

LA FAISABILITÉ TECHNIQUE ET SOCIALE DES MARAIS FILTRANTS EN ZONE
AGRICOLE

Par
Brian Tremblay-R

Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement et développement durable
en vue de l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Madame Chantal D'Auteuil

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Décembre 2013

SOMMAIRE

Mots-Clés : marais filtrant, traitement de l'eau, ruissellement, zone agricole, gestion de l'eau, agriculteur, contamination, phosphore, nitrate, pesticide.

Les cours d'eau traversant des bassins versants agricoles sont les plus pollués du Québec, notamment à cause d'un surplus de phosphore, de nitrates et de pesticides. Le gouvernement du Québec a choisi de légiférer pour limiter l'ajout de matières fertilisantes à la source avec l'obligation pour les agriculteurs de respecter les plans agroenvironnementaux de fertilisation. Le choix d'implanter un marais filtrant dans les cours d'eau traversant les terres agricoles est donc une mesure complémentaire peu connue des agriculteurs. L'objectif de ce présent essai est de proposer des recommandations permettant de favoriser l'implantation de marais filtrants en zone agricole et d'améliorer leur efficacité de filtration.

Pour ce faire, une revue de la littérature scientifique a permis de recenser tous les types de marais filtrants et les modes de gestion des marais qui améliorent le traitement du phosphore, de l'azote et des pesticides dans un climat nordique. Dans la littérature, on recense plusieurs types de marais filtrants qui ont tous des caractéristiques techniques et des performances de filtration différentes. Les marais les plus efficaces et les plus souvent cités sont les marais à écoulement sur la surface avec plantes, les marais à écoulement horizontal sous la surface, les marais à écoulement vertical sous la surface et les marais filtrants intégrés. Ils sont utilisés pour traiter les effluents agricoles à faible coût. Pour être plus efficaces, ils sont jumelés à d'autres ouvrages : un bassin de sédimentation, un fossé d'oxygénation et un étang de polissage.

L'opinion de 12 agriculteurs a été récoltée afin de déterminer leurs préoccupations face à l'implantation de marais filtrants sur leurs terres. Les résultats démontrent que très peu d'agriculteurs ont une connaissance sur le sujet. C'est pourquoi la sensibilisation de la part des agronomes, la rédaction d'articles dans des revues spécialisées et des bulletins d'information ont été recommandés dans un premier temps. Afin d'améliorer la visibilité des marais filtrants, il est important d'implanter des marais chez les agriculteurs consentants. Quelques agriculteurs ont cette volonté, mais à condition qu'il ait un soutien financier du Prime-Vert qui couvre 70 % des coûts engendrés par les travaux et que ces travaux soient sous la responsabilité d'un gestionnaire de projet d'un club agroenvironnemental.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tous les agronomes que j'ai consultés pour ce travail afin d'avoir leurs opinions sur le projet et pour vérifier si le ton et le vocabulaire étaient appropriés dans mon questionnaire. Je remercie spécialement Mme Louise Tardy pour ses judicieux conseils.

Je tiens à remercier également les membres du DuraClub qui m'ont fourni certaines informations pertinentes sur les marais filtrant, notamment, Alexandre Morin-Boisjoli et Julie Bellefroid.

Je désire également remercier tous les agriculteurs qui ont pris le temps de répondre à mon questionnaire. Leurs réponses ont été nécessaires pour la cueillette d'information et pour formuler des recommandations qui prennent en considération le niveau de connaissance et la volonté d'implanter un marais filtrant sur leurs terres.

J'aimerais également remercier ma directrice, Mme Chantal D'Auteuil, qui m'a conseillé tout au long de la réalisation de cet essai. Ses conseils et son expérience professionnelle ont été nécessaires, notamment en ce qui a trait au contact avec les agriculteurs, pour élaborer mon questionnaire et pour apporter des modifications à mon rapport.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	1
1 PORTRAIT DE LA QUALITÉ DES EAUX EN MILIEU AGRICOLE.....	4
1.1 Phosphore total (P_{tot}).....	5
1.2 Azote total (N_{tot}).....	6
1.3 Chlorophylle a.....	7
1.4 Pesticides.....	8
1.5 Conclusion.....	9
2 MÉTHODOLOGIE.....	11
3 REVUE DE LITTÉRATURE : LES MARAIS FILTRANTS.....	12
3.1 Traitement de l'eau dans les marais filtrants.....	12
3.1.1 Transformations du phosphore dans un marais artificiel.....	13
3.1.2 Transformations de l'azote dans les marais filtrants.....	16
3.1.3 Transformation des pesticides dans les marais filtrants.....	19
3.2 Types de marais filtrants artificiels.....	19
3.2.1 Structure générale du marais filtrant.....	20
3.2.2 Marais à écoulement sur la surface avec plantes (MESP).....	22
3.2.3 Marais à écoulement horizontal sous la surface (MEHS).....	23
3.2.4 Marais à écoulement vertical sous la surface (MEVS).....	25
3.2.5 Système hybride.....	26
3.3 Marais filtrants intégrés (MFI).....	27
3.4 Efficacité des marais filtrants.....	30
3.5 Mode de gestion optimale.....	31
3.5.1 Bassin de sédimentation.....	31
3.5.2 Choix du design des marais.....	32
3.5.3 Lieu d'implantation.....	33
3.5.4 Choix et gestion des plantes.....	34
3.5.5 Dragage des sédiments et de la matière organique récalcitrante.....	38
3.5.6 Ajout de coagulants dans le marais.....	39
3.5.7 Ajout de sucres.....	40
3.5.8 Ajout de pompes à oxygène.....	40
3.6 Stratégie d'aménagement des marais dans un bassin versants.....	41

3.7	Comparaison des marais naturels et artificiels	43
3.8	Bénéfices et limites des marais filtrants	43
3.8.1	Bénéfices des marais filtrants	43
3.8.2	Limites	44
3.9	Exemple de cas au Québec	45
4	RÉSULTATS D'ENTREVUES	47
4.1	Profil des agriculteurs répondants	47
4.2	Incidatifs nécessaires au développement de marais sur les terres agricoles	50
4.3	Choix du type marais et sa superficie	53
5	RECOMMANDATIONS.....	56
5.1	Recommandations au niveau technique	56
5.1.1	Stratégie d'aménagement.....	56
5.1.2	Choix du site d'implantation	56
5.1.3	Choix du design du marais filtrant	57
5.1.4	Gestion d'ensemble des 4 bassins	59
5.1.5	Modes de gestions appropriés.....	60
5.1.6	Nouvelles recherches.....	62
5.2	Recommandations au niveau social.....	63
5.2.1	Sensibilisation	63
5.2.2	Soutien financier	63
5.2.3	Responsable des projets	64
5.3	Conclusion.....	65
	CONCLUSION.....	68
	RÉFÉRENCES	70
	BIBLIOGRAPHIE	78
	ANNEXE 1- Questionnaire présenté aux agriculteurs	79

LISTES DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1.1	Qualité générale de l'eau (IQBP6) pour la période 2006-2008.....	4
Figure 3.1	Transformations du Phosphore dans un marais en milieu agricole.....	15
Figure 3.2	Transformations de l'azote dans un marais filtrant.....	17
Figure 3.3	Entaille en V.....	21
Figure 3.4	Représentation schématique d'un marais filtrant à écoulement sur la surface avec plantes flottantes.....	22
Figure 3.5	Représentation schématique d'un marais filtrant à écoulement sur la surface avec plantes émergentes.....	23
Figure 3.6	Représentation schématique d'un marais à écoulement horizontal sous la surface.....	24
Figure 3.7	Représentation schématique d'un marais à écoulement vertical sous la surface.....	25
Figure 3.8	a) Système hybride de marais filtrants avec une cellule de MEVS suivi d'une cellule de MEHS; b) Système hybride de marais filtrants avec 8 cellules de MEVS suivi de 2 cellules de MEHS.....	28
Figure 3.9	Marais filtrant intégré (MFI).....	30
Figure 3.10	Schéma du design expérimental le plus performant pour la rétention du phosphore : a) bassin de sédimentation; b) marais filtrant composé de plantes; c) zone d'oxygénation peu profonde; d) zone de polissage. Les polygones représentent les petits barrages.....	33
Figure 3.11	Boucle de réutilisation du phosphore sur une terre agricole avec marais filtrant	39
Figure 4.1	Âge des répondants selon ces catégories d'âge.....	48
Figure 4.2	Ancienneté des agriculteurs répondants.....	48
Figure 4.3	Pourcentage des répondants cultivant le maïs, le soya, le foin et le blé.....	49
Figure 4.4	Les problèmes environnementaux les plus préoccupants en agriculture.....	50
Figure 4.5	Les mesures de protection mises en œuvre par les répondants.....	50
Figure 4.6	Suite à l'énumération des bienfaits des marais filtrants, est-ce que les répondants sont prêts à installer un marais filtrant.....	51
Figure 4.7	Les sources d'informations consultées régulièrement par les répondants.....	52
Figure 4.8	Les organismes avec lesquels les répondants aimeraient travailler pour la réalisation de marais filtrant sur leurs terres.....	53

Figure 4.9	Forme des incitatifs économiques préférés selon les répondants.....	53
Figure 4.10	Superficie jugée raisonnable pour un marais filtrant selon les répondants.....	55
Figure 5.1	Schéma des marais filtrants recommandés.....	60
Tableau 1.1	Seuils d'eutrophisations et résumé des résultats de l'évaluation de 4 paramètres physicochimiques.....	10
Tableau 3.1	Transformations de l'azote dans un marais filtrant en zone agricole.....	18
Tableau 3.2	Comparaison de l'efficacité du traitement des contaminants en fonction des différents types de marais artificiels.....	31
Tableau 3.3	Rétention des nitrates et du phosphore total dans les marais artificiels situés dans des climats froids.....	32
Tableau 3.4	Plantes suggérées pour les marais filtrants.....	35
Tableau 3.5	Avantages et inconvénients des 2 stratégies d'aménagement des marais filtrants dans des bassins versants agricoles.....	42
Tableau 4.1	Moyenne des notes fournies par les répondants en fonction de chaque critère important pour la sélection du type de marais.....	54
Tableau 5.1	Résumé des recommandations techniques.....	66
Tableau 5.2	Résumé des recommandations au niveau social.....	67

LISTE DES ACRONYMES DES SYMBOLES ET DES SIGLES

ADN	Acide désoxyribonucléique
DBO ₅	Demande biologique en oxygène après 5 jours
IQBP ₆	Indice de qualité bactériologique et physico-chimique (6 paramètres)
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
MDDEFP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs
MES	Matières en suspension
MESP	Marais à écoulement sur la surface avec plantes
MEHS	Marais à écoulement horizontal sous la surface
MEVS	Marais à écoulement vertical sous la surface
MFI	Marais filtrant intégré (<i>Integrated constructed wetland</i> en anglais)
N ₂	Azote gazeux
N ₂ O	Oxyde d'azote gazeux
NH ₃	Ammoniac
NH ₄ ⁺	Ion ammonium
NO ₂ ⁻	Nitrite
NO ₃ ⁻	Nitrate
N _{tot}	Azote total
OQLF	Office québécois de la langue française
P _{tot}	Phosphore total
REA	Règlement sur les exploitations agricoles
SO ₄ ⁻	Sulfate
USDA	<i>United States Department of Agriculture</i>
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>

LEXIQUE

- Adsorption : Fixation de molécules gazeuses, liquides, d'une substance dissoute ou de particules solides à la surface d'un solide (Vymazal, 2007; Shipley, 2010).
- Bactéries ammonifiantes fermentaires : Bactéries produisant de l'ammonium suite au processus de fermentation pour créer sa propre énergie (Malouin, 2007)
- Bactéries chimiolithotrophes facultatives : Bactérie qui tire leur énergie de l'oxydation d'un substrat minéral (ex: NO_3) lorsqu'il n'y a plus de composés organiques biodégradables (Malouin, 2007).
- Bactéries strictement chimiolithotrophes : Bactéries qui tirent leur énergie de l'oxydation d'un substrat minéral (ex: NO_3) (Malouin, 2007).
- Biote : Ensemble des organismes vivants dans un écosystème (Leroux, 2009).
- Coagulants : Produit chimique utilisé pour provoquer l'adsorption ou l'entraînement par agglomération (floculation, coagulation) des particules fines en suspension ou en dispersion colloïdale dans un liquide (DeBusk, s.d.).
- Condition anoxique : Condition dans laquelle la concentration d'oxygène est si faible que certains groupes de micro-organismes utilisent d'autres corps que l'oxygène comme accepteurs d'électrons (Malouin, 2007).
- Cours d'eau d'ordre 1 : Cours d'eau sans affluent qui sont situés en amont du système hydrographique et sont généralement caractérisés par des pentes plus fortes et des dimensions plus restreintes. Les interventions seront souvent plus efficaces pour le contrôle de l'érosion (Leroux, 2009).

Cyanobactéries : Bactéries photosynthétiques que l'on trouve principalement en milieu dulcicole et aquatique. Les cyanobactéries se présentent sous la forme de cellules individuelles ou de filaments pouvant se grouper en colonies. On les trouve dans les eaux douces comme dans les eaux salées de même qu'à la surface des sols humides, et dans tous les types de climats (Kalf, 2002; Leroux, 2009)

Événement climatique extrême : Ce sont des événements climatiques bien définis qui apparaissent rarement comparativement au climat présent. Ces événements sont mesurables physiquement, que ce soit la température, les précipitations, la vitesse du vent ou le niveau d'écoulement des eaux. Le terme rare réfère à la distribution des événements climatiques, plus particulièrement ceux se produisant au 95^e centile et plus de cette distribution (Zwiers et autres, 2013).

Indice de qualité bactériologique et physico-chimique 6 : Indice servant à mesurer la qualité générale de l'eau des rivières et des petits cours d'eau en considérant ces usages : baignade et activités nautiques, protection de la vie aquatique, protection du plan d'eau contre l'eutrophisation et l'approvisionnement en eau à des fins de consommation. Cet indice est basé sur l'intégration de 6 paramètres : teneur en phosphate total, teneur en nitrite et nitrates, teneur en azote ammoniacal, teneur en chlorophylle a, teneur en coliformes fécaux, teneur en matières en suspension (MDDEFP, 2010a).

Macrophyte : Terme générique pour désigner l'ensemble des plantes aquatiques (Kalf, 2002; Leroux, 2009).

Matière organique récalcitrante : Matière organique très difficilement assimilable par les microorganismes lors de la décomposition, due à sa complexité structurale (Aber et Melillo, 2001).

Méta-analyse :	Méthode d'analyse statistique qui combine plusieurs données et résultats provenant d'un grand nombre d'études indépendantes dans le but de faire ressortir des conclusions non biaisées (Shipley, 2010).
Microorganisme aérobie :	Microorganisme, dont la voie métabolique de production d'énergie utilise l'oxygène O ₂ comme accepteur d'électrons (Bradley, 2010)
Microorganisme anaérobie :	Microorganisme qui ne peut vivre qu'en l'absence d'oxygène ou dont le développement est possible en l'absence d'oxygène (Bradley, 2010).
Microorganismes anaérobies facultatifs :	Se dit d'un microorganisme qui vit en présence d'oxygène, mais qui peut aussi vivre dans un milieu qui en est dépourvu (Bradley, 2010).
Phytoplancton :	Ensemble des organismes végétaux qui demeurent en suspension dans l'eau sans pouvoir opposer de résistance effective aux courants et qui trouvent dans ce milieu leurs conditions normales d'existence. Ce groupe comprend les algues microscopiques et les cyanobactéries (Leroux, 2009; Kalff, 2002).
Rhizosphère :	Partie de sol où l'on retrouve les racines des plantes (Bradley, 2010).
Synergie :	Capacité de deux ou de plusieurs organismes d'effectuer des transformations (généralement chimiques) qu'ils ne peuvent accomplir isolément (Festa-Bianchet, 2007).
Territoire à vocation agricole ou bassin versant à vocation agricole :	Bassins versants ou sous-bassins versants dont plus de 20 % de leur superficie est cultivée (MDDEFP, 2005).

Transformation
abiotique :

Transformation de la matière non effectuée par des organismes vivants. Ce sont des transformations qui résultent de phénomènes chimiques ou physiques comme l'érosion ou la sédimentation (Festa-bianchet, 2007; Aber et Melillo, 2001)

Transformation
biotique :

Transformation de la matière effectuée par des organismes vivants. Ces organismes peuvent agir comme catalyseur de réaction. Par exemple, la transformation du nitrate en azote atmosphérique via la dénitrification (Festa-bianchet, 2007; Aber et Melillo, 2001).

INTRODUCTION

« Dix pour cent du territoire du Québec est recouvert d'eau douce. Avec ses 4500 rivières et son demi-million de lacs, le Québec possède 3 % des réserves en eau douce renouvelables de la planète » (Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP), 2002a). Ce privilège s'accompagne de la grande responsabilité de protéger et de gérer cette ressource naturelle. La province de Québec a adopté le modèle de gestion intégrée de l'eau par bassins versants, ce qui en fait la pierre angulaire de la politique nationale de l'eau, lancée en 2002. Cette dernière vise à résoudre les problèmes d'usage de l'eau, que ce soit au niveau récréatif, biologique ou écosystémique. Initialement, le gouvernement avait retenu 33 bassins versants prioritaires afin d'y proposer une gestion intégrée. La gestion de l'eau se fait de concert avec tous les acteurs locaux : riverains, habitants, municipalités, municipalités régionales de comté, entreprises, agriculteurs, etc. Maintenant, le Québec est subdivisé en 40 zones de gestion intégrée des ressources en eau (MDDEFP, 2002b). De ces 40 bassins versants, 7 se retrouvent avec un surplus de fumiers, ce qui produit des impacts négatifs sur la santé humaine et sur la contamination des ressources en eau par pollution diffuse (MDDEFP, 2004). En effet, les fumiers contiennent beaucoup de nitrates et de phosphates qui ont la possibilité de migrer vers les cours d'eau par lessivage, par ruissellement ou par l'érosion des particules de sol (*ibid*). Cette contamination est accentuée lors de grandes pluies et lorsque le sol est dénudé de végétation. Selon Simard (2004), la majorité des cours d'eau traversant le territoire québécois à vocation agricole sont considérés dégradés à cause de trop grandes concentrations estivales de phosphore, d'azote et de matières en suspension.

Il existe différentes solutions afin de contrôler cette pollution diffuse. Par exemple, au niveau provincial, on a adopté le règlement sur les exploitations agricoles (REA). Ce règlement établit les normes à respecter « qui contribuent au respect de la capacité de support en phosphore des rivières du Québec, en encadrant la gestion des déjections animales et la culture des végétaux » (MDDEFP, 2002c). Il prévoit notamment que les « déjections animales et les autres matières fertilisantes produites ou utilisées par une exploitation agricole soient entreposées et épandues adéquatement afin de limiter leur écoulement vers les cours d'eau » (MDDEFP, 2002c). Il limite l'ajout de matières fertilisantes à la source avec l'obligation pour les agriculteurs de respecter les plans agroenvironnementaux de fertilisation. Ceux-ci sont alors créés par des agronomes qui

détermineront la dose, le mode, la date et la distance par rapport au cours d'eau des épandages afin de limiter les risques d'altération de la qualité de l'eau (*ibid*). Il existe également de meilleures pratiques telles que l'ajout de mycorhizes dans le sol et le maintien d'une bande riveraine végétalisée sur une largeur minimale de 3 à 10 mètres qui peuvent avoir un impact significatif sur la diminution de la contamination par la fertilisation. Parfois, ce n'est simplement pas suffisant pour contrôler la pollution diffuse liée à l'ensemble de la surface d'un bassin versant. C'est dans cette optique qu'une solution en bout de tuyau (« *end of pipe* ») telle que la construction d'un marais filtrant peut s'avérer complémentaire pour capter les particules de phosphore et de nitrates, en particulier avant qu'elles ne rejoignent les cours d'eau.

L'objectif principal de cet essai est de proposer des recommandations favorisant l'implantation de marais filtrants agricoles et améliorant leur efficacité de filtration pour améliorer la qualité des eaux sur le territoire agricole au Québec. Plus précisément, en lisant dans la littérature scientifique et en consultant les cas pratiques, il sera alors possible de proposer des pistes d'amélioration sur les différents types de marais artificiels implantés sur le territoire québécois en tenant compte des endroits potentiels d'implantation, la proximité des ressources en eau et des coûts d'installation pour maximiser l'efficacité du marais. La validité des sources consultées sera rigoureusement vérifiée en tout temps. Les articles scientifiques provenant de journaux avec un système de révision par les pairs seront automatiquement considérés comme étant fiables. Les autres articles scientifiques devront faire l'objet d'une vérification minutieuse afin d'éviter le recueil d'information erronée et si possible, les résultats seront comparés avec d'autres études similaires. Les documents gouvernementaux québécois et canadiens seront considérés comme étant fiables, mais une vérification des sources utilisées sera effectuée dans la mesure du possible lorsque celles-ci sont présentes. Dans le cas des autres ressources Internet (autres organisations ou ressources gouvernementales internationales par exemple), l'auteur et la provenance du site (l'organisme qui l'héberge) seront vérifiés pour s'assurer de leur crédibilité. Si la ressource est jugée non crédible, les informations recueillies seront ignorées. Si des doutes persistent quant à la validité de la source, le site Internet du service de soutien à la formation sera consulté, ce qui permettra l'évaluation plus complète de cette source. Dans tous les cas, l'année de publication de l'information sera prise en compte, étant donné qu'il y a eu des avancements importants ces dernières années dans ce domaine. De plus, il sera nécessaire de récolter l'opinion des agriculteurs afin d'identifier les freins au développement de marais filtrants. Les sources d'information venant de communication avec ces clubs agricoles ou avec ces agriculteurs sont considérées comme essentielles pour la réalisation de

l'analyse dans la seconde partie de l'essai. Les informations recueillies seront donc considérées fiables et aucune censure ne sera effectuée.

