) en ce qui concerne le phosphore.

### 8.7.4 Systèmes hybrides

La performance des systèmes hybrides est au moins équivalente à celle d'un traitement secondaire par marais à écoulement horizontal sous la surface prévue à la section 8.7.2. Sachant que la qualité de l'effluent d'un marais à écoulement vertical est meilleure que celle minimalement acceptable à l'affluent d'un marais à écoulement horizontal sous la surface (100 mg DBO<sub>5</sub>/l), on s'attend généralement à un rendement supérieur. Il est toutefois difficile de chiffrer ce rendement plus élevé compte tenu du peu de données disponibles.

Au Québec, un projet hybride en démonstration à la Biosphère de Montréal a fait l'objet d'un suivi durant plusieurs années (IRVB, 1998). La filière de traitement était composée d'une fosse septique puis d'une première étape de marais à écoulement horizontal sous la surface suivie de deux étapes de marais à écoulement en surface. Ces deux derniers marais ne sont pas exploités en hiver. Le taux de charge hydraulique moyen était de 24 L.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>. Le rendement moyen atteint par les unités après 3 ans d'exploitation est résumé au Tableau 8.7.2-1. Après 15 ans d'exploitation, le système ne montre toujours pas de diminution des performances épuratoires (Brisson et Vincent, 2009). Le système hybride de la Biosphère a démontré son efficacité pour l'enlèvement des contaminants été comme hiver.

**Tableau 8.7.4-1 – Rendements moyens du système hybride de la Biosphère de Montréal**

Paramètre	Moyenne 3 premières années d'exploitation (1995 -1997) <sup>[A]</sup>		Rend.	1995	1996	1997	2003	2005	2007	2009
	Concentration (mg/l)			Rendement <sup>[B]</sup>						
	Affluent	Effluent								
DBO <sub>5</sub>	132	20	85 %	97 %	98 %	98 %	100 %	100 %	73 %	-
MES	66	13	80 %	64 %	86 %	86 %	85 %	67 %	-	88 %
N <sub>T</sub>	nd	nd	nd							
NTK	76	38	50 %	84 %	86 %	84 %	92 %	95 %	93 %	-
AAT	68	34	50 %	80 %	95 %	94 %	95 %	100 %	100 %	99 %
NO <sub>x</sub>	nd	nd	nd	-	87 %	80 %	-	-	-	-
P <sub>tot</sub>	9,6	3,1	68 %	98 %	74 %	74 %	100 %	91 %	96 %	-
Coliformes fécaux	1,0 x 10 <sup>6</sup> UFC/100 ml	1,5 x 10 <sup>3</sup> UFC/100 ml	~ 3 logs	3 logs	3 logs	3 logs	-	-	-	-

<sup>[A]</sup> Source : IRVB (1998)

<sup>[B]</sup> Source : Brisson et Vincent (2009). Les rendements des années 1995, 1996, et 1997 sont basés sur des moyennes annuelles, excluant l'hiver, calculées à partir d'un bilan de masse. Les rendements des autres années ont été calculés à partir de campagnes d'échantillonnage réalisées durant la période de croissance des plantes (comparaison entre les concentrations à l'affluent et à l'effluent).

## 8.8 Installation

Les caractéristiques générales relatives à l'installation qui sont décrites ci-dessous peuvent s'appliquer aux différents types de marais.

### 8.8.1 Imperméabilisation

Les marais devraient être des ouvrages étanches. Lorsque le sol dans lequel ils sont établis est trop perméable, c'est-à-dire que sa conductivité hydraulique est supérieure à  $10^{-6}$  cm/s, le fond et les parois devraient être imperméabilisés. L'imperméabilisation a pour but de prévenir la contamination et de retenir l'eau nécessaire à la croissance de la végétation. Elle peut être faite au moyen d'une couche d'argile, d'une géomembrane ou d'une barrière hydraulique équivalente (EC/EWPCA Emergent Hydrophyte Treatment Systems Expert Contact Group, 1990).