Ce présent essai est divisé en 5 chapitres. Le premier chapitre passe en revue le contexte agricole québécois et les principales problématiques de contamination qui mènent à l'élaboration de cet essai. Le second chapitre présente la méthodologie employée pour la réalisation de cet essai. Le troisième chapitre présente les informations pertinentes recueillies dans la littérature sur les marais filtrants. Il détaille le traitement des principaux contaminants retrouvés dans les cours d'eau agricoles, les différents types de marais filtrants, les modes de gestion optimisant le traitement et les principales stratégies d'aménagement des marais filtrants. Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus suite à la cueillette des opinions des agriculteurs. Enfin, le dernier chapitre exprime les principales recommandations de l'auteur qui découlent des informations recueillies dans les précédents chapitres.

1 PORTRAIT DE LA QUALITÉ DES EAUX EN MILIEU AGRICOLE

Le territoire à vocation agricole retenu pour cet essai comprend les bassins versants dont plus de 20 % de leur superficie est cultivée (MDDEFP, 2005). Ce territoire se retrouve dans les Basses-Terres du Saint-Laurent et dans la partie sud des Appalaches, représenté par le triangle noir sur la figure 1.1.

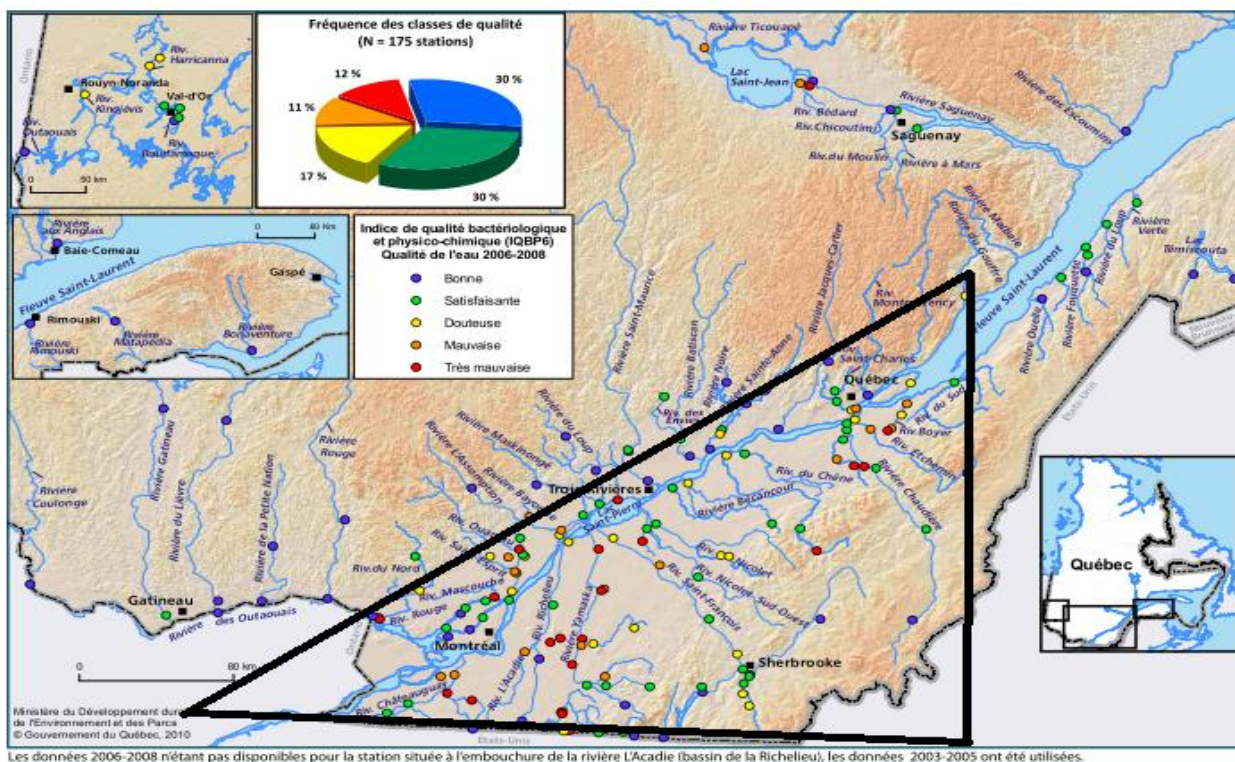


Figure 1.1 : Qualité générale de l'eau (IQBP₆) pour la période 2006-2008 (Inspirée de : MDDEFP, 2010a, p.15)

Selon un rapport du MDDEFP (2010a), la qualité des cours d'eau a été mesurée sur toute la superficie du Québec entre 2006 et 2008 via l'évaluation de paramètres physicochimiques et biologiques, par l'entremise du Réseau-rivières. Les résultats de l'échantillonnage de 182 stations réparties dans une soixantaine de bassins versants dressent le portrait général de la qualité de l'eau au Québec (MDDEFP, 2010a). Ce portrait général est présenté à la figure 1 pour les cours d'eau échantillonnés suite à l'évaluation de l'indice de qualité bactériologique et physico-chimique à 6 paramètres (IQBP₆). Les paramètres mesurés pour caractériser cet indice sont : le phosphore total, les nitrites et nitrates, les coliformes fécaux, les matières en suspension, l'azote ammoniacal et la chlorophylle a totale. Les résultats de chaque rivière sont classés en 5 catégories de qualité : bonne,

satisfaisante, douteuse, mauvaise, très mauvaise. Les résultats démontrent que les rivières considérées en mauvais et en très mauvais états traversent les régions à forte densité agricole (MDDEFP, 2010a; MDDEFP, 2010b; MDDEFP, 2013). C'est pourquoi il est important d'analyser les paramètres physico-chimiques qui contribuent significativement à la diminution de la qualité de l'eau dans les cours d'eau des bassins versants agricoles (phosphore total, nitrites et nitrates totaux, concentration en chlorophylle a, concentrations en pesticides).

1.1 Phosphore total (P_{tot})

Le phosphore est un élément nutritif essentiel à la croissance des végétaux. Dans la plupart des milieux dulcicoles du territoire à l'étude, il s'agit de l'élément limitant la croissance excessive des plantes aquatiques et des algues. S'il se retrouve en excès, cela peut entraîner une modification de l'habitat, une diminution de la concentration en oxygène dissous, une modification des communautés biologiques, et une prolifération des végétaux aquatiques et des cyanobactéries (MDDEFP, 2010a; MDDEFP, 2010b; MDDEFP, 2005; Kalff, 2002). Ce phénomène est appelé eutrophisation. Pour permettre de lutter efficacement contre l'eutrophisation, le MDDEFP a fixé un seuil de prévention de l'eutrophisation. Ce seuil est fixé à une concentration de 0,030 mg/l de phosphore total. On entend par phosphore total (P_{tot}), l'addition des concentrations des formes dissoutes et celles en association avec des particules (phosphore particulaire). Cela signifie que si la concentration en P_{tot} est supérieure à ce seuil, le cours d'eau est alors considéré en voie d'eutrophisation selon le MDDEFP. Cette caractérisation permet d'identifier les cours d'eau sur lesquels le MDDEFP peut axer ses efforts pour l'amélioration de la qualité de l'eau (MDDEFP, 2005).

Depuis les années 1960, l'ajout de phosphore est une pratique commune chez les producteurs agricoles et a permis d'augmenter la productivité des sols. Ces sols ont été enrichis par des apports en phosphore supérieurs à la quantité nécessaire à la croissance des cultures. Quelques années après, il a été constaté que la teneur en phosphore des sols avait atteint un niveau élevé, voire même critique. Lors de pluies torrentielles, l'impact des gouttes de pluie au sol et l'écoulement d'eau à la surface du sol causent une érosion plus importante des terres agricoles, car les gouttes ont une vélocité et une vitesse plus grandes (Dunne et autres, 2004). Il en résulte une perte de particules de sols et de phosphore importante. Ces pertes sont accentuées lorsque le sol est à nu. Ces particules de sols et de phosphore rejoignent les cours d'eau et causent leur eutrophisation (MDDEFP, 2005). Ce

phénomène semble en voie de s'accélérer puisque le nombre d'événements climatiques extrêmes augmente au niveau mondial conséquemment aux changements climatiques (Zwiers et autres, 2013).

Une campagne d'échantillonnage des cours d'eau spécifiquement dans les bassins versants agricoles a eu lieu entre 2001 et 2003. Elle a permis de mesurer les concentrations moyennes de phosphore total. Dans 64 % de toutes les données recueillies, les concentrations de P_{tot} sont supérieures au seuil de prévention d'eutrophisation, qui est de 0,03 mg/l. Les valeurs varient de 0,051 mg/l (1,7 fois le seuil) pour la rivière Bécancour à 0,258 mg/l (8,6 fois le seuil) pour la rivière Nicolet Sud-Ouest (MDDEFP, 2005). Entre 1997 et 2008, une diminution des concentrations de phosphore total a été constatée suite à l'adoption du règlement sur la réduction de la pollution d'origine agricole en 1997 et du règlement sur les exploitations agricoles en 2002. « Malgré [cette] amélioration observée, les concentrations de phosphore sont encore trop élevées à plusieurs endroits en milieu agricole » (MDDEFP, 2010a).

1.2 Azote total (N_{tot})

L'azote est un composé commun à tous les êtres vivants, car il est un constituant des acides aminés qui forment les protéines (Campbell et Reece, 2004). Les vivants libèrent leur azote sous différentes formes chimiques lors de leur décomposition : azote organique, azote ammoniacal, nitrite et nitrates (MDDEFP, 2010a). Toutes ces formes se retrouvent en quantité plus ou moins importantes dans les eaux de ruissellement des terres agricoles suite à l'épandage de fumiers, de lisiers et d'engrais (*Ibid*). Pour l'azote total (N_{tot}), il n'existe pas de critère de qualité lié à sa toxicité ou à l'eutrophisation comme c'est le cas du phosphore total (vu dans la section 1.1), car la toxicité dépend des formes et des concentrations sous lesquelles l'azote se trouve. Par exemple, le seuil de toxicité des ions nitrites (NO_2^-) et nitrates (NO_3^-) pour protéger la vie aquatique est de 2,9 mg/l. Pour l'azote ammoniacal, constitué d'ammoniac (NH_3) et d'ions ammonium (NH_4^+), il varie de 0,5 mg/l à 1,5 mg/l en fonction du pH. On garde plus souvent la concentration de 0,5 mg/l comme seuil, car cette valeur départage les classes de qualité satisfaisante et douteuse de l'IQBP₆ (MDDEFP, 2010a). Il existe cependant un consensus sur une concentration dite de surabondance d'azote totale, qui est fixée à 1 mg/l par le MDDEFP (2010), même si cette concentration n'est pas considérée toxique. C'est cette concentration qui sera utilisée comme référentiel de comparaison lors de l'analyse de l'état des cours d'eau en milieu agricole dans le prochain paragraphe.

Pour la période d'échantillonnage de 2006-2008, seulement 16 % des cours d'eau du Québec ont montré des concentrations moyennes de nitrites et nitrates supérieures au seuil de surabondance d'azote total de 1 mg/l (MDDEFP, 2010a). Par contre, ces cours d'eau se retrouvent tous dans de petits bassins ou de sous-bassins versants dont la superficie de culture et la densité animale sont très importantes (*Ibid*). Entre 1999 et 2008, aucune amélioration n'a été constatée au niveau des concentrations des nitrites et nitrates dans l'ensemble des cours d'eau à vocation agricole. Quant à la concentration d'azote ammoniacal, elle est dans tous les cas inférieure ou égale au seuil 0,5 mg/l, ce qui n'est pas problématique (*Ibid*). Généralement, les concentrations en azote total étaient inférieures à la valeur consensuelle de 1 mg/l, donc il ne s'agit pas d'une problématique aussi importante que le cas des concentrations de phosphore.

1.3 Chlorophylle a

La chlorophylle a est un pigment se trouvant chez les végétaux qui est responsable de la photosynthèse et de la coloration verte (Campbell et Reece, 2004). Elle peut représenter de 1 à 2 % du poids sec des végétaux (MDDEFP, 2010a). La concentration de la chlorophylle a dans les cours d'eau est utilisée comme indicateur de la biomasse phytoplanctonique (algues microscopiques en suspension) (*ibid*). Le seuil d'eutrophisation fixé par le MDDEFP est de 8,6 µg/l. On retrouve souvent de fortes concentrations de chlorophylle a dans les milieux dulcicoles où il y a d'importantes concentrations de phosphore qui ne limitent plus la croissance du phytoplancton. Par contre, ces milieux doivent aussi être associés à une bonne luminosité, une absence de turbulence et un écoulement lent du cours d'eau, sinon le phytoplancton ne pourra se développer.

Pour la période d'échantillonnage de 2006-2008, seulement 15 % des cours d'eau du Québec ont montré des concentrations supérieures au seuil d'eutrophisation de 8,6 µg/l pour la chlorophylle a (MDDEFP, 2010a). Par contre, tous ces cours d'eau traversent des bassins versants à vocation agricole. Cette corrélation est une preuve de la problématique d'eutrophisation dans ces bassins versants. Toujours selon le MDDEFP (2010), « les données révèlent encore un problème de surabondance d'éléments nutritifs et de production primaire trop élevée ».

1.4 Pesticides

L'épandage de pesticides par les agriculteurs vise à lutter contre des organismes qui sont considérés nuisibles pour la croissance des cultures. Il existe principalement 3 types de pesticides qui sont employés au Québec :

- ❖ Insecticides s'attaquent aux insectes ravageurs (12,5 % des ventes au Québec);
- ❖ Herbicides s'attaquent aux autres plantes poussant au milieu d'une culture, aussi appelées « mauvaises herbes » (59 % des ventes au Québec);
- ❖ Fongicides s'attaquent aux champignons qui peuvent donner des maladies aux plantes cultivées (17 % des ventes au Québec).

La quantité de pesticides épandus dépend généralement des types de culture et peut varier d'une année à l'autre. Par exemple, les cultures maraîchères, la pomme de terre et les vergers sont les cultures qui nécessitent le plus d'applications de pesticide, car elles sont plus vulnérables à la détérioration. À l'opposé, les cultures céréalières sont celles nécessitant le moins de pesticides. Entre ces deux extrêmes, on retrouve les cultures de maïs et de soya. Dans leurs cas, ce ne sont pas la quantité de pesticide épandue qui est problématique, mais l'importance des superficies cultivées puisque ces cultures couvrent 31 % de la superficie cultivable du Québec (MDDEFP, 2010a).

Depuis 1992, un échantillonnage des cours d'eau de 4 bassins versants agricoles à dominance de maïs et de soya a été mis en place pour détecter spécifiquement la présence de pesticides. La compilation des résultats démontre que plusieurs pesticides sont présents dans ces cours d'eau avec un pic de concentration durant l'été. C'est surtout le cas d'herbicides tels que l'atrazine, le glyphosate, le métachlore, le bentazone, et le dicamba. Peu d'insecticides et de fongicides sont retrouvés dans ces cours d'eau. « Plusieurs pesticides sont parfois présents en concentrations qui dépassent les critères de qualité de l'eau pour la protection de la vie aquatique », allant de 14 à 30 % de plus que les critères de qualité durant l'été (MDDEFP, 2010a). Ce critère de qualité varie en fonction de la molécule active contenue dans les pesticides (*ibid*). Les concentrations élevées et la présence de différents types de pesticides peuvent avoir des effets néfastes et conjugués sur les espèces aquatiques (MDDEFP, 2010a).

Un échantillonnage de la qualité des cours d'eau dans les bassins versants agricoles où les cultures maraîchères sont dominantes a été mis en place entre 2005 et 2007 afin de vérifier la présence de pesticides. Les résultats démontrent qu'une grande variété de pesticides a été utilisée et retrouvée dans ces cours d'eau. Au total, ce sont 36 molécules de pesticides différentes qui ont été échantillonnées. On retrouve une incidence plus élevée des insecticides et des fongicides comparativement aux cours d'eau traversant des cultures de soya et de maïs. « D'ailleurs, 13 pesticides, soit 5 herbicides, 7 insecticides et 1 fongicide, ont été détectés en concentrations qui dépassent les critères de qualité de l'eau établis pour la protection de la vie aquatique » (MDDEFP, 2010a). Par exemple, l'insecticide chlorpyrifos se retrouvait à une concentration supérieure de 81 fois le critère de qualité.

1.5 Conclusion

Le portrait de la qualité des cours d'eau dans les bassins versants à vocation agricole démontre que celle-ci est mauvaise. On y retrouve des surplus de phosphates, de nitrites et de nitrates, de chlorophylle a et de pesticides. Le tableau 1 présente les seuils d'eutrophisations en fonction des paramètres physicochimiques et un résumé des résultats les plus significatifs. Ces bassins versants se retrouvent dans la zone la plus densément peuplée du Québec, ce qui affecte la qualité de vie des gens qui y habitent. Ils perdent alors des usages de l'eau sans qu'ils n'aient un mot à dire ou presque, car ce sont les agriculteurs qui choisissent les pratiques qu'ils jugent les plus appropriées. Très souvent les pratiques choisies sont celles qui auront un impact économique positif pour leurs entreprises agricoles au détriment de la protection de l'environnement.

Tableau 1.1 : Seuils d'eutrophisations et le résumé des résultats de l'évaluation de 4 paramètres physicochimiques (Compilation d'après : MDDEFP, 2010a)

Paramètres Physicochimiques	Type de seuil	Concentration du seuil	Résultats significatifs
Phosphore total	Eutrophisation	0,03 mg/l	64 % de toutes les concentrations moyennes des cours d'eau dans les bassins versants agricoles ont une concentration supérieure au seuil d'eutrophisation
Azote total	Surabondance	1 mg/l	Généralement, les concentrations en azote total étaient inférieures au seuil
Nitrites et nitrates	Toxicité Surabondance	2,9 mg/l 1 mg/l	16 % des cours d'eau du Québec ont montré des concentrations moyennes de nitrites et nitrates supérieures au seuil de surabondance (tous les cours d'eau sont dans des bassins versants agricoles)
Ammoniac	Toxicité	0,5 mg/l	Dans tous les cas, les concentrations sont inférieures ou égales au seuil
Chlorophylle a	Eutrophisation	8,6 µg/l	15 % des cours d'eau du Québec ont montré des concentrations supérieures au seuil d'eutrophisation
Pesticides	Qualité	Varie en fonction du pesticide	-Présence d'atrazine, de glyphosate, de métachlore, de bentazone et de dicamba dans les cours d'eau -14 à 30 % de plus que les critères de qualité durant l'été pour plusieurs pesticides -L'insecticide chlorpyrifos se retrouvait à une concentration supérieure de 81 fois le critère de qualité

2 MÉTHODOLOGIE

Une revue de la littérature scientifique au niveau international a été effectuée pour obtenir un maximum d'information sur les marais filtrants. Les informations recueillies touchent à la description du traitement des principaux contaminants en milieu agricole (P, N et pesticides) dans les marais, à la description technique des différents types de marais filtrants à usage agricole et leur efficacité à traiter les contaminants, aux pratiques de gestion les plus efficaces, aux stratégies d'aménagement des marais, aux différences entre les marais naturels et artificiels, et aux bénéfices et limites après l'installation du marais. De plus, des retours d'expérience retrouvés dans la littérature ont été consultés et analysés lorsque les données contextuelles étaient suffisantes. Ainsi seulement les retours d'expérience sur les marais filtrants implantés en milieu nordique ont été considérés. Suite à cette collecte d'informations, la section 3 a été rédigée et fait office de résumé de la littérature.

Pour augmenter le nombre de marais implantés sur le territoire québécois, il faut prendre en considération les préoccupations et les besoins des parties prenantes, particulièrement ceux des agriculteurs. C'est pourquoi des entrevues téléphoniques ont été organisées avec des agriculteurs. Un guide d'entrevue a été préparé et vérifié par Louise Tardy, agronome du Conseil pour le développement de l'agriculture au Québec et par la directrice de cet essai, Chantal D'Auteuil. Au total, le questionnaire comportait 13 questions et est présenté en annexe 1. Le but du questionnaire est de proposer aux agriculteurs une nouvelle façon de protéger les cours d'eau et les lacs contre la contamination d'origine agricole aux producteurs agricoles et de récolter leurs opinions face à ce sujet (phosphore, nitrates et pesticides). Ce questionnaire est séparé en 2 parties. La première partie décrit les ouvrages de marais filtrant et leurs avantages tandis qu'on retrouve les questions dans la seconde partie. Le questionnaire est principalement composé de questions à choix multiples pour diriger les répondants dans leurs réponses, pour réduire le temps de réponse des répondants et pour faciliter l'analyse des résultats.

À partir des réponses fournies par 12 agriculteurs, un portrait des répondants et une liste des incitatifs nécessaires ont été dressés. Les résultats des entrevues ont été analysés à la section 4. Les informations les plus pertinentes ont été utilisées pour faire des recommandations en tenant compte du contexte socio-économique et environnemental des producteurs agricoles du Québec à la section 5.

3 REVUE DE LITTÉRATURE : LES MARAIS FILTRANTS

Selon le *United States Department of Agriculture* (USDA) et la *United States Environmental Protection Agency* (USEPA) (s.d), un marais filtrant est un marais artificiel utilisé comme technique d'épuration des eaux. Il est composé d'un assemblage d'eau, de substrats de sol (sable, pierres, argile, etc.), de plantes vasculaires ou d'algues, de matières organiques en décomposition, d'invertébrés (surtout des insectes et des vers) et d'une population de bactéries. Les marais filtrants sont constitués d'une série de plusieurs bassins de différentes tailles creusés dans le sol. Ils sont caractérisés par la présence d'eau qui couvre la surface du sol sur une période de temps prolongée (Office québécois de la langue française (OQLF), 2012; USDA et USEPA, (s.d.)). Le milieu inondé occasionne des conditions de croissance difficiles pour les êtres vivants, car le milieu est pauvre en oxygène. Seulement le biote adapté à ces conditions y survit et croît. Les prochaines sections détaillent le traitement de l'eau dans les marais filtrants, les principaux types de marais artificiels recensés dans le monde et les modes de gestion qui permettent un traitement optimal de l'eau. Finalement, les dernières sections passent en revue les différences entre les marais artificiels et naturels, les stratégies d'aménagement des marais filtrants sur le territoire agricole et les bénéfices et les limites des marais filtrants en milieu agricole.

3.1 Traitement de l'eau dans les marais filtrants

Le phosphore, le nitrate et les pesticides sont les principaux polluants des cours d'eau agricoles. (MDDEFP, 2010a; MDDEFP, 2005; Dunne et Reddy, 2004; Reddy et autres, 2004; Margoum et autres, 2001). Le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) (2012) et Nidermeier et autres (2004) ont prouvé que les précipitations, dont la quantité excède 35 mm par jour, coïncidaient avec des sommets de phosphore dans les fossés agricoles moins de 2 jours après ces précipitations. Le nitrate, quant à lui, est très soluble dans l'eau et est lessivé vers les eaux de surface et les eaux souterraines lors de fortes précipitations (Aber et Melillo, 2001). En ce qui concerne les pesticides, l'atrazine et le chlorpyrifos sont appliqués régulièrement sur une grande superficie cultivée au Québec. Ils sont apportés dans le milieu naturel par le ruissellement (MDDEFP, 2010a; Reddy et autres, 2004). Tous ces contaminants rejoignent les cours d'eau et sont nocifs pour la communauté biologique dulcicole. Les marais filtrants agissent comme une barrière contre ces contaminants. En effet, dans les marais filtrants, ceux-ci subissent une série de transformations abiotiques et biotiques d'ordres chimiques, physiques ou biologiques qui régulent la qualité de l'eau à la sortie du marais (Vymazal, 2007). Les trois

prochaines sous-sections passeront en revue les mécanismes de transformation du phosphore, de l'azote et des pesticides dans les marais filtrants.

3.1.1 Transformations du phosphore dans un marais artificiel

Le phosphore contenu dans les effluents est sous forme dissoute dans l'eau (ex : HPO_4^{2-}) ou sous forme particulaire où il est associé à de la matière organique et à des particules de sol (Dunne et Reddy, 2004). Le phosphore dissous provient principalement du lessivage des fertilisants artificiels, des fumiers et des lisiers. Le phosphore particulaire provient de l'érosion de terres contenant un surplus de phosphore (Pionke et autres, 1999; DeBusk et autres, 2004). Les marais ont la capacité de retenir le phosphore sous toutes ses formes (Reddy et autres, 1999; Dunne et Reddy, 2004). La capacité de rétention du phosphore est régulée par les phénomènes suivants :

- ❖ l'adsorption de surface sur les matières végétales, minérales et sur les sédiments (flèche #1 à la figure 3.1);
- ❖ la précipitation avec des ions métalliques (Al, Fe, Ca et Mg) sous forme de sels solides (flèche #3 à la figure 3.1);
- ❖ l'immobilisation microbienne et l'absorption par les végétaux (flèches #5 à la figure 3.1);
- ❖ la sédimentation du phosphore particulaire (flèche 11 à la figure 3.1) (Vymazal, 2007; Dunne et Reddy, 2004; Margoum et autres, 2001; Braskerud, 2004; DeBusk et autres, 2004).

L'absorption par le biote est responsable de la transformation du phosphore sous forme ionique dissoute (PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} et H_2PO_4^-) en phosphore solide et plus stable (Vymazal, 2007). Une fois absorbé, il est intégré dans les cellules internes du biote sous forme d'acide désoxyribonucléique (ADN) où il n'est libéré qu'à la mort de l'organisme. Le phytoplancton absorbe le phosphore dissous dans l'eau, tandis que les macrophytes émergents absorbent le phosphore emprisonné dans les sédiments (Reinhardt et autres, 2005).

La croissance végétale et microbienne est grandement influencée par la température externe. C'est au printemps et au début de l'été que l'absorption par les plantes et les microorganismes prend le plus d'importance et fait diminuer les concentrations de phosphore dissoutes. C'est le processus épuratif du phosphore le plus significatif à court terme (Vymazal, 2007; Dunne et Reddy, 2004; DeBusk et autres, 2004). Durant l'été, la sédimentation du phosphore particulaire est particulièrement importante (Dunne et Reddy, 2004; Braskerud, 2001). Les concentrations en ions

métalliques de fer, d'aluminium, de calcium et de magnésium influencent le nombre de sites potentiels d'adsorption et de précipitation. Ils permettent une plus grande séquestration de phosphore (DeBusk et autres, 2004). Par contre, ces sites d'adsorption et de précipitation se saturent rapidement et le marais perd en efficacité avec l'âge (*ibid*). L'adsorption et la précipitation du phosphore ne sont pas influencées par la température externe, donc la performance durant les périodes froides varie peu (Reddy et Kadlec, 2001).

Quand les microorganismes et les végétaux meurent (flèches #7 à la figure 3.1), une partie du phosphore inclus dans leurs tissus se retrouve libre dans le marais. Le phosphore est libéré sous forme de phosphore organique alors qu'une autre partie s'accumule avec la matière organique récalcitrante non décomposée qui se retrouve au fond des marais (flèche #10 à la figure 3.1) (Vymazal, 2007; DeBusk et autres, 2004; Campbell et autres, 2002). La décomposition de la matière organique est trop lente dans ces couches à cause de la faible qualité de la matière organique (structure complexe et peu d'azote disponible), le peu d'oxygène et de nutriments disponibles, et un pH souvent acide. Les conditions de vie sont trop difficiles pour les microorganismes décomposeurs aérobies. Celles-ci favorisent les microorganismes anaérobies qui ont un métabolisme plus lent. Le dépôt de matières organiques est donc plus rapide que la décomposition par les microorganismes, causant une accumulation dans le fond des marais. L'accumulation de couches de matière organique récalcitrante est le principal puits à long terme pour l'accumulation du phosphore dans les marais artificiels et les marais naturels (Vymazal, 2007; Richardson et Marshall, 1986; DeBusk et autres, 2004). D'un autre côté, le phosphore libéré et non emprisonné est disponible pour la croissance des autres microorganismes ou végétaux (flèches #8 et #9 à la figure 3.1).

Il existe également des réactions de dissolution et de désorption qui peuvent augmenter la concentration de phosphore de l'eau du marais en fonction des conditions physicochimiques (Kadlec et Knight, 1996). La désorption et la dissolution peuvent retransformer le phosphore adsorbé et précipité en une forme ionique dissoute (Flèches #2 et 4 à la figure 3.1) (Kadlec et Knight, 1996). Par exemple, le phosphore lié au fer est relâché dans des conditions anaérobies acides alors que le phosphore lié à l'aluminium n'est pas relâché en présence d'un milieu en anaérobie acide (Dunne et autres, 2004).

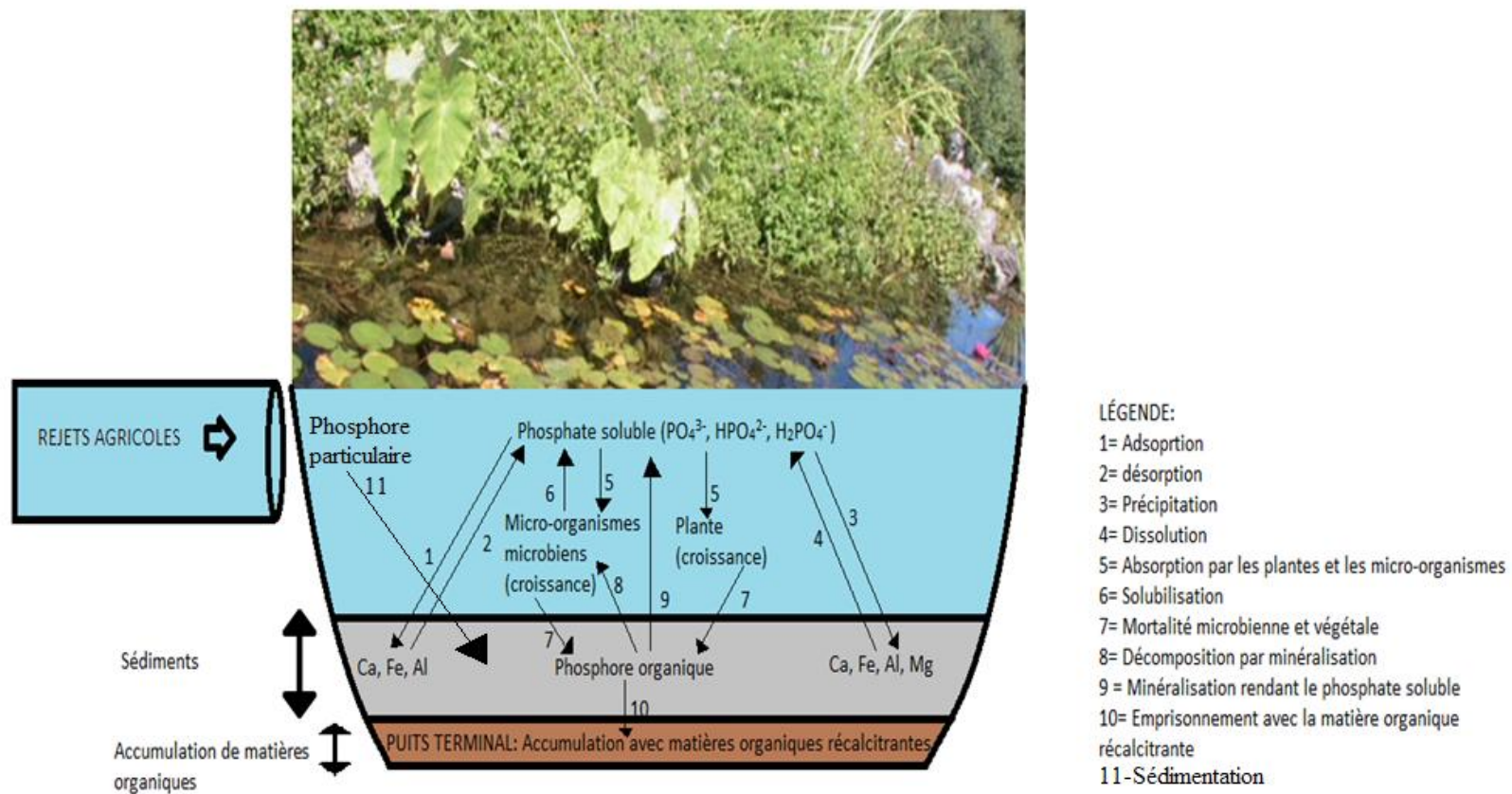


Figure 3.1 : Transformations du phosphore dans un marais en milieu agricole

3.1.2 Transformations de l'azote dans les marais filtrants

Le rejet d'azote dans les effluents via le ruissellement et le lessivage est maximal durant la fonte des neiges au printemps ou durant les épisodes de pluies torrentielles (Jacobson, 1994; Aber et Melillo, 2001). L'azote provenant des effluents agricoles et se jetant dans les marais est de nature organique et inorganique. Les principales formes aqueuses d'azote inorganique retrouvées dans les marais sont l'ammonium (NH_4^+), le nitrite (NO_2^-) et le nitrate (NO_3^-). En entrant dans le marais, les formes inorganiques sont traitées par les microorganismes et sont rejetées sous forme d'azote gazeux : le diazote (N_2), l'oxyde d'azote (N_2O) et l'ammoniac (NH_3) (Vymazal, 2007). Ces transformations sont expliquées à l'aide du tableau 3.1 et sont également représentées sur la figure 3.2 (flèches #1, 5a, 5b, 10a et 10b). Les chiffres sur les flèches de la figure représentent les numéros de réaction inscrits dans la première colonne du tableau 3.1. Ce tableau présente les principales réactions et la chaîne de réactions avec les intermédiaires réactionnels, les organismes responsables, les conditions optimales et les lieux des réactions. Ce tableau est donc un résumé du cycle de l'azote dans un marais filtrant. La dénitrification est le phénomène le plus significatif qui libère l'azote des effluents dans la plupart des types de marais et permet de libérer du N_2O et du N_2 à partir du NO_3^- (Hefting et autres, 2013; Vymazal, 2007; Maltais-Landry et autres, 2009; Maltais-Landry et autres, 2007). Par conséquent, l'atmosphère est le puits principal d'azote provenant des effluents agricoles. Les autres puits importants sont l'assimilation par les plantes et l'adsorption sur les sédiments (*ibid*).

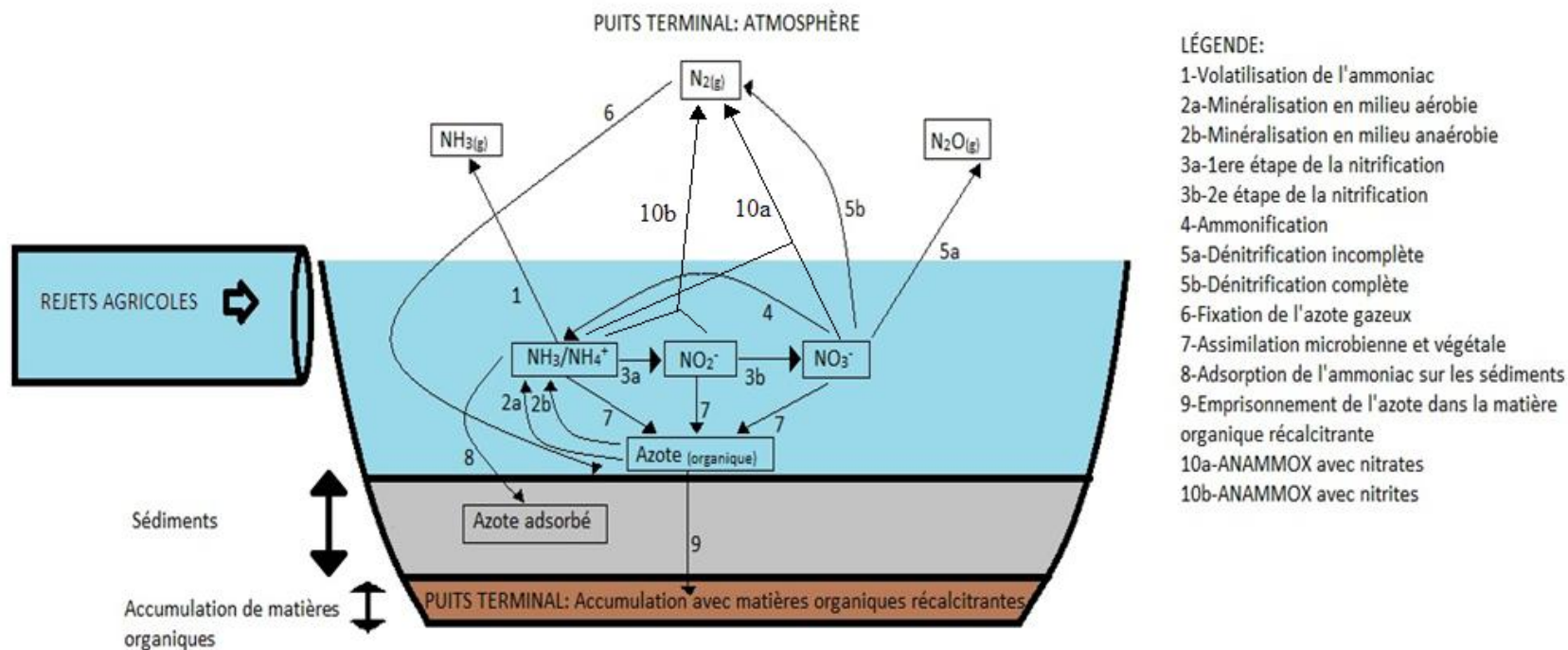


Figure 3.2 : Transformations de l'azote dans un marais filtrant

Tableau 3.1: Transformations de l'azote dans un marais filtrant en zone agricole (Compilation d'après : Hefting et autres, 2013; Maltais-Landry et autres, 2009; Poe et autres, 2003; Vymazal, 2007; Vymazal, 2009; Wallace et autres, 2001; Dunne et autres, 2004)

#	Procédés de traitement	Transformations générales	Séquences de réactions	Lieu de réactions	Responsable de la réaction	Conditions particulières nécessaires à la transformation	Commentaires
1	Volatilisation de l'ammoniac	Ammoniac (aq) → Ammoniac (g)	$\text{NH}_3(\text{aq})$ et $\text{NH}_4^+(\text{aq}) \rightarrow \text{NH}_3(\text{g})$	Sol inondé et sédiments	Phytoplanctons	-Volatilisation significative à partir d'un pH de 9,3 et plus, causée par la photosynthèse durant le jour	Varie beaucoup
2a	Minéralisation	Azote organique → Ammoniac	Acides aminés → Acides Iminés → Cétoacides → $\text{NH}_3(\text{aq})$ et $\text{NH}_4^+(\text{aq})$	Près des racines des macrophytes (rhizosphère)	Microorganismes aérobies	-Réaction catabolique en milieu aérobie, limitée au volume situé dans la rhizosphère -Température optimale : 40 à 60 °C -pH optimal : entre 6,5 et 8,5	La minéralisation est plus rapide en milieu aérobie qu'anaérobie, mais plus rare, car limitée à la rhizosphère
2b		Azote organique → Ammoniac	Acides aminés → Acides saturés → $\text{NH}_3(\text{aq})$ et $\text{NH}_4^+(\text{aq})$	Dans l'eau, les sédiments et les couches de sols	Microorganismes anaérobies facultatifs et strictement anaérobies	-Réaction en zone inondée ou profondément dans le sol -Température optimale : 40 à 60 °C -pH optimal : entre 6,5 et 8,5	Apport plus significatif que la réaction en milieu aérobie
3a	Nitrification	Ammoniac → Nitrite	$\text{NH}_3(\text{aq})$ et $\text{NH}_4^+(\text{aq}) \rightarrow \text{NH}_2\text{OH} \rightarrow \text{NOH} \rightarrow \text{NO}_2\text{NH}_2\text{OH} \rightarrow \text{NO}_2^-(\text{aq})$		Exécutées par des bactéries strictement chimolithotrophes des genres: <i>Nitrosospira</i> , <i>Nitrosovibrio</i> , <i>Nitrosolobus</i> , <i>Nitrosococcus</i> et <i>Nitrosomonas</i> .	-Température idéale : 25-35 °C -Température minimale : 5 °C -Besoin en oxygène : 4, mg/mg d'azote ammoniacal oxydé -Alcalinité : Consommation de 8,64 mg de HCO_3^- /mg d'azote ammoniacal oxydé	
3b		Nitrite → Nitrate	$\text{NO}_2^-(\text{aq}) + 0,5\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^-(\text{aq})$		Exécutées par des bactéries chimolithotrophes facultatives par les espèces: <i>Nitrobacter winogradskyi</i> , <i>Nitrospira gracilis</i> , <i>Nitrospira marina</i> et <i>Nitrococcus mobilis</i>	-Température idéale : 25-35 °C -Température minimale : 5 °C -Besoin en oxygène : 4,3 mg/mg d'azote ammoniacal oxydé -Alcalinité : Consommation de 8,64 mg de HCO_3^- /mg d'azote ammoniacal oxydé	
4	Ammonification	Nitrate → Ammoniac	$\text{NO}_3^-(\text{aq}) \rightarrow \text{NH}_4^+(\text{aq})$	Sédiments et sols	Bactéries ammonificatrices fermentaires	-Conditions anoxiques	
5a	Dénitrification	Nitrate → Azote gazeux (N_2O)	$2\text{NO}_3^- \rightarrow 2\text{NO}_2^- \rightarrow 2\text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O}$	Environnement aquatique	-Bactéries surtout chimiohétérotrophes des genres <i>Pseudomonas</i> , <i>Aeromonas</i> et <i>Vibrio</i> . -Des organismes organotrophes, lithotrophes, phototrophes et diazotrophes sont aussi capables de dénitrifier l'azote.	-Conditions anoxiques surtout -Substrats organiques disponibles comme énergie -pH optimal : entre 6 et 8 -Température optimale : entre 60 et 75 °C, mais demeure efficace entre 5 et 75 °C	-Dénitrification possible en conditions aérobies, mais nécessite un changement des populations bactériennes -
5b		Nitrate → Azote gazeux (N_2)	$2\text{NO}_3^- \rightarrow 2\text{NO}_2^- \rightarrow 2\text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$				Production de N_2O à basse température Production de N_2 à haute température
6	Fixation de l'azote gazeux	$\text{N}_2(\text{g}) \rightarrow$ Ammoniac (organique)	$\text{N}_2(\text{g}) \rightarrow$ Protéines organiques et NH_3 (organique)	Eau, surface du sol, près des racines des macrophytes, sur les feuilles et les tiges des plantes	-Actinomycètes associés avec des plantes noduleuses ou vivant seules (champignon microscopique) -Cyanobactéries	Milieus aérobies (cyanobactéries) et anaérobies (toutes les autres bactéries)	-Fixation de l'azote est négligeable dans les effluents contenant beaucoup d'azote -Réaction plus efficace en milieu anaérobie
7	Assimilation microbienne et végétale	Ammoniac, nitrite, nitrate → N (organique)	NH_3 , NH_4^+ , NO_3^- , $2\text{NO}_2^- \rightarrow$ Acides aminés	-Sédiments (les macrophytes à racines) -Libres dans l'eau pour les macrophytes flottants	Microorganismes et macrophytes	Croissance maximale au printemps	Absorption préférentielle de NH_3 et NH_4^+ Rétention de l'azote organique surtout dans la biomasse racinaire
8	Adsorption d'ammoniac	Adsorption avec détrit, sédiments et le sol		Argile, complexes argilo- humiques	Disponibilités des sites d'échanges	Hautes concentrations d'ammoniac	Si la concentration d'ammoniac dans le marais diminue, il y a désorption
9	Emprisonnement d'azote organique	$\text{N}(\text{organique}) \rightarrow \text{N}(\text{organique emprisonné})$		Matière organique récalcitrante, tourbe			
10a	ANAMMOX	Ammoniac et nitrite ou nitrate → N (g)	$5\text{NH}_4^+(\text{aq}) + 3\text{NO}_3^-(\text{aq}) \rightarrow 4\text{N}_2 + 9\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+$	Milieux anoxiques	Microorganismes anaérobies		
10b			$\text{NH}_4^+(\text{aq}) + \text{NO}_2^-(\text{aq}) \rightarrow \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$				