### 8.8.2 Mise en place des matériaux

Les matériaux filtrants devraient être mis en place à partir de l'extérieur des lits ou en utilisant des équipements légers pour éviter leur compaction. Les caractéristiques granulométriques des matériaux devraient être vérifiées. Il faut aussi veiller à ce qu'il n'y ait pas de ségrégation des matériaux lors de leur mise en place. Une surface de lits bien nivelée est requise pour assurer une bonne répartition des eaux usées et prévenir l'écoulement préférentiel.

### 8.8.3 Dispositifs d'entrée et de sortie

Les dispositifs d'alimentation des marais et de distribution des eaux usées devraient être conçus de façon à assurer une répartition uniforme et une utilisation optimale de toute la superficie de traitement. Ils devraient être aménagés de manière à prévenir les problèmes causés par le gel. Les conduites de distribution et de collecte devraient être accessibles pour faciliter leur nettoyage lorsque nécessaire.

L'installation d'une chambre d'ajustement du niveau d'eau à la sortie des marais est nécessaire pour permettre leur drainage et la modification du gradient hydraulique lorsque requis. La plage d'ajustement devrait être suffisamment grande pour être en mesure de noyer un marais à écoulement vertical ou horizontal sous-surfacique jusqu'à une hauteur de 200 mm au-dessus de la surface du lit. Pour un marais à écoulement en surface, l'élévation maximale est de 600 mm par rapport au niveau du fond. Divers dispositifs peuvent être prévus à cette fin (Figure 8.8.4-1), comme une conduite flexible dont l'extrémité est extensible, une conduite verticale avec des sections interchangeables ou une conduite munie d'un joint rotatif à son extrémité. Si un déversoir est utilisé, son niveau devrait être variable, et une chicane devrait être placée en amont pour en prévenir le colmatage par les débris provenant du marais.

### 8.8.4 Accès au site

La zone de traitement d'eaux usées devrait être clairement indiquée. Si l'endroit est accessible par le public, il y a lieu de clôturer l'installation.