3.1.3 Transformation des pesticides dans les marais filtrants

Les traitements de pesticides sur les cultures se retrouvent fréquemment dans les effluents agricoles qui rejoignent les fossés agricoles ou le marais filtrant, si le producteur agricole en possède un. Les premières expérimentations concernant la fonction épuratoire d'un fossé et d'un marais filtrant végétalisés réalisées en conditions naturelles ont donné des résultats encourageants (Garon-Boucher, 1998; Williams et autres, 1999; Passeport et autres, 2013; Agudelo et autres, 2012; Crum et Brock, 1994). La rétention totale est corrélée aux propriétés physico-chimiques des molécules de pesticides appliquées. Les molécules avec un coefficient d'adsorption élevé sont celles qui sont les plus retenues. En effet, la rétention dépend surtout de l'adsorption sur les sédiments (Passeport et autres, 2013; Margoum et autres, 2001). Cependant, le processus est réversible : quand la concentration diminue, il y a désorption des molécules de pesticides et celles-ci se retrouvent dans les cours d'eau. Par contre, une partie de ces molécules est absorbée et dégradée dans le marais si le temps de rétention est suffisamment long (Passeport et autres, 2013; Margoum et autres, 2001). La dégradation est le résultat de l'action simultanée des microorganismes et de l'absorption par les racines et les rhizomes des plantes (Agadulo et autres, 2012). Une diminution de l'ordre de 45 à 96 % de la concentration de 16 différents pesticides a été observée après le traitement par marais filtrant (Passeport et autres, 2013). Une étude similaire en Norvège a démontré une diminution variant entre 0 et 67 % de réduction des concentrations de 13 pesticides (Braskerud et Haarstad, 2003). Reddy et autres (2004) ont également démontré que les concentrations d'atrazine (herbicide fréquemment utilisé) diminuent dans les marais filtrants qui contiennent des Scirpes d'Amérique (*Scirpus americanus*), suggérant alors une biodégradation par les populations microbiennes associées à cette plante. En effet, les pesticides riches en azote, comme l'atrazine, sont susceptibles d'être biodégradés plus facilement (Van Der Heyden, 2008). Finalement, Cruz et autres (1994) ont démontré qu'environ 40 % de l'insecticide chlorpyrifos (utilisé pour contrer les moustiques, les mouches et les divers insectes) se retrouvant dans les marais est absorbé par les macrophytes, alors que les sédiments en adsorbent seulement 25 %.

3.2 Types de marais filtrants artificiels

Inspirés des marais naturels, les marais artificiels ont été conçus pour recréer un écosystème qui accomplit les mêmes fonctions, dont le traitement des eaux usées. Ces marais artificiels sont autosuffisants. Cela signifie qu'ils nécessitent peu d'énergie et peu d'entretien, qu'ils sont peu coûteux et qu'ils offrent une solution durable au traitement de l'eau (Gagnon et Brisson, s.d;

Gagnon et autres, 2013; USDA et USEPA, s.d.). En 1998, plus de 500 installations étaient recensées en Europe et plus de 600 en Amérique du Nord (MDDEFP, 2001). Il existe différents types de marais filtrant. Le choix, lors de l'implantation, dépend des concentrations des contaminants de l'eau, les moyens financiers disponibles, l'espace disponible et la volonté du producteur agricole. La section suivante détaillera la structure partagée par tous les marais filtrants et le fonctionnement spécifique des différents types de marais artificiels recensés dans la littérature :

- ❖ Marais à écoulement sur la surface avec plantes (MESP);
- ❖ Marais à écoulement horizontal sous la surface (MEHS);
- ❖ Marais à écoulement vertical sous la surface (MEVS);
- ❖ Système de marais hybrides.

3.2.1 Structure générale du marais filtrant

Les marais filtrants sont constitués de bassins peu profonds sous lesquels on retrouve une couche imperméable, synthétique ou naturelle (USDA et USEPA, s.d.). Par exemple, une épaisse couche d'argile est imperméable (> 30 cm), car il y a très peu d'infiltration d'eau à travers les couches de phyllosilicates qui la compose (Agrobio, s.d.). D'autres modules comme des digues ou des barrages peuvent être ajoutés pour contrôler le niveau de l'eau étant donné qu'il varie énormément en fonction des conditions météorologiques et du niveau d'évapotranspiration. Dans la littérature on cite souvent l'exemple de l'entaille en V comme module de contrôle du niveau de l'eau. Il est visible à la figure 3.3 (USDA et USEPA, s.d.). Lors de pluies torrentielles, ce module retient une partie de l'eau de ruissellement et la garde en réserve en amont du marais pour la redistribuer lors d'une période plus sèche (USDA et USEPA, s.d.). Ce genre de module augmente le temps de rétention de l'eau contaminée et ralentit le courant. Le ralentissement du courant permet la sédimentation des matières en suspension et un contact prolongé entre l'eau et le biote du marais.



Figure 3.3 : Entaille en V (Tirée de : Braskerud, 2002, p44)

Dans les bassins, on retrouve des macrophytes submergés, émergés et/ou flottants. Ces plantes remplissent plusieurs rôles cruciaux :

- ❖ absorber les nutriments en circulation;
- ❖ ralentir l'écoulement des eaux grâce à leurs tiges et leurs feuilles, permettant alors aux particules en suspension de sédimenter vers le fond du marais;
- ❖ éviter une remise en suspension des sédiments lors de grands courants;
- ❖ créer des microhabitats pour les bactéries en fournissant de l'oxygène dans la rhizosphère et en leur fournissant un substrat de croissance;
- ❖ protéger les organismes contre les rayons solaires et les vents (USDA et USEPA, s.d; Vymazal, 2009; Brix, 1994; DeBusk, s.d.).

Quand les macrophytes meurent, le dépôt des tiges et des feuilles mortes crée des sites d'adsorption pour les ions solubles et fournit une source de carbone pour les microorganismes et les invertébrés vivant dans le marais (Margoum et autres, 2001; USDA et USEPA, s.d.). Les microorganismes (des bactéries, des levures, des champignons, des protozoaires et des algues microscopiques) sont les principaux responsables du traitement des effluents dans les marais, principalement pour le traitement des nitrates (USDA et USEPA, s.d.). Les insectes et les vers sont responsables de la fragmentation de la matière organique en formes plus simples. Cette fragmentation permet aux microorganismes d'utiliser ces sources de carbone comme énergie (*ibid*).

3.2.2 Marais à écoulement sur la surface avec plantes (MESP)

Ce type de marais comprend un bassin d'eau libre peu profond où les eaux usées cheminent à travers les plantes émergentes et les plantes flottantes (MDDEFP, 2001; Gagnon et autres, 2013). Sous le bassin, on retrouve une couche imperméable qui permet d'éviter l'infiltration d'eau dans le sol. Au-dessus, on retrouve une couche de sol servant de milieu pour l'enracinement des plantes (USDA et USEPA, s.d.; MDDEFP, 2001; et Vymazal, 2007). L'écoulement se fait horizontalement de l'entrée vers la sortie du bassin par gravitation (Figures 3.4 et 3.5) (*ibid*). Le design du marais doit donc inclure une pente de 1 à 3 % entre le début et la fin du système (*Department of the environment, heritage and local government, 2010*). On retrouve un milieu en aérobie dans la mince couche d'eau qui demeure en contact avec l'air et dans la rhizosphère (USDA et USEPA, s.d.). Tout le reste du marais est un milieu anaérobie (*ibid*).

Le principal avantage du MESP est son faible coût d'installation et d'opération (Gagnon et Brisson, s.d.). Par contre, pour avoir un même niveau d'efficacité et pouvoir traiter un même volume d'eau que les autres types de marais, il doit occuper une plus grande superficie (*ibid*). Il est peu approprié pour les climats nordiques où la température descend sous 0 °C, puisqu'une couche de glace se forme et le marais perd toute son efficacité (Gagnon et autres, 2013). De plus, les végétaux meurent, causant une augmentation de la vitesse d'écoulement de l'eau à travers le marais et une diminution du temps de rétention. Le métabolisme des bactéries responsables du traitement est ralenti, rendant le traitement de l'eau inefficace. Si le MESP est soumis à des charges organiques élevées, il devient plus propice à la prolifération d'insectes et au dégagement d'odeurs nauséabondes (MDDEFP, 2001)



Figure 3.4 : Représentation schématique d'un marais filtrant à écoulement sur la surface avec plantes flottantes (Adaptée de : Gagnon et autres, 2013, p. 3)

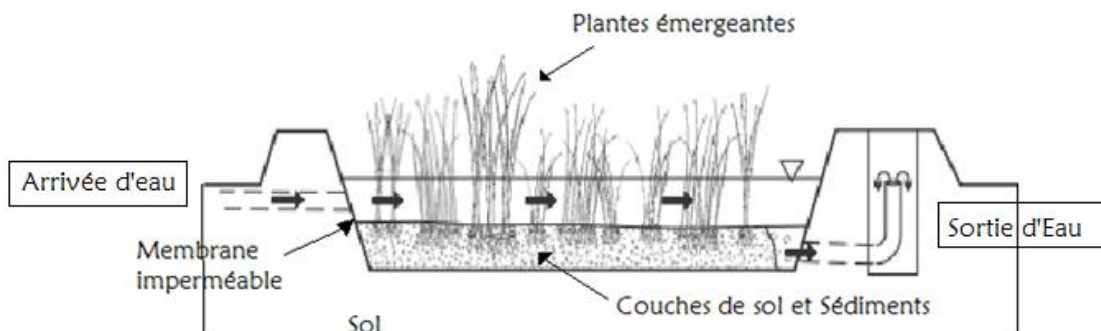


Figure 3.5 : Représentation schématique d'un marais filtrant à écoulement sur la surface avec plantes émergentes (Adaptée de : MDDEFP, 2001, p.5-7)

Aux États-Unis, ce type de marais est utilisé pour traiter les eaux de ruissellement agricoles (USDA et USEPA, s.d.). Au Québec, il est recommandé d'utiliser ce type de marais seulement pour le traitement des eaux usées d'origine domestique (MDDEFP, 2001).

3.2.3 Marais à écoulement horizontal sous la surface (MEHS)

Ce type de marais consiste en un bassin imperméable contenant un substrat poreux où sont enracinées des plantes émergentes (Figure 3.6) (Gagnon et autres, 2013; MDDEFP, 2001; USDA et USEPA, s.d.; Stottmeister et autres, 2003). Sous le bassin, on retrouve une couche imperméable qui permet d'éviter l'infiltration d'eau dans le sol. Au-dessus, on retrouve 2 couches distinctes : une couche de graviers d'une épaisseur de 0,6 à 0,8 m et une couche de sable d'une épaisseur variable (USDA et USEPA, s.d.; MDDEFP, 2001; et Vymazal, 2007). Des plantes sont transplantées dans le milieu graveleux pour permettre l'établissement des racines. Les effluents arrivant dans le marais ruissellent horizontalement à travers le gravier et les racines des plantes (Figure 3.6).

Ce marais est majoritairement constitué d'un milieu anaérobie, facilitant l'élimination de l'azote par les bactéries dénitrifiantes (Gagnon et autres, 2013). Le niveau d'eau doit être régulé pour demeurer stable sous le substrat de graviers en tout temps (USDA et USEPA, s.d.). Sinon des problèmes de débordements d'eau non traitée causent un court-circuitage et l'eau est rejetée sans traitement. De tels problèmes ont déjà été observés en Europe et cela inhibait la dénitrification. Par conséquent, on retrouvait de grandes concentrations d'azote ammoniacal à la sortie du marais (MDDEFP, 2001).

Afin de limiter le colmatage du marais par les MES, il doit y avoir un prétraitement qui leur permet de sédimenter. En absence de prétraitement, le marais devient rapidement saturé et perd beaucoup en efficacité. C'est pourquoi il est souvent utilisé en association avec d'autres types de marais filtrants dans un système hybride, ou à un bassin de sédimentation, ou à une structure permettant de réguler le débit des effluents (USDA et USEPA, s.d.; Gagnon et autres, 2013).

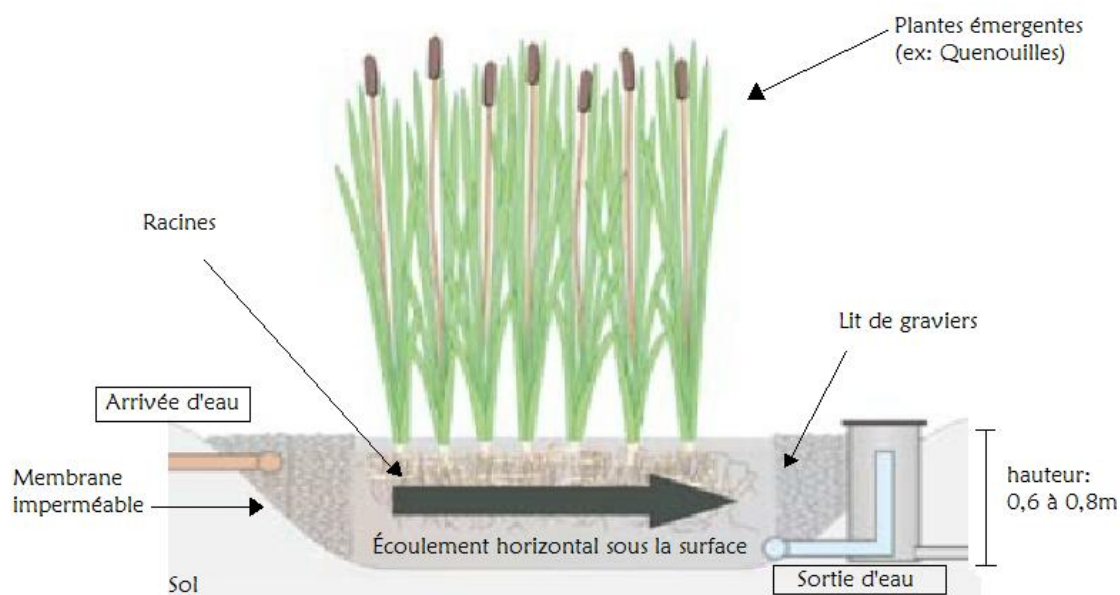


Figure 3.6 : Représentation schématique d'un marais à écoulement horizontal sous la surface (Adaptée de : Gagnon et autres, 2013, p.4)

Le MEHS possède plusieurs avantages comparativement au marais à écoulement sur la surface avec plantes. Il résiste mieux aux températures froides et au gel, car l'effluent passe sous la surface du marais et est ainsi protégé contre les basses températures de l'air ambiant (Gagnon et autres, 2013; Wallace et autres, 2001). Pour une superficie donnée, il est plus efficace pour le traitement des effluents que les autres types de marais (USDA et USEPA, s.d.). Le gravier fournit une plus grande superficie d'adsorption pour les nutriments et les MES (*ibid*). Par contre, l'achat, l'installation, la maintenance et la réparation d'une telle structure sont beaucoup plus coûteux (*ibid*).

Aux États-Unis et au Québec, ce type de marais est surtout utilisé pour diminuer la demande biologique en oxygène à 5 jours DBO_5 des eaux usées des résidences isolées (MDDEFP, 2001). En Europe, il sert surtout de traitement secondaire des eaux usées (MDDEFP, 2001). Au Québec la

vaste majorité des marais filtrants en opération sont de ce type (Gagnon et autres, 2013). Le MDDEFP (2001) recommande d'utiliser ce type de marais dans un système hybride où il est précédé par un marais à écoulement vertical sous la surface.

3.2.4 Marais à écoulement vertical sous la surface (MEVS)

Ce type de marais consiste en un bassin imperméable constitué de plusieurs couches différentes. On retrouve une couche de sable sur le dessus et plusieurs couches de gravier en dessous, dont le diamètre augmente avec la profondeur des couches (Figure 3.7) (MDDEFP, 2001; Vymazal, 2007; Gagnon et autres, 2013). Ainsi, le diamètre du gravier est de 6 mm dans la couche en dessous du sable alors qu'il peut aller jusqu'à 30-60 mm pour celle se retrouvant au fond du marais (Dunne et autres, 2004). Finalement, on retrouve une couche de membrane imperméable qui permet la rétention des couches de sol et de l'eau qui sera amenée dans le marais (*ibid*). On retrouve aussi des macrophytes plantées dans les couches de graviers (Dunne et autres, 2004; Gagnon et autres, 2013). L'eau parvient au marais par un tuyau qui recueille l'eau de ruissellement et la disperse à la surface du marais. L'eau percole à travers les différents matériaux et les racines jusqu'à un réseau de drainage situé dans au fond du marais. L'eau est évacuée du marais par gravitation ou à l'aide d'une pompe par ce réseau de drainage (Figure 3.7) (MDDEFP, 2001).

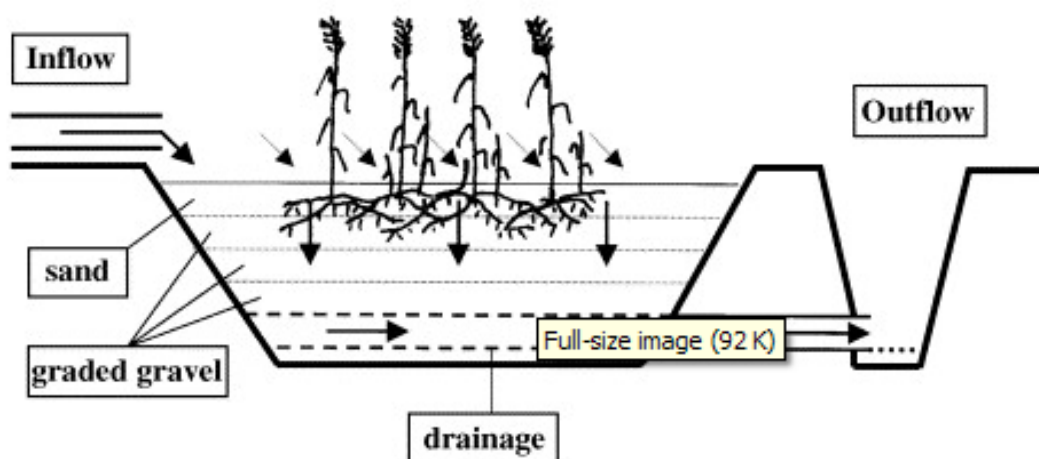


Figure 3.7 : Représentation schématique d'un marais à écoulement vertical sous la surface
(Tirée de : Vymazal, 2007, p.50)

Les résultats du traitement de l'eau après l'installation de ce type de marais sont mitigés. Contrairement au MEHS, ce type de marais est alimenté par l'eau de ruissellement de façon intermittente. Dès qu'il y a une pluie, il se remplit d'eau. Il n'est donc pas saturé en eau en tout

temps, ce qui permet de garder le milieu oxygéné (Gagnon et autres, 2013; MDDEFP, 2001). Le milieu aérobie permet de stimuler le métabolisme des microorganismes et le processus de nitrification (transformation de l'ammoniac et les ions ammonium en nitrate, voir tableau 3.1). À la suite du traitement par un MEVS, on retrouve moins de matières en suspension et de matières organiques, mais un surplus de nitrates dans l'eau (MDDEFP, 2001; Vymazal, 2007; Dunne et autres, 2004; Gagnon et autres, 2013). Le MEVS est donc souvent utilisé comme première étape dans un système hybride de traitement des eaux usées également composé de MEHS (Dunne et autres, 2004). Le MEHS permet de compléter le traitement et de transformer les nitrates en azote gazeux. Le MEVS ne retient que faiblement le phosphore et la rétention dépend du nombre de sites potentiels d'adsorption, surtout présents dans les couches d'argile (*ibid*). Or, ces marais possèdent très peu de particules d'argiles, donc la rétention du phosphore est très limitée.