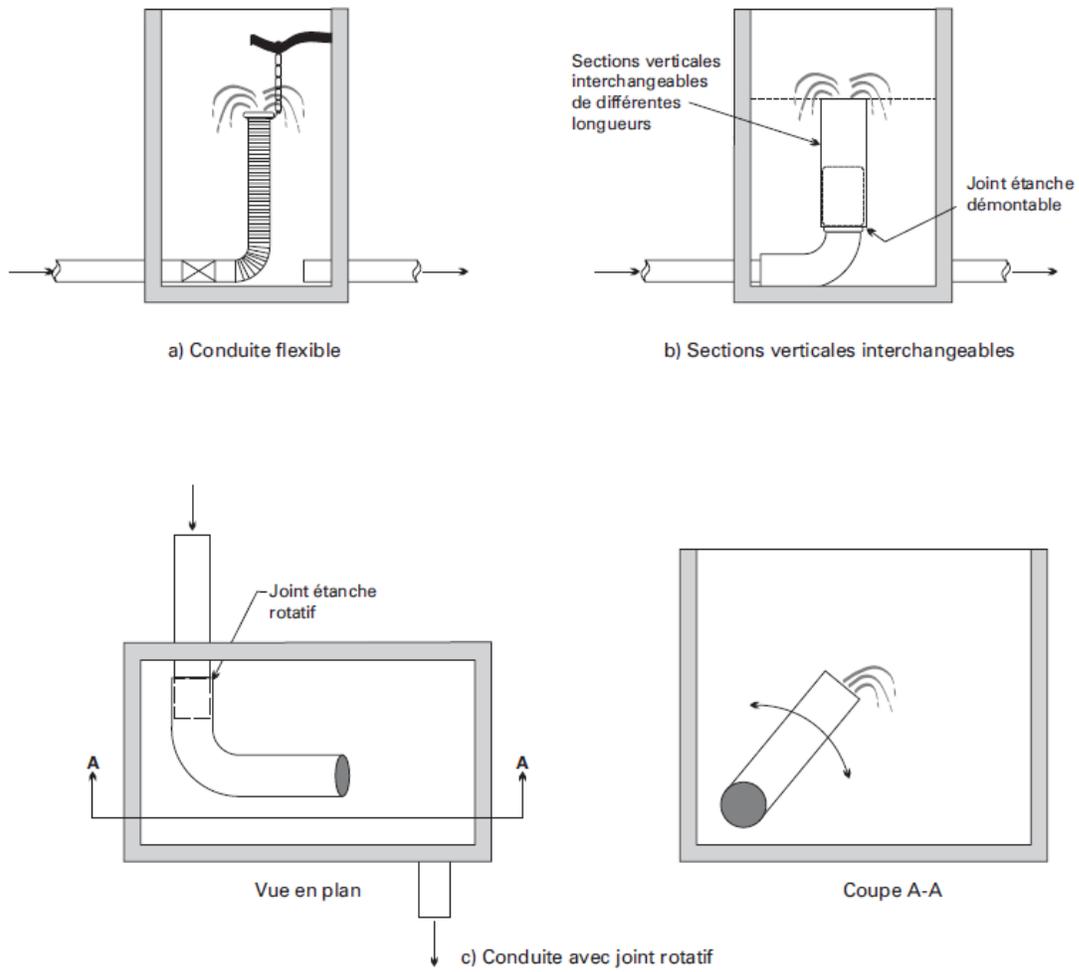


Figure 8.8.4-1 – Exemples de dispositifs d'ajustement du niveau

## 8.9 Exploitation

La fosse septique utilisée comme prétraitement devrait être inspectée et entretenue de la même façon que dans le cas des installations septiques ou des filtres intermittents.

Le bon fonctionnement du dispositif de distribution des eaux usées sur toute la largeur ou la superficie du marais selon le cas devrait être vérifié régulièrement. On devrait nettoyer les conduites lorsque requis. Si l'on constate des zones d'eau stagnante, on devrait apporter les correctifs nécessaires. Dans le cas de lits alimentés en alternance, il faut s'assurer que chaque unité reçoit approximativement la même quantité d'eaux usées.

L'état de la végétation devrait être inspecté régulièrement. Des corrections devraient être réalisées si certaines zones ne sont pas couvertes de plantes. Une attention particulière devrait être portée pendant la période de plantation des végétaux, surtout la première année. Certaines interventions peuvent être requises comme un rehaussement du niveau d'eau au-dessus de la surface du lit pour enrayer les plantes non désirées ou une baisse du niveau d'eau pour favoriser la croissance des racines en profondeur. Il est souhaitable que la reprise des plantes et leur entretien pendant cette période soient assurés par l'entrepreneur responsable de la plantation. Il n'est généralement pas recommandé de faucher les plantes des marais. À long terme, la litière et les solides accumulés peuvent nécessiter un enlèvement.

Le niveau d'eau dans les marais devrait être vérifié régulièrement à l'aide de piézomètres. Dans le cas des marais à écoulement horizontal sous la surface, il peut être requis de rehausser la sortie pour maintenir le niveau d'eau dans les marais en période prolongée de faible débit. À l'opposé, le niveau de sortie peut devoir être abaissé lors de débits élevés pour éviter une accumulation d'eau en surface. En cas de perte de niveau d'eau dans des marais à écoulement horizontal, l'étanchéité des digues devrait être vérifiée, et des correctifs devraient être apportés s'il y a lieu.

Un entretien des digues (fauchage ou tonte) est recommandé. L'état des digues devrait être vérifié pour apporter des corrections en cas d'érosion ou de bris causés par de petits animaux.

On doit produire un manuel d'exploitation détaillé permettant à l'exploitant de bien comprendre le fonctionnement du système, notamment la gestion des plantes et du niveau d'eau. Le manuel devrait le renseigner sur les tâches d'inspection et d'entretien préventif à réaliser sur les différentes parties d'équipement, leur fréquence ainsi que les critères d'intervention.