Le MEVS ne nécessite qu'une faible superficie pour le niveau souhaité d'épuration des MES comparativement au MEHS (Dunne et autres, 2004; Gagnon et autres, 2013). Les coûts de maintenance et d'achat sont supérieurs notamment à cause de la tuyauterie et des pompes qui peuvent être nécessaires pour le rejet des effluents (Dunne et autres, 2004). Pour ces raisons, on en retrouve peu au Québec. Ce type de marais est utilisé en Europe pour traiter les sites ponctuels de pollution aux matières organiques et aux MES (*ibid*).

3.2.5 Système hybride

Il existe plusieurs types de systèmes hybrides dans la littérature, mais la plupart font mention de l'utilisation de marais à écoulement vertical sous la surface suivis de marais à écoulement horizontal sous la surface (Figure 3.8) (Seo et autres, 2008). Il peut y avoir plusieurs bassins pour chacun des types de marais comme c'est le cas à la figure 3.8. La combinaison de plusieurs types de marais permet de tirer avantage des forces de chacun et de minimiser les faiblesses. Par exemple, avec un traitement un MEVS, on retrouve des effluents avec beaucoup de nitrates, car le processus de nitrification (ammoniac → nitrates) est dominant (milieu aérobie). Ces effluents qui contiennent beaucoup de nitrates pourront alors être traités par le MEHS, qui transformera les nitrates en azote gazeux (Gagnon et autres, 2013; Seo et autres, 2008). Les résultats sont meilleurs pour tous les paramètres physicochimiques importants avec un système hybride (DBO₅, taux de MES, concentrations de phosphore total et d'azote total) (Dunne et autres, 2004). Par contre, les effluents

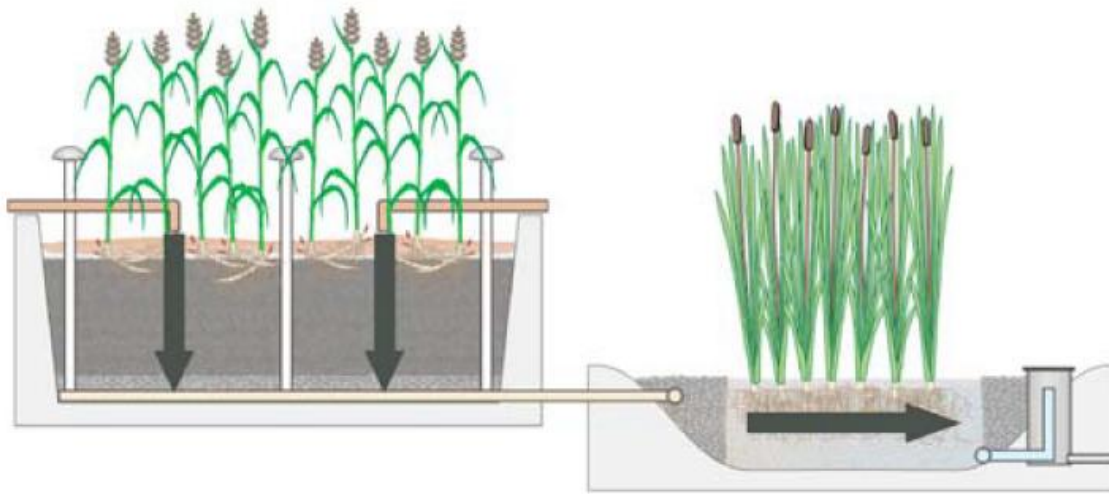
doivent demeurer un jour ou deux dans les MEVS avant d'entrer dans les MEHS pour permettre la complétion de la nitrification et un meilleur rendement (Dunne et autres, 2004).

3.3 Marais filtrants intégrés (MFI)

Le concept du marais filtrant intégré (MFI) a fait son apparition dans la communauté rurale de Annestown et de Dunhill en Irlande dans le but de répondre aux besoins d'améliorer l'environnement agricole durablement dans le début des années 1990 (Harrington et autres, 2004). Depuis ce temps, l'établissement de tels marais a pris de l'ampleur et fait maintenant partie du patrimoine naturel en Irlande (*ibid*). Les marais filtrants intégrés répondent aux besoins de filtration de l'eau, mais ils s'intègrent également dans le paysage et améliorent la biodiversité (*Department of the environment, heritage and local government*, 2010; Harrington et autres, 2004). L'intégration de ces objectifs permet de créer des synergies naturelles entre les êtres qui vivent près du marais (*ibid*). Le but à long terme est de créer un écosystème naturel qui, suite aux multiples synergies et interactions, augmenterait le potentiel de filtration des effluents agricoles et la productivité agricole (*ibid*). Ils compensent également la perte de milieux humides causée par le drainage des terres agricoles (*ibid*).

Les marais filtrants intégrés sont des marais artificiels construits par l'humain dont l'objectif principal est d'imiter la structure et les processus des marais naturels à plus grande échelle (Harrington et autres, 2004; Ryder et autres, 2004; Keohane, 2004). Ils sont constitués de bassins peu profonds avec, à la base, le sol indigène, sans utiliser de membranes (*Department of the environment, heritage and local government*, 2010). Ce sol a l'avantage de contenir des graines de plantes adaptées à l'environnement local qui sont disséminées et qui peuvent pousser rapidement après la création du MFI (USDA et USEPA, s.d.). S'il n'y a aucune pousse après l'installation, plusieurs espèces de plantes indigènes sont choisies et plantées dans le but de créer une communauté végétale diversifiée (USDA et USEPA, s.d.; Dunne et autres, 2004). Le choix de l'emplacement et du type de sol est important, car il faut un sol qui empêche l'infiltration, comme c'est le cas d'un sol argileux. Une compaction du sol à l'aide de machinerie lors de la construction du MFI permet aussi la rétention d'eau dans les marais.

a)



b)

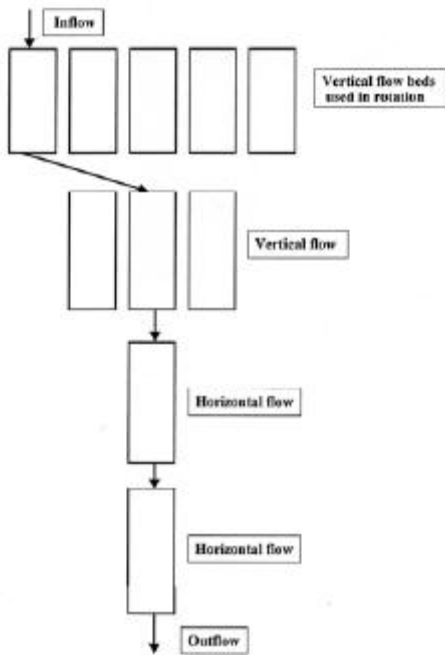


Figure 3.8 : a) Système hybride de marais filtrants avec une cellule de MEVS suivi d'une cellule de MEHS (Tirée de : Gagnon et autres, 2013, p.4); b) Système hybride de marais filtrants avec 8 cellules de MEVS suivi de 2 cellules de MEHS (Tirée de : Vymazal, 2004, p.238)

Le design, le positionnement, la configuration et la superficie sont les paramètres les plus importants à considérer lors de la construction d'un MFI. Le MFI est constitué de, minimalement, 3

bassins peu profonds un à la suite de l'autre qui prennent source soit d'un cours d'eau continu ou d'un ou de plusieurs sources intermittentes comme des fossés agricoles ou de petits ruisseaux (Carroll et autres, 2004; Harrington et autres, 2004; *Department of the environment, heritage and local government*, 2010) (Figure 3.9). Chaque bassin représente un marais distinct où le traitement est différent. Le premier bassin joue le rôle de bassin de sédimentation recueillant surtout le phosphore particulaire alors que les bassins suivants traiteront plus particulièrement les nitrites et nitrates ainsi que le phosphore dissous (*ibid*). Une concentration de 3 kg de phosphore par tonne de sédiments a été mesurée par le *Department of the environment, heritage and local government* (2010) dans le premier bassin après une année d'expérimentation (*ibid*). L'écoulement entre les cellules de marais se fait par gravitation et il peut y avoir des ruisseaux entre chaque bassin dont l'aspect varie en fonction du paysage. Il requiert donc une plus grande superficie que les autres types de marais artificiels (*Department of the environment, heritage and local government*, 2010). La superficie minimale proposée par le ministère de l'environnement irlandais est de 1 à 2 % de la superficie totale des terres cultivées du bassin versant qui se draine dans le cours d'eau. La durée de vie peut aller jusqu'à une centaine d'années contrairement aux autres marais artificiels où la durée de vie maximale est de 20 ans (Dunne et autres, 2004).

Autour des marais, il y a développement d'un habitat naturel de transition entre le milieu aquatique et la terre ferme (Harrington et autres, 2004). La largeur de cette zone tampon devrait être de 9 m tout autour du marais et implique une végétalisation arbustive et herbacée complète avec des plantes indigènes (Dunne et autres, 2004). La zone transitoire végétalisée occupe environ 25 % de la superficie totale du MFI (*Department of the environment, heritage and local government*, 2010). Cette zone de transition est nécessaire pour des raisons de sécurité, de maintenance et pour la protection de la biodiversité.



Figure 3.9 : Marais filtrant intégré (MFI) (Tirée de : *Department of Agriculture, Minnesota state, 2013*)

3.4 Efficacité des marais filtrants

Les sections précédentes ont détaillé les traitements du phosphore, des nitrates et des pesticides dans les marais filtrants, ainsi que le fonctionnement des différents types de marais filtrants artificiels, mais jamais leur efficacité n'a été comparée directement. Le tableau 3.2 compare l'efficacité du traitement en fonction des types de marais. On remarque que le marais le plus efficace pour la majorité des processus de traitement est le marais filtrant intégré. Ceci est probablement dû à sa grande taille, à la diversité des habitats (aérobie, anaérobie, avec plantes émergentes et flottantes, avec du phytoplancton) et au temps supérieur de rétention de l'eau. L'effet de la bande riveraine végétalisée de 9 mètres n'est pas à négliger, car elle agit comme un filtre environnemental important qui réduit l'érosion des terres. L'efficacité des systèmes hybrides n'a pas été comparée par manque de données. On peut s'attendre à de meilleurs résultats que les MEHS et les MEVS pour un système hybride avec ces 2 types de marais.

Tableau 3.2 : Comparaison de l'efficacité du traitement des contaminants en fonction des différents types de marais artificiels (Compilation d'après : Vymazal, 2007; Dunne et autres, 2004)

Contaminant traité	Processus de traitement	MESP (plantes flottantes)	MEHS	MEVS	MFI
Azote	Volatilisation	Faible	Zéro	Zéro	Moyen
	Dénitrification	Moyen	Très élevé	Très faible	Moyen
	Assimilation par les plantes et les microorganismes	Moyen	Faible	Faible	Moyen-élevé
	Accumulation dans la matière organique récalcitrante	Très faible	Faible	Très faible	Faible-moyen
Phosphore	Adsorption	Très faible	Élevé	Élevé	Élevé
	Précipitation	Zéro	Très faible	Très faible	Faible
	Assimilation par les plantes et les microorganismes	Moyen	Faible	Faible	Faible-moyen
	Accumulation dans la matière organique récalcitrante	Très faible	Zéro	Zéro	Élevé
Pesticides	Adsorption	Très faible	Moyen	Moyen	Moyen-élevé

3.5 Mode de gestion optimale

Il existe beaucoup de moyens pour améliorer l'efficacité du traitement de l'eau dans les marais filtrants. Les prochaines sous-sections passeront en revue ces moyens optimaux retrouvés dans la littérature scientifique.

3.5.1 Bassin de sédimentation

La construction d'un bassin de sédimentation à l'entrée d'un marais filtrant fait partie des pratiques courantes. Ce bassin permet la sédimentation des particules en suspensions de grandes tailles issues de l'érosion des terres agricoles. Ces particules sont également composées de phosphore (phosphore particulaire). Ces bassins sont surtout efficaces lors de périodes à fort débit d'eau, particulièrement au printemps et à l'automne (Braskerud, 2002; Braskerud, 2004). En effet, les résultats d'expérimentation avec 4 marais filtrants artificiels de petite taille en Norvège montrent une rétention exceptionnelle de 26 à 71 g de phosphore / m² année, dont la majeure partie est due à la

sédimentation du phosphore particulaire. En guise de comparaison, le tableau 3.3 montre les résultats de plusieurs études sur l'efficacité des marais filtrants à retenir le phosphore en fonction de leur taille dans les régions nordiques. Aucun des autres systèmes de marais filtrants n'est aussi efficace que celui développé par Braskerud, (2001), même si leur taille est de 10 à 20 fois supérieure. Ces bons résultats sont dus aux bassins de sédimentation.

Tableau 3.3 : Rétenion des nitrates et du phosphore total dans les marais artificiels situés dans des climats froids (Tiré de : Fink et Mitsch, 2004, p323)

Table 3
Retention of nitrate (as N) and total phosphorus in selected created/restored cold climate wetlands

Wetland ^a	Location	Retention rate (g N m ⁻² per year)	Retention rate (g P m ⁻² per year)	Size (ha)	Reference
Indian Lake	West central Ohio	39	6.2	1.2	This study
Olentangy River (2)	Central Ohio	58–66	5.2–5.6	1	Mitsch et al. (1998), Spieles and Mitsch (2000), Nairn and Mitsch (2000)
Licking County	Central Ohio	132	–	3	Spieles and Mitsch (2000)
Des Plaines River	N.E. Illinois				Mitsch (1992), Phipps and Crumpton (1994), Mitsch et al. (1995)
High flow (2)		11–38	1.4–2.9	2	
Low flow (2)		3–13	0.4–1.7	2–3	
Agricultural Wetlands (3)	Central Illinois	33	0.1	0.3–0.8	Kovacic et al. (2000)
Constructed basins (4)	S.E. Norway	50–285	26–71	0.035–0.09	Braskerud (2002a, 2002b)

Le bassin de sédimentation se doit d'avoir une profondeur d'environ 1 mètre pour garder le milieu en conditions aérobies, sinon il y a génération d'odeurs nauséabondes (Tanner et Kloosterman, 1997). Il doit être suffisamment grand pour ralentir l'écoulement de l'eau et permettre la sédimentation des particules en suspensions. Une surface correspondant entre 20 et 25 % de la surface totale du marais filtrant est généralement optimale (*Department of the environment, heritage and local government*, 2010). La forme ovale est souvent recommandée, car elle permet une distribution égale de l'eau et un ralentissement important du courant (*ibid*).

3.5.2 Choix du design des marais

Le design expérimental le plus performant pour la rétention du P_{tot} fait état de marais filtrants creusés à même les cours d'eau d'ordre 1 qui ont un faible débit (Braskerud, 2002). Ils ont été créés en élargissant le cours d'eau et des digues ont été placées aux endroits où l'eau de surface devait s'accumuler. Les terres agricoles étaient drainées directement dans le ruisseau. La forme du marais est rectangulaire et le ratio longueur/largeur variait de 1,2 à 12. Suite à d'autres études, le ratio longueur /largeur de 2 serait le plus efficace (*Atlantic Committee on Land and engeering*, 2005). La

profondeur devrait varier entre 15 cm et un peu plus de 1 m, car les zones profondes contribuent à la distribution uniforme de l'eau (*ibid*). Les zones avec plus de 1 m de profondeur devraient occuper 25 % de la superficie, augmentant alors le volume et le temps de rétention de l'eau (*ibid*). Il est aussi conseillé d'avoir au moins 2 unités en parallèle pour les gros marais si les conditions hydriques le permettent (niveau d'eau) (*ibid*). Cela permet de sécher une unité de marais en dérivant le courant pour pouvoir effectuer divers travaux de maintenance (ex : dragage des sédiments) sans affecter la performance globale (*ibid*).

D'autres bassins nécessaires à l'oxygénation, la sédimentation et le polissage peuvent être jumelés au marais principal et séparés par des digues ou des petits barrages (Figure 3.10). Le troisième plateau sur la figure 3.10 constitue la zone d'oxygénation et de filtration (zone c). Il s'agit d'une couche d'eau libre à la surface variant de 0– 0,15 m de profondeur où l'oxygène se mélange à l'eau. Cette section est construite à partir de roches et de plantes; elle peut aussi avoir l'aspect d'un fossé (Van Der Heyden, 2008; Braskerud, 2002). Le quatrième plateau sur la figure 3.10 constitue la zone de polissage (zone d). Une profondeur de 1 m permet de conserver l'eau plus fraîche et aux plantes submergées d'hiberner. On y plante une grande variété de plantes émergentes, flottantes et submergées. Au Québec, on retrouve le marais filtrant sur le ruisseau Walbridge qui possède de telles structures et qui montre des résultats encourageants pour le traitement du phosphore et de l'azote (Kroeger et autres, 2009).

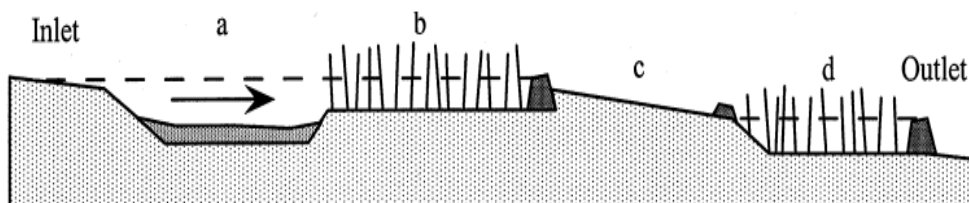


Figure 3.10 : Schéma du design expérimental le plus performant pour la rétention du phosphore : a) bassin de sédimentation; b) marais filtrant composé de plantes; c) zone d'oxygénation peu profonde; d) zone de polissage. Les polygones noirs représentent les petits barrages (Tirée de : Braskerud, 2002, p.44).

3.5.3 Lieu d'implantation

La perméabilité du sol est un élément important à considérer lors du choix du site pour la réalisation

des aménagements. Une vitesse d'infiltration de l'eau du marais dans le sol variant de 10^{-6} à 10^{-7} m/s est souhaitable pour de telles réalisations. Si le sol est trop perméable, l'utilisation d'une membrane imperméable est nécessaire. À l'opposé, les sols totalement imperméables sont constitués d'argile lourde et peuvent nécessiter des apports correctifs en matière organique, afin d'accélérer l'enracinement initial des plantes émergentes (Reinhardt et autres, 2005).

Il est important de connaître les paramètres hydrologiques tels que les débits du cours d'eau et la quantité de précipitations. Ces paramètres ont un effet sur le rendement épuratif du milieu, tant par la diminution du temps de résidence de l'eau, que par la dilution ou la concentration des contaminants. Le temps de résidence de l'eau dans le marais est sans contredit un des facteurs ayant le plus d'impact sur le traitement du phosphore. Un temps de résidence de 10 jours peut augmenter jusqu'à 90 % l'efficacité de rétention du phosphore. Au contraire, un temps de résidence inférieur à 5 jours diminue dramatiquement l'effet épurateur du marais jusqu'à avoir une libération de phosphore. Le choix du site doit donc être fait en fonction des paramètres hydriques pour qu'il y ait toujours de l'eau dans les marais (Reinhardt et autres, 2005). Par exemple, on évite de construire un marais dans un ruisseau qui s'assèche durant l'été.

3.5.4 Choix et gestion des plantes

Le choix des plantes à implanter dans les marais est très important, car elles ont une influence directe sur l'efficacité. Les plantes adaptées au milieu marécageux possèdent des caractéristiques physiologiques leur permettant de survivre aux conditions difficiles de la rhizosphère que les plantes vivant dans le milieu sec ne possèdent pas. Ces conditions difficiles sont :

- ❖ Milieu réducteur (<200mV), propice à la libération de méthane et de H₂S;
- ❖ Milieu acide (pH très bas);
- ❖ Milieu toxique (pesticides);
- ❖ Milieu anaérobie;
- ❖ Milieu très contaminé.

Ces plantes ont donc l'habilité de transporter l'oxygène des organes supérieurs jusqu'aux racines par les aérénchymes pour survivre (Tanner et Kloosterman, 1997). Selon USDA et USEPA (s.d.) et Van der Heyden (2008), les plantes conseillées et spécifiques pour cet habitat sont celles

mentionnées au tableau 3.4. Ce tableau détaille le milieu de vie, certaines caractéristiques physiologiques importantes et présentent une image de ces végétaux.

Tableau 3.4 : Plantes suggérées pour les marais filtrants (Compilation d'après : USDA et USEPA, s.d.; Van der Heyden, 2008)





Nom de la plante	Milieu de vie	Caractéristiques physiologiques	Images
Iris versicolore (<i>Iris versicolor</i>)	-Milieu ouvert ou partiellement ombragé -Sol acide -Préfère les milieux avec beaucoup de nutriments -Profondeur d'eau de 15-30 cm	-Fleurs attractives pour les pollinisateurs	
Peltandre de Virginie (<i>Peltandra virginica</i>)	-Milieu ouvert ou partiellement ombragé -pH : 5-6,5 -Profondeur d'eau de 30 cm	-Croissance lente -Non mangée par les orignaux	
Sagittaire latifoliée (<i>Sagittaria latifolia</i>)	-Profondeur d'eau de 30 cm	-Colonise rapidement un milieu -Tubercules mangés par les rats musqués et les canards colverts -Perd beaucoup d'eau via la transpiration	
Scirpe vigoureux (<i>Scirpus validus</i>)	-Milieu ouvert -pH : 6,5 -8,5 -Profondeur d'eau de plus de 30 cm	-Colonise agressivement un milieu (empêche les autres plantes de pousser) -Fournit de la nourriture et un abri pour les oiseaux	

Tableau 3.4 : Plantes suggérées pour les marais filtrants (Compilation d'après : USDA et USEPA, s.d.; Van der Heyden, 2008) « Suite »







Nom de la plante	Milieu de vie	Caractéristiques physiologiques	Images
Saurure penché (<i>Saururus cernuus</i>)	-Tolérant à l'ombre -Profondeur d'eau de 15 cm	-Croissance rapide -Peu de valeur écologique, sauf pour les canards	
Pontédérie cordée (<i>Pontederia cordata</i>)	-Milieu ouvert ou partiellement ombragé -pH : 6-8	-Nectar prisé par les papillons -Valeur écologique moyenne	
Jonc épars. (<i>Juncus effusus</i>)	-Milieu humide ou sec -Profondeur d'eau de 10 cm	-Nourriture pour oiseaux -Croissance en touffes	
Éléocharide (<i>Eleocharis sp.</i>)	-Profondeur d'eau de 10 cm -Milieu ouvert ou partiellement ombragé		
Carex (<i>Carex sp.</i>)	-Profondeur d'eau de 10 cm -Milieux humides ou sec dépendamment des espèces	-Bonne valeur écologique pour les oiseaux	

Tableau 3.4 : Plantes suggérées pour les marais filtrants (Compilation d'après : USDA et USEPA, s.d.; Van der Heyden, 2008) « Suite »

Nom de la plante	Milieu de vie	Caractéristiques physiologiques	Images
Nénuphar (<i>Nuphar sp.</i>)	<ul style="list-style-type: none"> -Profondeur d'eau de 30 à 150 cm -Tolérant à la fluctuation du niveau de l'eau -Tolère pH acide (pH=5) 	<ul style="list-style-type: none"> -Couvre une grande superficie -Valeur écologique moyenne 	

Avant de transplanter les plantes sélectionnées, il est important de préparer le site qui va recevoir les transplants. Pour les MEHS et les MEVS, il est important d'inonder le milieu en automne pour une période de 4 à 6 mois pour permettre aux particules de sol (gravier et sable) de se stabiliser. Au printemps, le marais est vidé de son eau peu avant la transplantation, produisant un sol humide permettant d'améliorer l'établissement des racines. Il est possible de transplanter un plant au complet ou de simplement planter des rhizomes avec tiges des espèces désirées. La densité recommandée pour la transplantation est 4 plants/m². Quand les plantes auront atteint la taille de 10 cm, le marais peut alors être inondé de nouveau à un niveau d'eau équivalent à 10 cm. À mesure que les plantes croissent, il est possible d'augmenter le niveau d'eau jusqu'à atteindre le niveau prévu (USDA et USEPA, s.d.).

Le retrait des plantes émergentes en automne présente un faible impact sur la quantité d'éléments nutritifs libéré dans les MEHS et les MEVS (Vymazal, 2007). Les plantes émergentes possèdent la capacité de transporter le phosphore et l'azote présents dans les organes (ex : les feuilles et la tige) vers les racines peu de temps avant d'entrer en dormance. Lorsque les feuilles tombent dans le marais durant la saison automnale, elles sont moins riches en éléments nutritifs. Ainsi, une plus faible concentration d'éléments nutritifs est libérée dans le marais. Par contre, le retrait des plantes flottantes du MESP influence beaucoup le traitement du phosphore, puisque l'absorption par les plantes est le seul mécanisme susceptible de traiter ce contaminant. Si elles ne sont pas retirées avant l'hiver, elles meurent et leurs décompositions occasionnent la libération des nutriments. Ceci diminuerait l'efficacité du traitement (Vymazal, 2007).

3.5.5 Dragage des sédiments et de la matière organique récalcitrante

De grandes quantités de phosphore s'accumulent lors des premières années après l'installation de nouveaux marais filtrants (Dunne et Reddy, 2004). La capacité de rétention diminue au fil des années s'il n'y a pas de gestion du marais, car les sites d'adsorption sur les sédiments et l'absorption par le biote présent sont des phénomènes qui deviennent saturés, c'est-à-dire qu'ils ont une capacité limitée (Dunne et Reddy, 2004; Vymazal, 2007). Ils ne peuvent contribuer à la rétention à long terme du phosphore (Dunne et Reddy, 2004). L'accumulation de matière organique au fond du marais demeure le principal puits d'accumulation du phosphore. Cette couche de matière organique s'épaissit et peut altérer le ruissellement de l'eau. Par conséquent, le temps de rétention de l'effluent dans le marais et le nombre de sites potentiels d'adsorption du phosphore sur les particules de sol diminuent (Dunne et Reddy, 2004). C'est pourquoi une gestion des sédiments et de la couche de matière organique est suggérée par DeBusk, et autres (2004).

Debusk et autres (2004) suggèrent d'enlever le surplus de matières organiques et de sédiments au fond du marais filtrant. Les concentrations des nutriments dans les sédiments doivent être mesurées pour déterminer le moment optimal où ils seront excavés (*Department of the environment, heritage and local government*, 2010). Habituellement, la première excavation des sédiments dans les MFI se fait dans les 10 à 20 premières années suite à l'établissement de celui-ci alors qu'elle se fait dans les 5 à 10 ans pour les autres types de marais artificiels (*ibid*). Une couche de sédiments d'une épaisseur de 10 cm devrait rester sur le fond du bassin afin de maintenir l'intégrité biologique du benthos (*ibid*). Le propriétaire agricole peut ensuite épandre ces sédiments sur ses champs pour les fertiliser, car ceux-ci contiennent beaucoup de phosphore. Une partie du phosphore sera absorbée par les cultures et l'autre partie retournera dans le marais lors du ruissellement (Figure 3.11). Ainsi, il y a une boucle de réutilisation du phosphore qui est créée. À long terme cette boucle peut avoir son importance, car une crise du phosphore est anticipée dans quelques décennies à peine (Hijri, 2012).

Dans l'expérimentation de DeBusk et autres (2004), le dragage des sédiments et des matières organiques a permis de réduire la concentration de phosphore dans les eaux à la sortie des marais. La concentration de phosphore est passée de 130 µg/l à 62 µg/l, prouvant l'efficacité de cette pratique. Les sites d'adsorption, contenus dans les sédiments, qui étaient saturés sont enlevés. De nouveaux sites d'adsorption se forment et le marais regagne son efficacité à capter le phosphore. Concrètement, l'enlèvement des sédiments permet de rallonger la durée de vie des marais filtrants

artificiels de plusieurs années alors qu'il augmente l'efficacité de rétention du phosphore dans les MFI.

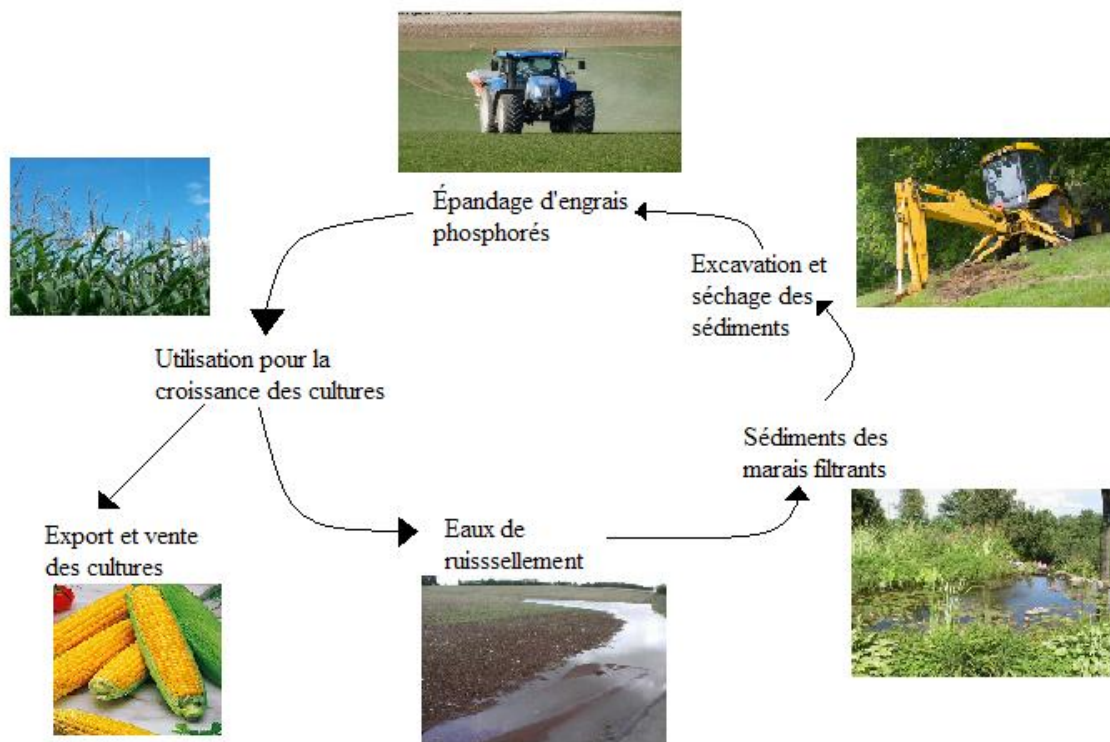


Figure 3.11 : Boucle de réutilisation du phosphore sur une terre agricole avec marais filtrant (Source des images : Central park paving ltd., 2012; Skyrock, 2009; Agence Science Presse, 2007; Lesvaleurs nutritives.com, 2013; Chez Alice, s.d.)

3.5.6 Ajout de coagulants dans le marais

Les coûts d'excavation pour enlever les sédiments et les matières organiques sont très élevés. Pour pallier cette problématique, plusieurs scientifiques proposent d'utiliser des amendements chimiques qui immobilisent le phosphore dans les sédiments (DeBusk, s.d.). Ann et autres (2000) mentionnent que des amendements avec du calcium, du fer et de l'aluminium dans un bassin spécifique à la sédimentation montrent des résultats intéressants. DeBusk (s.d.) a expérimenté l'ajout de sel d'aluminium dans des grands pots en verre remplis d'eau polluée. Il a constaté une rétention de 97 % du phosphore total après une journée. Il a recommencé la même expérimentation avec les mêmes coagulants. Il a rempli de nouveau le pot avec de la nouvelle eau polluée. Une journée plus tard, il a remarqué que 75 % du phosphore total avait été retenu par le sel d'aluminium. Il a recommencé l'expérimentation une troisième fois et a obtenu un taux de rétention du phosphore équivalent à

30 %. Cette expérimentation prouve que, tant que les coagulants ne sont pas saturés, ils sont réutilisables si on les remet en suspension par brassage (DeBusk, s.d.). Les coagulants ont une certaine limite d'utilisation et ils doivent être renouvelés pour une efficacité optimale (*ibid*). Les coagulants les plus performants sont, en ordre d'importance : FeCl_3 , aluminium, Ca(OH)_2 , calcite et dolomite (Ann et autres, 2000).

3.5.7 Ajout de sucres

Gruyer (2012) a testé le rendement des marais à traiter les effluents agricoles en fonction de l'ajout de différentes sources de carbone (carbone simple vs carbone complexe). Les sources simples de carbone, comme le saccharose, sont utilisées rapidement par les micro-organismes d'intérêt, soit les bactéries dénitrifiantes et les sulfato-réductrices. Elles deviennent très actives et réduisent alors le nitrate dans une proportion de 96 % et le sulfate dans une proportion de 98 %. Les marais avec une source complexe de carbone, comme le compost, les sciures et les copeaux de bois, ont montré une diminution de 20 % de la concentration des ions SO_4 et de 95 % pour les ions NO_3 . La source de carbone complexe n'est pas assez rapidement dégradée par la flore microbienne pour fournir une quantité suffisante de molécules assimilables pour le maintien d'une activité importante des deux groupes de bactérie d'intérêt (Gruyer, 2012). Seules les bactéries dénitrifiantes en profitent. Ces résultats suggèrent que l'ajout d'une source externe facilement assimilable de carbone n'influence pas le traitement des nitrates. Par conséquent, les sources de carbone que l'on retrouve naturellement dans les marais (ex : cellulose végétale) sont plus difficilement assimilables, mais fournissent suffisamment d'énergie pour tous les microorganismes présents dans le marais sans diminuer l'efficacité du traitement.

3.5.8 Ajout de pompes à oxygène

Le processus de nitrification ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_3^-$) est souvent limitant lors du traitement des effluents azotés (Kuschik et autres, 2003). La nitrification dépend de la température de l'eau du marais et la quantité d'oxygène dissous. Elle est inhibée sous une température de 10 °C (Werker et autres, 2002), réduisant l'efficacité du traitement lors de froides températures. L'ajout d'une pompe d'aération permet une augmentation de la concentration d'oxygène qui stimulerait la nitrification et le rejet de (NO_y) lors de températures hivernales (Maltais-Landry et autres, 2009; Dong et autres, 2011). En contrepartie, le processus de dénitrification devient inhibé et la concentration de nitrates augmente dans les effluents. C'est pourquoi l'ajout d'une pompe s'avère utile dans un système

comprenant de multiples cellules de marais qui permettrait le traitement des nitrates (Maltais-Landry et autres, 2009; Dong et autres, 2012). Si la pompe est installée dans la première cellule, tous les ions ammonium (NH_4^+) seront transformés en nitrates qui pourraient être traités par la dénitrification dans les autres cellules (*ibid*). Les résultats sont particulièrement encourageants lors du traitement durant les saisons automnales et hivernales (*ibid*). Par contre, les coûts d'achat et de maintenance sont élevés.

3.6 Stratégie d'aménagement des marais dans un bassin versants

Dans un bassin versant agricole, il existe 2 stratégies possibles pour l'aménagement de marais filtrants :

- 1- Favoriser l'établissement de marais filtrants de faible superficie dans les ruisseaux d'ordre 1 sur chaque terre agricole possédant des cours d'eau;
- 2- Favoriser l'établissement d'un seul marais filtrant de grande superficie dans un cours d'eau d'ordre 2, 3 ou 4, dans le bas du bas du bassin versant.

Dans la littérature, il n'y a pas de stratégie privilégiée. Chacune des stratégies ont leurs avantages et leurs inconvénients (voir tableau 3.5). Le choix dépend notamment du degré de contamination des cours d'eau, de la géographie du bassin versant, du degré d'acceptation de la part des agriculteurs et des coûts économiques. Le chapitre 5 fournira des recommandations sur la stratégie jugée optimale en fonction des réponses fournies par les agriculteurs au questionnaire.

Tableau 3.5 : Avantages et inconvénients des 2 stratégies d'aménagement des marais filtrants dans des bassins versants agricoles
(Compilation d'après : Dunne et autres, 2004)

Description de la stratégie d'aménagement	Numéro de stratégie d'aménagement	Avantages	Inconvénients
Aménagement de marais filtrants à faible dans les cours d'eau d'ordre 1 sur toutes les terres agricoles qui ont un ruisseau	1	Design du marais est simple	Chaque agriculteur doit accepter d'implanter un marais filtrant sur ses terres (degré d'acceptation sociale)
		Flexibilité au niveau de la localisation géographique du marais	Nécessité de construire beaucoup d'infrastructures (ex : marais et canaux)
		Traitement plus efficace pour enlever le phosphore, les nitrates et les pesticides	Coûts associés à la maintenance sont très élevés (beaucoup de marais)
		Superficie nécessaire pour un marais est plus faible	Difficile à gérer pour la construction et la maintenance (beaucoup de marais)
		Coûts associés à la construction d'un marais filtrant sont faibles	
Aménagement d'un marais filtrant de grande superficie dans le bas d'un bassin versant dans un cours d'eau d'ordre, 2, 3 ou 4	2	Facilité de gérer la construction et la maintenance d'un seul marais filtrant	Grande superficie nécessaire pour le marais
		Coûts de maintenance plus faibles	Choix du site compliqué, étant donné la superficie et la topographie nécessaire
		Acceptation sociale de la communauté	Coûts de construction plus élevés
		Peut créer un site écotouristique pour la communauté	Moins efficace pour le traitement du phosphore, des nitrates et des pesticides
		Design du marais est compliqué, car beaucoup de structures sont nécessaires	

3.7 Comparaison des marais naturels et artificiels

Peu d'études ont été réalisées sur la comparaison de la structure et des fonctions des marais artificiels et naturels. Campbell et autres (2002) ont comparé les composantes du sol, le contenu en matières organiques, la diversité et la surface couverte par les plantes entre 12 marais artificiels (MESP, MEHS et MEVS) et 14 marais naturels en Pennsylvanie. Le contenu en matière organique sur le fond du marais est supérieur dans les marais naturels. Il s'agit d'un résultat prévisible, puisque le temps depuis la formation est une variable importante qui influence ce paramètre. Les marais naturels sont formés depuis des centaines d'années, donc cette longue période a permis à plus de matière organique de se déposer. Comparativement, les marais artificiels étaient en fonction depuis 2 à 18 ans. Malgré tout, une différence significative de l'épaisseur de la matière organique a été remarquée entre les marais artificiels les plus âgés et les plus récents. Quant à la structure, elle demeure sensiblement la même entre les marais naturels et artificiels, sauf au niveau de la diversité et du couvert végétal. Les marais naturels possèdent une plus grande superficie de couvert végétal et une plus grande biodiversité végétale. Il a été observé que les marais artificiels ont une plus grande proportion de plantes de milieu sec que les marais naturels, qui sont formés à majorité de plantes de milieu humide. À première vue, ces résultats laissent présager que les marais artificiels (MESP, MEHS, MEVS), en vieillissant, répondent aux mêmes fonctions que les marais naturels. Cependant, de nouvelles recherches sont nécessaires avec des horizons temporels différents. Les marais filtrants intégrés se rapprochent plus au marais naturel que les autres types de marais artificiel, mais aucune étude n'a prouvé si la structure et les fonctions étaient similaires.

3.8 Bénéfices et limites des marais filtrants

Il y a beaucoup de bénéfices qui sont associés aux marais filtrants, mais il existe également certaines limites. Les prochaines sous-sections détailleront ces bénéfices et limites.

3.8.1 Bénéfices des marais filtrants

Plusieurs recherches ont démontré l'efficacité des marais filtrants à purifier les effluents de tout horizon à faible coût : eaux usées municipales, industrielles (industries chimiques, de textile, pâtes et papiers, alimentaires, etc.), agricoles, lixiviats de décharges, etc. (Vymazal, 2009; Poe et autres, 2003; Wallace et autres, 2001; Vymazal, 2007; Kroeger et autres, 2009; Braskerud, 2002; Gruyer, 2012; DeBusk, s.d.; DeBusk et autres, 2004; Dunne et Reddy, 2004; Maltais-Landry et autres, 2009;

Hefting et autres, 2013; Kadlec et Knight, 1996). Ils sont considérés comme des zones tampons entre les terres et le milieu dulcicole (Price et Waddington, 2000). Installés dans une zone agricole, ils capturent les nutriments comme le phosphore et l'azote ainsi que certains pesticides. L'eau est purifiée et, par la suite, rejetée dans les cours d'eau en aval. Les marais réduisent également la vitesse d'écoulement lors de pluies torrentielles, évitant ainsi l'érosion des terres agricoles (USDA et USEPA, s.d.).

Les marais fournissent d'autres services écosystémiques importants à l'environnement. Ils sont des habitats de préférence pour certains mammifères, amphibiens, reptiles, oiseaux et les plantes de milieux humides. On y retrouve une forte concentration de biodiversité qui influence le rendement agricole et celui du marais. Ils ont un impact positif intangible sur la beauté du paysage agricole. Les marais sont également un moyen de réguler le drainage et la rétention de l'eau parmi les fossés ou ruisseaux agricoles (USDA et USEPA, s.d.). Cette eau est réutilisée pour l'irrigation pendant les périodes de sécheresse, ce qui évite d'épuiser les réserves d'eau sous-terrain. Aujourd'hui, la valeur sociale des marais augmente continuellement suite à la découverte des services rendus à l'être humain, alors qu'autrefois, ils étaient vus comme des terres non productives et inutiles (Dunne et autres, 2004).