## 8.10 Résumé

SOMMAIRE – MARAIS ARTIFICIELS	
Types de marais – application <sup>7</sup>	Tableau 8.2-1
Type de plantes	
Typha (quenouille)	Esp. 0,6 m, Prof. 0,3 m, Subm. 0,3 m
Scirpes (Scirpus et Schoenoplectus)	Esp. 0,3-0,6 m, Prof. 0,6 m, Subm. 0,15-0,3 m
<i>Sagittaria latifolia</i>	-
<i>Phalaris arundinacea</i>	-
Marais à écoulement vertical	
Schéma	Figure 8.2.8-1
Plantation	4 plants/m <sup>2</sup>
Traitement préalable	Fosse septique
Redondance	≥ 2 unités en parallèle, ¼ surface en repos 1 sem.
Taux de charge hydraulique moyen	80 L.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> (superficie ≤ 400 m <sup>2</sup> ) 200 L.m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup> (si période estivale seulement)
Taux de charge organique moyen	10 g DBO <sub>5</sub> .m <sup>-2</sup> .d <sup>-1</sup>
Composition du lit (à partir du fond) :	Vérification de la loi des filtres entre les couches
Couche drainante :	Pierre lavée : 200-300 mm, D > 10 mm
Couche de transition :	Gravier lavé : 100 mm, 2 < D < 8 mm
Couche filtrante :	Sable : 500-700 mm, 0,2 < D <sub>10</sub> < 0,4 mm, Cu < 5, K ≥ 10 <sup>-4</sup> cm/s
Couche de surface (optionnelle) :	Gravier : 50-100 mm, 4 < D < 8 mm.
Dispositif d'entrée	Alimentation intermittente toutes les six heures Conduite de 40 mm 1 ouverture/m <sup>2</sup> de lit et D > 8 mm
Dispositif de sortie	Conduites munies d'orifices ou de fentes Chambre d'ajustement du niveau (du fond à 0,2 m au-dessus du sol)
Aération	Conduite de sortie verticale ou événements tous les 16 m <sup>2</sup>
Revanche	0,3 m
Marais à écoulement horizontal sous la surface	
Schéma	Figure 8.3.6-1
Plantation	4 plants/m <sup>2</sup>
Traitement préalable	Marais à écoulement vertical ou Trait. suppl. si eff. fosse septique >100 mg/l DBO <sub>5</sub>
Température	16 °C (été) et 5 °C (hiver)
Temps de rétention hydraulique	Équation 08.01
Méthode de conception :	
Enlèvement DBO <sub>5</sub> et azote :	Équations 08.02 à 08.07
Enlèvement MES	Équations 08.08 à 08.09
Milieu filtrant :	Sable et gravier
Conductivité hydraulique	≥10 <sup>-1</sup> cm/s, facteur de sécurité de 3

<sup>7</sup> Compte tenu du caractère envahissant du roseau commun exotique (*Phragmites australis*), le Ministère n'autorise plus de nouveaux systèmes de marais artificiels utilisant cette plante. Seuls les marais artificiels utilisant des plantes non envahissantes peuvent être implantés au Québec. Les roseaux communs exotiques présents dans les marais artificiels déjà existants n'ont pas à être remplacés, mais tout agrandissement d'un marais artificiel existant doit être effectué avec des plantes non envahissantes.

**SOMMAIRE – MARAIS ARTIFICIELS (SUITE)****Marais à écoulement horizontal sous la surface (suite)**

Géométrie :	Profondeur du lit	0,5-0,6 m selon profondeur des racines
	Hauteur d'eau à l'entrée	0,4-0,5 m
	Hauteur d'eau à la sortie	≥ 80 % hauteur d'eau max.
	Pente de fond	Horizontal ou 0,5-2 %
	Longueur	Équation 08.10 (loi de Darcy), min. 3,0 m
	Largeur	Équation 08.11, max. 25-30 m
	Ratio longueur/largeur	0,25 : 1 et 4 : 1
	Revanche	0,3 à 0,5 m
Dispositif d'entrée	Alimentation continue Conduite en « T » ou orifices aux 10 % de largeur Tranchée de pierre 25 < D < 100 mm	
Dispositif de sortie	Tranchée de pierre avec conduite perforée Chambre d'ajustement du niveau (du fond à 0,2 m au-dessus du sol)	

**Marais à écoulement en surface**

Schéma	Figure 8.4.6-1	
Plantation :	10 000 plants/ha	
Traitement préalable	Traitement secondaire	
Méthode de conception	Équations 08.01 à 08.04, 08.12, 08.13 à 08.15	
Hauteur d'eau	0,15 à 0,60 m	
Géométrie :	Rapport longueur/largeur minimum	2:1 à 4 : 1
	Vitesse à l'entrée	0,3 à 0,5 m/s
	Vitesse linéaire	< 0,2 m/s
	Perte de charge	Équation 08.16
Dispositif d'entrée	Conduite en zone profonde ou sur un lit de pierre grossière Conduite de dérivation en surface	
Dispositif de sortie	Conduite en zone profonde ou sur un lit de pierre grossière Chambre d'ajustement du niveau (du fond à 0,6 m de hauteur)	
Terrassement :	Pente	0,5 %
	Épaisseur litière	20-40 cm
Digues :	Largeur	Selon les normes de la CNESST
	Pente	3H : 1V
	Revanche	0,3 m à 0,6 m

## 8.11 Références bibliographiques

AUSTIN, D., D. MACIOLEK, B. DAVIS et S. WALLACE (2007). « Damköhler number design method to avoid clogging of subsurface flow constructed wetlands by heterotrophic biofilms », *Water Science & Technology*, vol. 56, n° 3, p. 7-14.

BOUTIN, C., A. LIÉNARD et D. ESSER (1997). « Development of a New Generation of Reed-bed Filters in France : First Results », *Water Science & Technology*, vol. 35, n° 5, p. 315-322.

BOUTIN, C., A. LIÉNARD et D. ESSER (1999). « Les stations d'épuration par filtres plantés de roseaux », *L'eau, l'industrie, les nuisances*, n° 223, p. 45-52.

BREEN, P. F., et A. J. CHICK (1995). « Rootzone Dynamics in Constructed Wetlands Receiving Wastewater : A Comparison of Vertical and Horizontal Flow Systems », *Water Science & Technology*, vol. 32, n° 3, p. 281-290.

BRISSON, J., et G. VINCENT (2009). « The treatment wetland of the Montreal Biosphere: 15 years later », IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in *Water Pollution Control: Newsletter* 35, p. 35-39.

BRIX, H. (1994a). « Use of Constructed Wetlands in Water Pollution Control: Historical Development, Present Status, and Future Perspectives », *Water Science & Technology*, vol. 30, n° 8, p. 209-223.

BRIX, H. (1994 b). « Functions of Macrophytes in Constructed Wetlands », *Water Science & Technology*, vol. 29, n° 4, p. 71-78.

BRIX, H., H.-H. SHIERUP et C. A. ARIAS (2007). « Twenty years experience with constructed wetland systems in Denmark – What did we learn ? », *Water Science & Technology*, vol. 56, n° 3, p. 63-68.

BURGAN, M. A., et D. M. SIEVERS (1994). « On-site Treatment of Household Sewage Via Septic Tank and Two-stage Submerged Bed Wetland », *Proceedings of Seventh International Symposium on Individual and Small Community Sewage Systems*, ASAE Publication, 18-94, p. 77-84.

CHAZARENC, F., S. NAYLOR, Y. COMEAU, G. MERLIN et J. BRISSON (2010). « Modeling the effect of plants and peat on evapotranspiration in constructed wetlands », *International Journal of Chemical Engineering*, p. 1-6.

CHICK, A. J. et D. S. MITCHELL (1995). « A Pilot Study of Vertical Flow Wetlands at Coffs Harbour, New South Wales, Australia », *Water Science & Technology*, vol. 32, n° 3, p. 103-109.

COLE, S. (1998). « The Emergence of Treatment Wetlands », *Small Flows*, vol. 12, n° 4, automne.

COOPER, P., et B. GREEN (1995). « Reed Bed Treatment Systems for Sewage Treatment in the United Kingdom - The First 10 Years' Experience », *Water Science & Technology*, vol. 32, n° 3, p. 317-327.

COOPER, P. (2007). « The constructed wetlands association UK database of constructed wetlands systems », *Water Science & Technology*, vol. 56, n° 3, p. 1-6.