3.8.2 Limites

Il existe aussi certaines limites quant à l'implantation des marais filtrants en milieu agricole. Le projet est peu accepté par les agriculteurs, car les marais nécessitent des terres qui seraient autrement utilisées pour les cultures et demandent un suivi régulier (Dunne et autres, 2004). Pour cet essai, des groupes agricoles ont été approchés et interviewés afin de cibler précisément les préoccupations des agriculteurs face à l'implantation de telles structures (voir section 4). L'efficacité du traitement constitue une limite; celui-ci est d'origine biologique. Le traitement n'est donc pas constant et est difficile à contrôler. L'efficacité des marais varie en fonction des conditions météorologiques, des conditions hydriques, des polluants rejetés et des saisons. Par exemple, le traitement est plus efficace durant l'été que l'hiver, car le biote y est plus actif :

- ❖ il y a plus de plantes pour ralentir l'écoulement des eaux;
- ❖ la température supérieure de l'eau augmente la vitesse du métabolisme des microorganismes qui absorbent plus de nutriments;

- ❖ les végétaux font plus de photosynthèse;
- ❖ le régime hydrique permet un temps de rétention supérieur.

Le marais doit toujours avoir une couche d'eau sur son fond pour un traitement optimal. Le milieu inondé permet aux microorganismes anaérobies de demeurer en vie. Ces microorganismes sont responsables en grande partie du traitement épuratoire. Le rejet de grandes concentrations de phosphore, d'azote et de pesticides dans un court laps de temps suite à des précipitations entraîne une réduction de l'efficacité du traitement. Cette réduction est due à la diminution du temps de rétention dans le marais. (USDA et USEPA, s.d.),

Il existe une limite au niveau des connaissances des marais filtrants traitant la pollution agricole d'origine diffuse. Le sujet est relativement nouveau et peu de données sont disponibles dans la littérature. Il est difficile de trouver des données sur la performance des marais à court et long terme pour un milieu agricole similaire à celui du Québec. Il existe rarement des suivis après l'installation de marais filtrants à cause des coûts engendrés. Dans la littérature, on retrouve surtout des articles où le nitrate se retrouve en surabondance alors que le phosphore se retrouve en très faibles concentrations. Au Québec, la problématique agricole est surtout reliée aux concentrations élevées de phosphore. Il n'existe pas de consensus dans la littérature sur la méthodologie à appliquer et le design optimal à sélectionner pour améliorer l'efficacité des marais. S'il existait des résultats de performance à court et long terme en fonction de plusieurs types de design, de caractéristiques de terrain et d'autres variables, il serait possible d'effectuer une méta-analyse pour pouvoir ressortir de plus claires conclusions quant au design optimal, mais ce n'est pas le cas présentement. Cependant, il existe aujourd'hui quelques solutions qui sont privilégiées pour faire fi de toutes ces limitations et ont été présentées à la section 3.5.

3.9 Exemple de cas au Québec

Un marais filtrant a été installé en 2002 pour traiter les eaux usées de laiterie de la Ferme Fortin. Auparavant, les eaux usées étaient évacuées directement dans le fossé comme le faisaient de nombreux producteurs avant que le gouvernement ne l'interdise. Le programme Prime-Vert a alors accordé de l'aide financière pour aménager des marais filtrants. Le coût total a atteint la somme de 120 000 \$, sans compter le temps nécessaire pour la construction, car ce sont les producteurs qui l'ont construit eux-mêmes. Ils ont donc épargné 50 000 \$ (La Coop, 2006).

Le marais comporte 4 bassins : un premier bassin de sédimentation-décantation, suivi d'un bassin de quenouilles, d'un bassin de lentilles et d'un bassin végétal. Le bassin de sédimentation, d'une dimension de 70 m de longueur par 30 m de largeur, est creusé dans de l'argile imperméable. Les eaux de la laiterie y sont déversées et les matières en suspension sédimentent jusqu'au fond du bassin. Le second bassin est de même dimension que le premier. On y retrouve des quenouilles, car ces plantes captent une plus grande quantité d'eau, de nitrates et de phosphates en plus d'entretenir la qualité du milieu pour les microorganismes. Chaque année, les quenouilles meurent et s'accumulent au fond du bassin. Ces 2 bassins doivent être vidés de leurs sédiments et des résidus végétaux au sol à chaque 10 ans. Le troisième bassin, d'une dimension de 80 m de longueur par 30 m de largeur, représente le bassin de polissage où les algues et les plantes submergées se multiplient. On retrouve les lentilles d'eau qui représentent la principale source de nourriture des canards et des carouges. L'eau s'écoule vers le bassin végétal qui est constitué de plantes semi-aquatiques (La Coop, 2006).

Durant l'hiver, le marais filtrant n'est pas en fonction et les effluents sont entreposés dans un bassin. La qualité de l'eau est évaluée à l'entrée et à la sortie du marais 2 fois par année. « Six testeurs d'eau de la nappe phréatique, dont un par bassin, sont installés sur le site. Ces testeurs permettent de vérifier l'état de la qualité de l'eau de la nappe et de s'assurer que les bassins du marais ne fuient pas » (La Coop, 2006). En conclusion, les Fortin assurent que les marais filtrants nécessitent plus d'effort que les fosses et les coûts sont à peu près identiques.

4 RÉSULTATS D'ENTREVUES

Pour récolter les opinions des agriculteurs, un questionnaire a été distribué par courriel et répondu au téléphone par 12 agriculteurs. Le but est de proposer une nouvelle façon de protéger les cours d'eau et les lacs contre la contamination d'origine agricole aux producteurs agricoles (phosphore, nitrates et pesticides) et de récolter leurs opinions aussi complètes que possible au sujet des marais filtrants. Ce questionnaire comporte 2 sections : la première section définit le marais filtrant et la deuxième section présente les questions, dont la plupart des réponses sont à choix multiples. Il était important de définir les enjeux et les avantages des marais filtrants avant de poser des questions sur ce sujet pour avoir des réponses qui reflètent leurs opinions. Les réponses étaient à choix multiples, afin d'orienter les répondants et de leur permettre d'économiser du temps. Si le questionnaire prenait trop de temps à répondre, moins d'agriculteurs auraient répondu et la taille d'échantillon serait inférieure à 12. Les questions avaient pour but d'évaluer la volonté des producteurs agricoles face à l'implantation d'un marais et de déterminer quelles seraient les mesures complémentaires nécessaires pour réaliser un tel projet.

Cet échantillonnage est loin d'être représentatif de la majorité des agriculteurs, car ce sont seulement les agriculteurs intéressés par le sujet qui ont accepté de répondre. Les agriculteurs ne désirant pas répondre au questionnaire l'ont mentionné lors de la prise de contact. Au total, ce sont 17 agriculteurs qui ont refusé de répondre à ce questionnaire pour des motifs inconnus. Il faut donc garder en tête lors de cette analyse qu'il existe un important biais, car toutes les opinions n'ont pu être récoltées. Cependant, il est possible de faire ressortir certaines informations pertinentes qui sont présentées dans les prochaines sections.

4.1 Profil des agriculteurs répondants

Les agriculteurs répondants au questionnaire sont répartis selon les 5 classes d'âge en proportion similaire (Figure 4.1). On peut donc affirmer qu'il n'y a pas de problème de représentativité en ce qui a trait à l'âge des répondants. Quant à leur ancienneté dans le métier, la plupart des répondants ont beaucoup d'expérience comme producteur agricole. À la figure 4.2, on constate que plus de la moitié des répondants ont plus de 31 ans d'expérience. Donc, on suppose que ces répondants ont appris leur métier tôt dans leur vie. La plupart des répondants sont des cultivateurs. En effet, 100 % et 83 % des répondants cultivent le maïs et le soya respectivement alors que seulement 17 % des

répondants font de l'élevage (Figure 4.3). Il manque donc de représentativité du secteur des cultures maraîchères et fruitières.

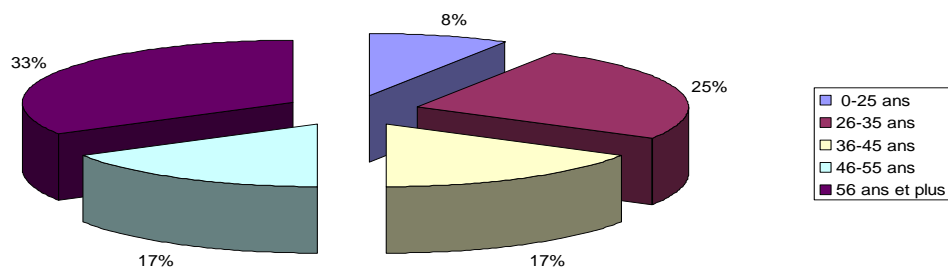


Figure 4.1 :- Âge des répondants selon ces catégories d'âge (en pourcentage)

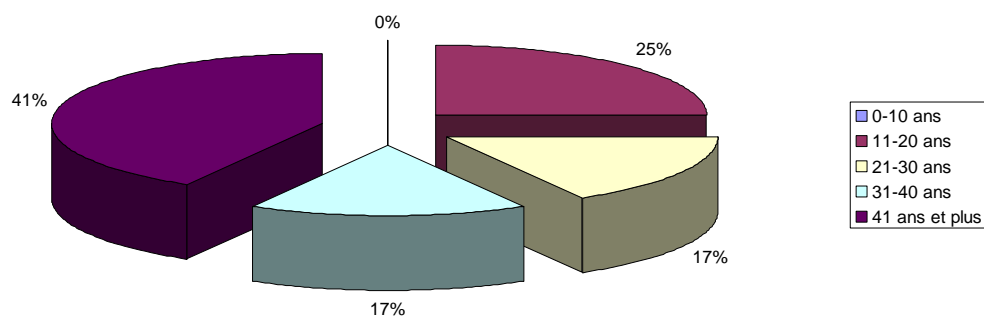


Figure 4.2 : Ancienneté des agriculteurs répondants (en années)

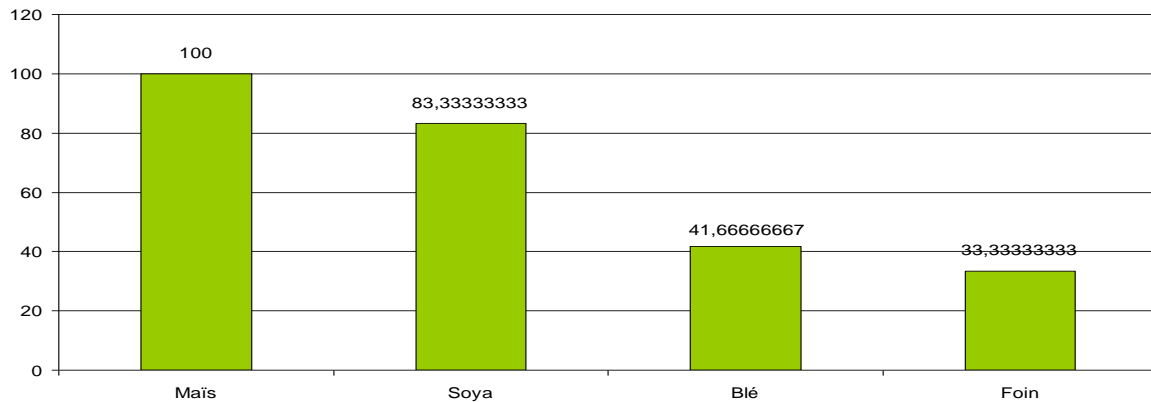


Figure 4.3 : Pourcentage des répondants cultivant le maïs, le soya, le foin et le blé

Les agriculteurs répondants sont conscients que leur entreprise crée des problèmes environnementaux en aval, notamment l'eutrophisation des cours d'eau et la contamination par les pesticides des cours d'eau. Ils comprennent également les enjeux liés à la compaction et l'érosion du sol. En effet ce sont les principaux problèmes environnementaux ressortis par les répondants à la figure 4.4. Quelque 33 % des répondants jugent qu'un changement de la biodiversité est un problème préoccupant. Il faut se rappeler que ce sont les agriculteurs les plus sensibilisés aux arguments environnementaux qui ont répondu à ce questionnaire. Les agriculteurs répondants mettent également beaucoup de mesures de protection de l'environnement en œuvre comme on peut le voir à la figure 4.6. En effet, 58 % des répondants considèrent qu'ils réduisent leur consommation de pesticides; 42 % des répondants font du semis direct et ont recours aux engrais verts. Cependant, aucun référentiel n'est fourni pour la diminution de pesticides, donc ce paramètre est difficile à évaluer. Par contre, tous les répondants estiment qu'ils respectent la législation, car ils ont des bandes riveraines végétalisées de plus de 3 mètres de largeur et possèdent leur plan de fertilisation. Cependant, il serait intéressant de vérifier ce qu'il en est sur le terrain pour savoir si ce qui est dit représente la vérité.

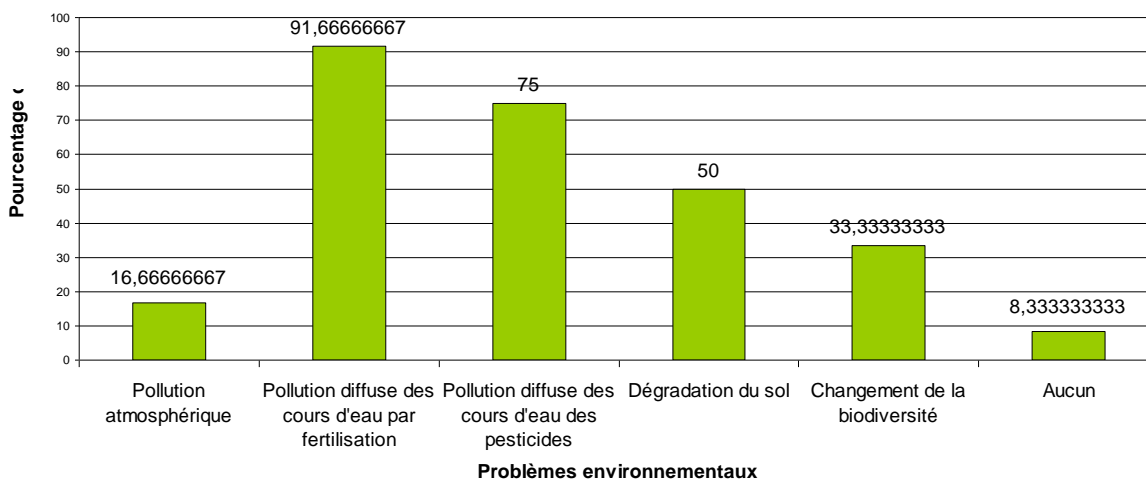


Figure 4.4 : Les problèmes environnementaux les plus préoccupants en agriculture

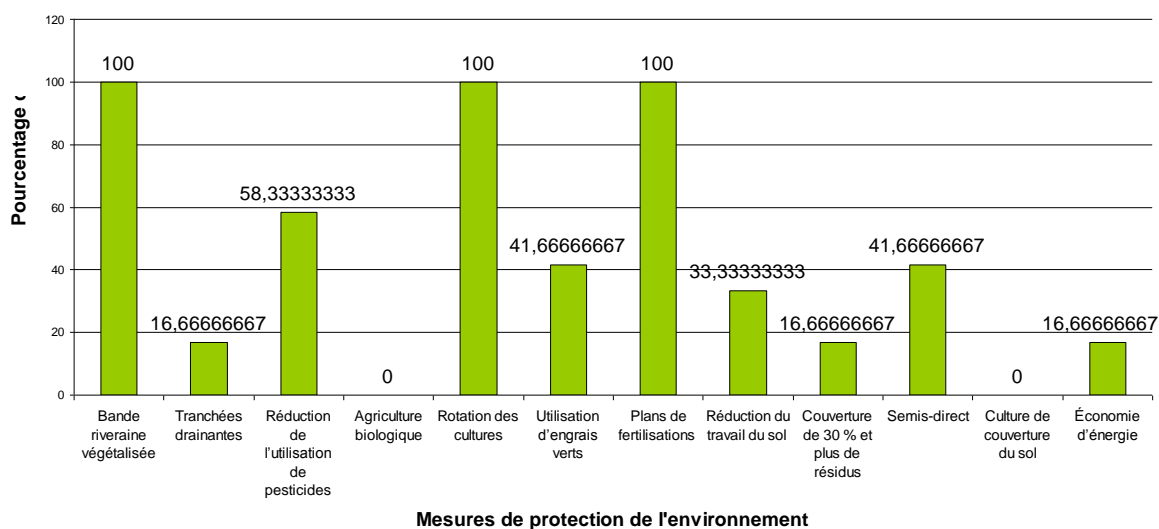


Figure 4.5 : Les mesures de protection mises en œuvre par les répondants

4.2 Incitatifs nécessaires au développement de marais sur les terres agricoles

Les agriculteurs ne connaissent pas les marais filtrants et leurs avantages. En effet, une grande majorité des répondants (92 %) n'avaient jamais entendu parler des marais filtrants. Il y a une importante campagne de sensibilisation à mettre en branle avant de passer à une autre étape, car même les agriculteurs qui effectuent déjà des efforts de protection de l'environnement n'en

connaissent pas plus. Malgré cela, il existe tout de même des agriculteurs qui sont en faveur des marais filtrants, car ils croient qu'une telle structure répondrait à leurs besoins. En effet la figure 4.6 montre les réponses à la question suivante : « Suite à la lecture de la section 1 qui détaille les rôles des marais filtrants, seriez-vous prêt à installer un marais filtrant sur vos terres? » On constate que 17 % des répondants répondraient oui et que 25 % des répondants ne savent pas. Il est important de cibler ces agriculteurs et de concentrer les efforts pour qu'ils adhèrent à un tel projet pour qu'ils puissent devenir des exemples dans leur milieu. Par contre, l'acquisition de la connaissance par les agriculteurs via une sensibilisation demeure la première étape. La figure 4.7 montre les sources d'informations préférées par les répondants pour en connaître davantage sur les marais filtrants. Les agronomes semblent la ressource à privilégier par 83 % des répondants pour une sensibilisation plus efficace. Il est donc important d'avoir des agronomes au sein d'un club agroenvironnemental qui possèdent des connaissances en matière de marais filtrants et qui ont de fortes aptitudes de communication.

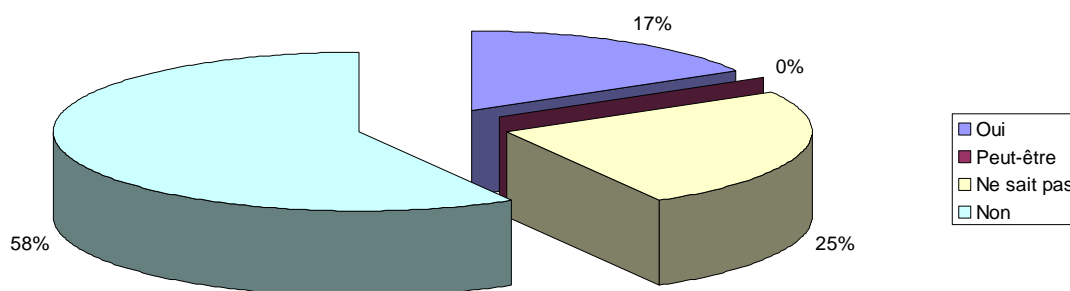


Figure 4.6 : Suite à l'énumération des bienfaits des marais filtrants, est-ce que les répondants sont prêts à installer un marais filtrant

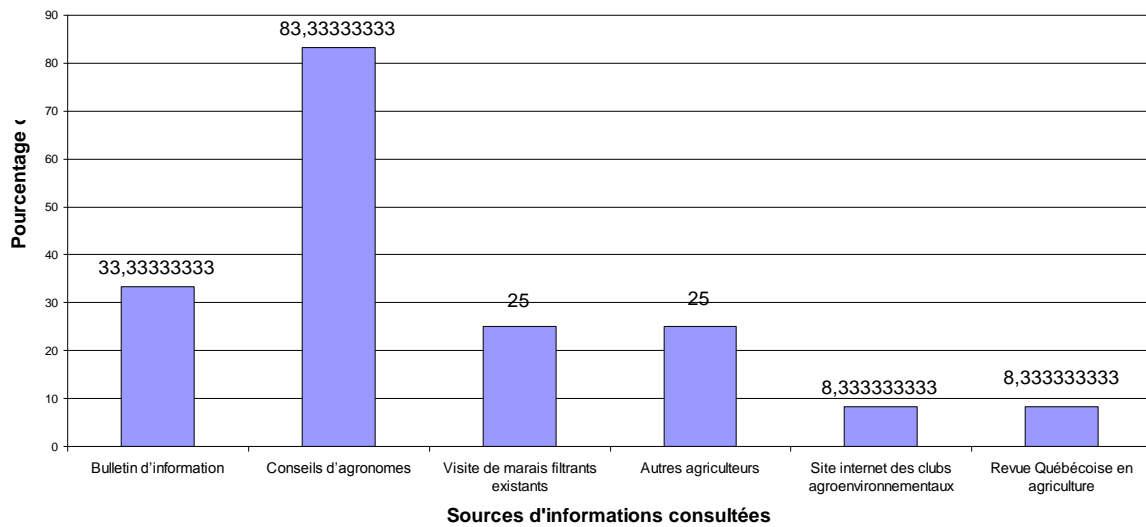


Figure 4.7 : Les sources d'informations consultées régulièrement par les répondants

Les propriétaires agricoles doivent gérer tous les aspects liés à leur entreprise, que ce soit au niveau légal, au niveau des achats ou au niveau de la production. Cela demande beaucoup de temps. Par conséquent, ils ont peu ou pas de temps à accorder pour un projet d'implantation d'un marais filtrant à partir des études préalables jusqu'à la construction. Tous les répondants sont en accord pour léguer cette gestion de projet à un organisme externe. Parmi les choix proposés, 46 % des répondants sont prêts à déléguer la gestion à des clubs agroenvironnementaux et 27 % à une agence du MDDEFP (Figure 4.8). Majoritairement, ce sont des organismes avec qui les répondants ont eu des expériences préalables positives.