CORDEIRO DE PAOLI, A., et M. VON SPERLING (2013). « Evaluation of clogging in planted un unplanted horizontal subsurface flow constructed wetlands: Solids accumulation and hydraulic conductivity reduction », *Water Science & Technology*, vol. 67, n° 6, p. 1 345-1 352.

CRITES, R. W., E. J. MIDDLEBROOKS, R. K. BASTIAN et S. C. REED (2014). *Natural Wastewater Treatment Systems*, 2<sup>e</sup> éd., Boca Raton, Floride, IWA Publishing, 507 p.

DAVIS, L. (1995). *A Handbook of Constructed Wetlands: A Guide to Creating Wetlands for Agricultural Wastewater, Domestic Wastewater, Coal Mine Drainage, and Stormwater in the Mid-Atlantic Region – Volume 1: General Considerations*, United States Department of Agriculture - Natural Resources Conservation Service (USDA-NRCS) and the United States Environmental Protection Agency: Washington, D.C., 52 p.

DOTRO, G., G. LANGERGRABER, P. MOLLE, J. NIVALA, J. PUIGAGUT, O. STEIN et M. VON SPERLING (2017). *Biological Wastewater Treatment Series – volume 7: Treatment Wetlands*, Londres, Royaume-Uni, IWA Publishing, 154 p.

EC/EWPCA EMERGENT HYDROPHYTE TREATMENT SYSTEMS EXPERT CONTACT GROUP (1990). *European Design and Operations Guidelines for Reed Bed Treatment Systems*, Report No. UI 17, Swindon, UK., P. F. Cooper, Water Research Centre, 37 p.

FINDLATER, B. C., J. A. HOBSON et P. F. COOPER (1990). *Reed Bed Treatment Systems : Performance Evaluation in Water Pollution Control*, Pergamon Press, Oxford, p. 193-204.

GELLER, G. (1997). « Horizontal Subsurface Flow Systems in the German Speaking Countries: Summary of Long-term Scientific and Practical Experiences; Recommendations », *Water Science & Technology*, vol. 35, n° 5, p. 157-166.

GERSBERG, R. M., R. A. GEARHART et M. YVES (1989). « Pathogen Removal in Constructed Wetlands », *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment; Municipal, Industrial and Agricultural*, Chelsea, Michigan, D. A. Hammer Lewis Publishers, p. 431-446.

HABERL, R., R. PERFLER et H. MAYER (1995). « Constructed Wetlands in Europe », *Water Science & Technology*, vol. 32, n° 3, p. 305-315.

HERITAGE, A., P. PISTILLO, K. P. SHARMA et I. R. LANTZKE (1995). « Treatment of Primary-settled Urban Sewage in Pilot-scale Vertical Flow Wetland Filters: Comparison of Four Emergent Macrophyte Species Over a 12 Month Period », *Water Science & Technology*, vol. 32, n° 3, p. 295-304.

HERSKOWITZ, J. (1986). *Listowel Artificial Marsh Project Report*, Ontario Ministry of the Environment, 253 p.

INSTITUT DE RECHERCHE EN BIOLOGIE VÉGÉTALE (IRVB) (1998). *Biosphère - Épuration par voie extensive - Un projet pilote d'épuration d'eaux usées par l'utilisation de marais artificiels*, Université de Montréal - Faculté des arts et sciences - Département de sciences biologiques, Ville de Montréal - Jardin botanique.

KADLEC, R. H. et R. L. KNIGHT (1996). *Treatment Wetlands*, Boca Raton, Floride, Lewis Publishers, 893 p.

KADLEC, R. H. et S. D. WALLACE (2009). *Treatment Wetlands*, 2<sup>e</sup> éd., Boca Raton, Floride, États-Unis, CRC Press, 1 016 p.

KNIGHT, R. L., R. W. RUBBLE, R. H. KADLEC et S. REED (1993). *Database : North American Wetlands for Water Quality Treatment. Phase II Report*.

LE GROUPE STEICA INC. (1996). *Projet de démonstration – Déphosphatation des eaux usées municipales par des plantes aquatiques flottantes : rapport final*, Ministère de l'Environnement et de la Faune, AE96-10/6.

LES CONSULTANTS RSA (1993). *Systèmes de traitement des eaux usées par marais artificiels*, SQAÉ, Ministère de l'Environnement et de la Faune, 212 p.

LES CONSULTANTS RSA (1999). *Recherche pour la déphosphatation des eaux usées municipales à l'aide de marais artificiels*, Les Consultants RSA.

MANKIN, K. R., et G. MORGAN POWELL (1998). « Onsite Rock-plant Filter Monitoring and Evaluation in Kansas », *Proceedings of Eight National Symposium on Individual and Small Community Sewage Systems*, ASAE Publication 03-98, p. 228-236.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (MELCC) (2021). *Bilan de performance des ouvrages municipaux d'assainissement des eaux usées pour l'année 2019*, [s. é.], Québec, 79 p.

MORVANNOU, A., N. FORQUET, S. MICHEL, S. TROEACH et P. MOLLE (2015). « Treatment performance of French constructed wetlands: Results from a database collected over the last 30 years », *Water Science & Technology*, vol. 71, n° 9, p. 1 333-1 339.

PANDEY, M. K., P. D. JENSEN, T. KROGSTAD et S. JONASSON (2013). « Comparison of vertical and horizontal flow planted and unplanted subsurface flow wetlands treating municipal wastewater », *Water Science & Technology*, vol. 68, n° 1, p. 117-123.

QUELUZ, J. G. T., F. F. S. PEREIRA et R. M. SANCHEZ-ROMAN (2018). « Evapotranspiration and crop coefficient for *Typha latifolia* in constructed wetlands », *Water Science & Technology*, vol. 53, n° 2, p. 53-60.

REED, S. C. et D. BROWN (1995). « Subsurface Flow Wetlands - A Performance Evaluation », *Water Environment Research*, vol. 67, n° 2, p. 244-248.

RIVERA, F., A. WARREN, E. RAMIREZ, O. DECAMP, P. BONILLA, E. GALLEGOS, A. CALDERON et J. T. SANCHEZ (1995). « Removal of Pathogens from Wastewaters by the Root Zone Method (RZM) », *Water Science & Technology*, vol. 32, n° 3, p. 211-218.

SCHIERUP, H. H., H. BRIX et B. LORENZEN (1990). *Wastewater Treatment in Constructed Reed Beds in Denmark - State of the Art, Constructed Wetlands in Water Pollution Control*, Pergamon Press, Oxford, p. 495-504.

US EPA (2000). *Constructed wetlands treatment of municipal wastewater*, EPA/625/R-99/010, Cincinnati, Ohio, Office of Research and Development, 165 p.

VON FELDE, K., et S. KUNST (1997). « N and COD Removal in Vertical-flow Systems », *Water Science & Technology*, vol. 35, n° 5, p. 79-85.

WALLACE, S. D. (2005). « Engineered wetlands can be effective cold climate wastewater treatment », *Environmental Science & Engineering Magazine*, septembre 2005, [En ligne], [<https://esemag.com/archive/0905/wetland.html>] (consulté le 14 novembre 2022).

WALLACE, S. D., et R. L. KNIGHT (2006). *Small-Scale Constructed Wetland Treatment Systems - Feasibility, Design Criteria, and O&M Requirements*, WERF 01-CTS-5, Londres, Royaume-Uni, IWA Publishing, 304 p.

WINTER, K.-J., et D. GOAETZ (2003). « The impact of sewage composition on the soil clogging phenomena of vertical flow constructed wetlands », *Water Science & Technology*, vol. 48, n° 5, p. 9-14.

WITTGREN, H. B. et T. MAEHLUM (1997). « Wastewater Treatment Wetlands in Cold Climates », *Water Science & Technology*, vol. 35, n° 5, p. 45-53.

WOOD, A. (1995). « Constructed Wetlands in Water Pollution Control: Fundamentals to their Understanding », *Water Science & Technology*, vol. 32, n° 3, p. 21-29.

PRÉLIMINAIRE



**Environnement,  
Lutte contre  
les changements  
climatiques,  
Faune et Parcs**

**Québec** 