Des incitatifs d'ordre financier sont nécessaires pour soutenir des pratiques environnementales au niveau agricole et pour motiver les propriétaires agricoles. Les résultats démontrent que 78 % des répondants préfèrent recevoir une compensation financière sous forme de subvention pour les coûts des travaux comparativement aux autres formes de financement proposées dans le questionnaire (location des terres ou achat des terres) (Figure 4.9). Un pourcentage de subvention de près de 60 à 80 % est jugé acceptable par les répondants. En effet, plusieurs répondants ont réalisé des travaux de végétalisation des bandes riveraines ces dernières années et ont eu accès à une subvention équivalente à 70 % des coûts associés à ces travaux. Ils sont donc plus familiers avec ce type de soutien financier et c'est sans doute ce qui explique les résultats obtenus.

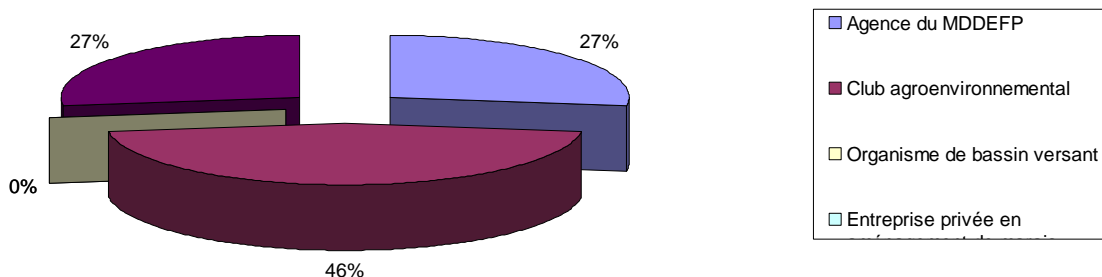


Figure 4.8 : Les organismes avec lesquels les répondants aimeraient travailler pour la réalisation de marais filtrant sur leurs terres

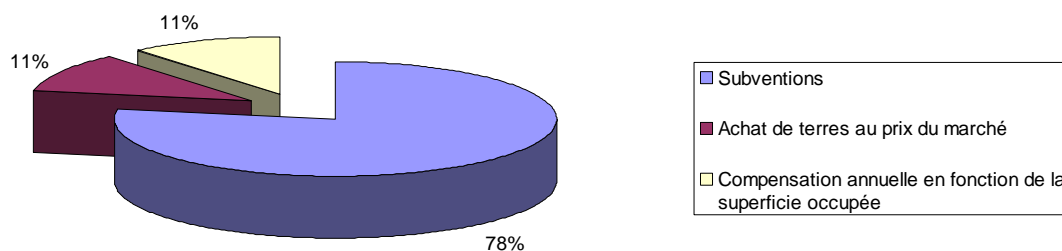


Figure 4.9 : Forme des incitatifs économiques préférés selon les répondants

4.3 Choix du type marais et sa superficie

Le tableau 4.1 montre les critères importants qui servent à différencier les types de marais filtrants. Les agriculteurs donnaient une note de 1 à 10 pour chacun des critères où 10 est le critère le plus important et 1 est celui qui est le moins important. Une moyenne de toutes les réponses fournies a été calculée pour chacun des critères et se retrouvent dans la seconde colonne du tableau 4.1. Les 4 critères les plus importants sont dans l'ordre : coûts totaux du marais filtrant; niveau de

compensation financière; efficacité de filtration et superficie du marais filtrant. Le type de marais répondant à ces critères serait un système hybride constitué d'un MEVS suivi d'un MEHS, car ils ont une meilleure efficacité de rétention du phosphore et de transformation des nitrates par unité de surface. Cela signifie qu'un autre type de marais filtrant doit occuper une plus grande superficie pour avoir un même niveau d'efficacité que ce système hybride. De plus, les coûts d'implantations sont supérieurs au MESP, mais si une majorité de ces coûts sont remboursés via une subvention, cela ne devient plus problématique.

Tableau 4.1 : Moyenne des notes fournies par les répondants en fonction de chaque critère important pour la sélection du type de marais filtrant

Critères de sélection du marais filtrant	Moyenne des notes
Beauté du marais filtrant	2,92
Efficacité de filtration	8,67
Coûts totaux du marais filtrant	9,00
Superficie du marais filtrant	7,83
Temps nécessaire pour la construction	4,67
Temps nécessaire pour la maintenance	3,83
Augmentation de la biodiversité	3,92
Niveau de compensation financière	8,83

La superficie totale que les répondants sont prêts à fournir pour implanter un marais filtrant se retrouve à la figure 4.10. Ainsi, une superficie totale variant entre 1000 et 1500 m² est jugée acceptable par 33 % des répondants. Si l'on enlève les répondants qui refusent de fournir des terres (0 m²), on obtient une proportion de 57 % des répondants qui préfèrent cette superficie. Cette superficie représente près du double de la superficie proposée par Braskerud (2002) pour un marais filtrant en zone agricole. Ce type de marais a montré la meilleure efficacité recensée dans un milieu nordique pour un marais filtrant. Le taux de rétention du phosphore varie de 26 à 71 g par m² par année et celui du nitrate varie entre 50 et 285 g par m² par année. Par conséquent, les gains environnementaux espérés avec une superficie qui varie entre 1000 et 1500 m² sont intéressants pour les producteurs agricoles québécois.

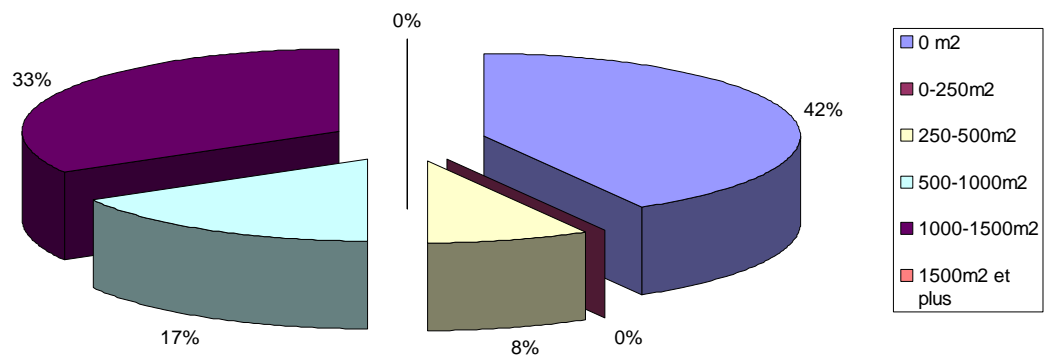


Figure 4.10 : Surface jugée raisonnable pour un marais filtrant selon les répondants

5 RECOMMANDATIONS

Suite à toutes les informations recueillies dans la littérature et par l'entremise des entrevues avec des agriculteurs, des recommandations d'ordre technique et d'ordre social ont été formulées. Ces recommandations visent les clubs d'agriculture durable afin de les orienter dans la mise en œuvre de nouveaux marais filtrants dans le paysage agricole du Québec.

5.1 Recommandations au niveau technique

Cette section décrit les recommandations proposées pour l'aspect technique des marais filtrants, soit la stratégie d'aménagement à prioriser, le choix du site d'implantation, le choix du design, les modes de gestions et les futures recherches à effectuer.

5.1.1 Stratégie d'aménagement

Suite à l'analyse des résultats obtenus par l'entremise des réponses au questionnaire, il est évident que la majorité des agriculteurs ne possèdent pas de connaissances sur les marais filtrants. Il s'agit d'une pratique nouvelle dans le domaine agricole. Tant que les producteurs agricoles ne posséderont pas suffisamment de connaissances et n'auront pas accès à des retours d'expérience sur les marais filtrants, la stratégie #1 d'aménagement du tableau 3.5 (aménagement de marais filtrants de faible superficie dans les cours d'eau d'ordre 1 sur toutes les terres agricoles qui ont un ruisseau) ne peut être priorisée. Par conséquent, la stratégie d'aménagement à prioriser est la 2^e du tableau 3.5 (aménagement d'un marais filtrant de grande superficie dans le bas d'un bassin versant dans un cours d'eau d'ordre, 2, 3 ou 4). Les résultats du questionnaire démontrent également que certains producteurs agricoles sont intéressés, mais n'ont pas de connaissances suffisantes. Il faut cibler ces agriculteurs pour l'implantation d'un marais filtrant d'une grande superficie et concentrer les efforts pour qu'ils deviennent des pionniers dans leur milieu. Il sera possible de modifier la stratégie dans quelques années, après qu'un travail de sensibilisation des producteurs agricoles ait été effectué.

5.1.2 Choix du site d'implantation

Avant de sélectionner définitivement le site pour l'implantation d'un marais filtrant, il est nécessaire d'effectuer une étude détaillée des paramètres hydrologiques du cours d'eau et de la superficie où le marais est implanté. En effet, le débit du cours d'eau, la quantité de précipitations, la quantité d'eau de ruissellement et la perméabilité du sol sont des paramètres très importants à considérer lors d'une

telle étude. Ceux-ci font alors varier la quantité d'eau contenue dans le marais et le temps de résidence de l'eau. Par exemple, si la vitesse d'infiltration de l'eau est supérieure à 10^{-6} m/s, il devient nécessaire d'installer une membrane imperméable à la base du marais, car l'eau s'infiltrera dans le sol et le marais a de fortes possibilités de s'assécher. Si les études hydrologiques s'avèrent négatives sur le lieu d'implantation du marais, il est nécessaire de changer le lieu d'implantation afin de respecter le temps de résidence de l'eau désiré pour un traitement optimal. Le temps de résidence recommandé pour l'eau dans le marais est de 5 à 10 jours, car la rétention du phosphore y est plus efficace.

Contrairement au marais du ruisseau Walbridge où une partie de l'eau de la rivière est détournée vers le marais filtrant, il est préférable d'élargir les cours d'eau pour créer le marais à l'intérieur du cours d'eau si le débit est suffisamment faible. Suite aux études préalables, si le débit est trop élevé, il vaut mieux détourner une partie des eaux vers un marais filtrant, sauf que ce n'est pas la totalité de l'eau qui sera filtrée.

5.1.3 Choix du design du marais filtrant

Le design du marais devrait être similaire à celui de Braskerud, car c'est celui qui s'est montré le plus efficace pour retenir le phosphore. Par contre, quelques petites modifications permettraient de le rendre plus efficace et facile à exploiter à long terme. Ainsi, le marais filtrant devrait être composé de 4 unités distinctes dans l'ordre suivant :

- 1- Bassin de sédimentation;
- 2- Unité de marais filtrant;
- 3- Bassin d'aération;
- 4- Étang de polissage.

La superficie totale recommandée est de 1000 à 1500 m² et il s'agit d'une valeur jugée raisonnable par les agriculteurs et qui procure un gain environnemental important.

Dans un premier temps, le marais serait précédé par un bassin de sédimentation permettant la sédimentation du phosphore particulaire et des autres MES. Ce bassin devrait être de forme ovale avec une profondeur variant de 0,5 m à 1,25 m. Aucune espèce végétale ne devrait y pousser. Au

total, il devrait occuper 25 % de la superficie totale du marais, ce qui équivaut à 250-375 m². Un ouvrage permettant le ralentissement du courant devrait également être installé avant le bassin de sédimentation pour faciliter la sédimentation des MES dans le bassin en diminuant la vitesse de l'eau.

Dans un second temps, l'unité de marais filtrant devrait être composée d'un MEVS suivi d'un MEHS de forme soit rectangulaire ou ovale avec un ratio longueur sur largeur variant de 2 à 3. Ces formes permettent de ralentir le courant et de le distribuer uniformément sur la surface du marais. La superficie pour le MEVS et le MEHS est de 175-265 m² pour chacun et les 2 bassins doivent se suivre dans cet ordre. Un canal en forme d'entonnoir pourrait relier les 2 unités de marais. Une pompe pourrait être installée pour envoyer l'eau du MEVS au MEHS ou on construit le MEVS plus haut que le MEHS comme à la figure 3.8a pour permettre à l'eau de se déverser par gravité dans le MEHS. Les 2 unités de marais sont d'une profondeur de 0,8 à 1 m et sont remplies avec du gravier et du sable. Les végétaux sont transplantés dans les marais entre le gravier et le sable. L'alimentation en eau du MEVS peut être intermittente alors que le MEHS doit toujours être rempli d'eau.

Dans un troisième temps, un fossé d'oxygénation devrait être implanté à la suite de l'unité de marais. Ce fossé est constitué de roches dont le diamètre varie entre 5 et 20 cm. La profondeur d'eau est de 15 cm pour permettre à l'oxygène de se mélanger plus facilement étant donné le rapport surface/volume d'eau plus élevé. On évite de planter des végétaux dans ce fossé. La superficie du fossé doit occuper 15 % de la superficie totale du marais filtrant, soit 150-225 m².

Dans un quatrième temps, on retrouve l'étang de polissage qui constitue la dernière unité du marais filtrant. On y plante une grande variété de plantes émergentes, flottantes et submergées, qui peuvent être similaires à celle de la 2^e unité ou complètement différentes. Le tableau 3.4 sert de guide pour le choix des plantes flottantes et émergées. Quant aux plantes submergées, on retrouve souvent les cornifles nageantes (*Ceratophyllum demersum*), les plantes de la famille des Hydrocharitacées (Vallisnères et Élodées), les lentilles d'eau et les plantes du genre *Myriophyllum*. Ce dernier bassin devrait occuper 25 % de la superficie totale du marais filtrant soit 250-375 m². La profondeur du bassin devrait varier entre 0,5 et 1 m afin de conserver l'eau plus fraîche et de permettre aux plantes submergées d'hiberner. Cet étang permet donc un minimum de traitement même si le marais est couvert de glace durant l'hiver.

5.1.4 Gestion d'ensemble des 4 bassins

Premièrement, il est important de stabiliser le niveau d'eau à une certaine hauteur pour la survie de l'écosystème humide et de diminuer la vitesse de l'eau. C'est pourquoi des ouvrages régulant le volume de l'eau, comme l'entaille en V ou un barrage, devraient être ajoutés avant le bassin de sédimentation (1^{er} bassin), à la sortie de l'unité de marais (2^e bassin), à la sortie du fossé d'aération (3^e bassin) et à la fin de l'étang de polissage (4^e bassin). Ainsi, le débit à la sortie du marais est nul tant que la hauteur de la colonne d'eau soit stable et égale à la hauteur de ces dernières structures. Par la suite, le débit devient équivalent entre l'entrée et la sortie du marais et le niveau reste stable. Il est également recommandé d'installer 2 unités de marais filtrants en parallèle. Ce design permet de diriger le courant vers une unité et d'assécher l'autre. Pendant ce temps, il est possible d'effectuer des travaux de maintenance, notamment le dragage des sédiments, sur l'unité asséchée sans diminuer l'efficacité du traitement.

Deuxièmement, le marais filtrant doit être entouré d'une bande riveraine naturelle de 3 m de largeur minimalement comme c'est la norme pour les cours d'eau en milieu agricole. La bande riveraine naturelle est un couvert végétal permanent composé d'un mélange d'herbacées, d'arbustes et d'arbres sur les terrains adjacents aux cours d'eau, notamment les marais filtrants. Celle-ci assure la transition entre les écosystèmes aquatiques et terrestres. Elles sont particulièrement dynamiques et diversifiées. Cette diversité « s'explique par la juxtaposition de trois écosystèmes (aquatique, riverain et terrestre) sur une superficie relativement restreinte, par la présence d'eau, de nourriture et d'un couvert protecteur, par la diversité de structure de la végétation, par l'importance de l'effet de lisière créé par les écotones et par la variabilité des conditions au gré des saisons » (Gagnon et Gangbazo, 2007). Les bandes riveraines d'une largeur appropriée retiennent généralement une importante fraction des charges de sédiments, d'azote et de phosphore dans l'eau de ruissellement (Kalf, 2002). L'efficacité à retenir les sédiments, le phosphore et l'azote augmente en fonction de la largeur de la bande riveraine protégée et son inclinaison (Gagnon et Gangbazo, 2007). De plus, la présence d'arbres dans celle-ci est très importante. Lors de grandes pluies, elle atténue l'impact des gouttes d'eau sur le sol et ralentit la chute de ces gouttes. L'érosion sera donc moindre.

Finalement, un marais qui comporte toutes les unités et les dimensions recommandées serait plus efficace dans un climat nordique que les autres types de marais filtrant. Enfin, la figure 5.1

représente toutes les spécificités des différentes unités de marais et l'aspect général du marais filtrant recommandé. Si le marais est utilisé spécifiquement pour traiter les eaux usées des laiteries, il est recommandé d'avoir un grand bassin d'accumulation où l'on entrepose l'eau pour l'hiver, car on ne peut traiter les eaux de laiteries pendant cette saison.

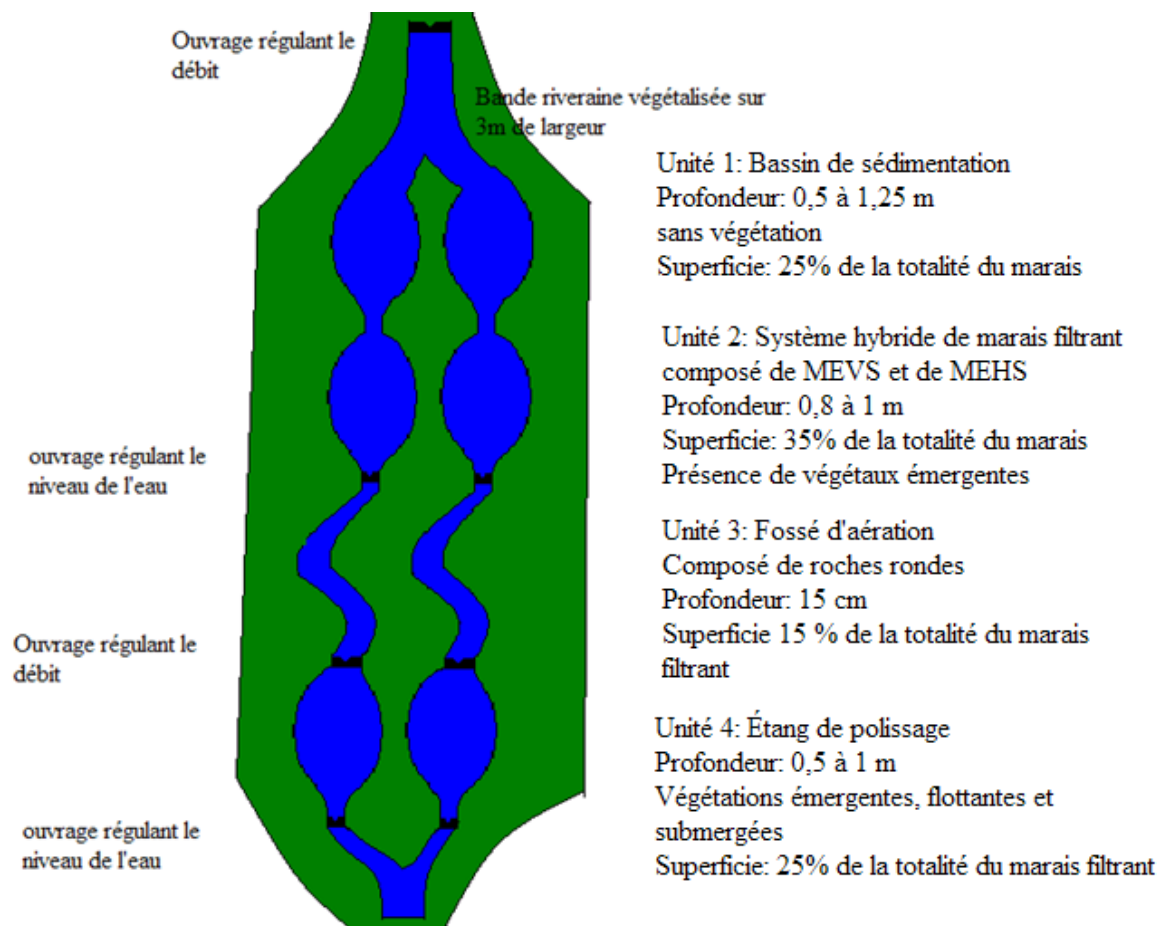


Figure 5.1 : Schéma du marais filtrant recommandé

5.1.5 Modes de gestions appropriés

Les 4 meilleures pratiques de gestion des marais comprennent le choix des espèces végétales à transplanter, le dragage des sédiments une fois le marais implanté, le retrait des plantes aquatiques et des algues des étangs de polissage et les mesures de suivi. L'ajout de sucres dans les marais n'est pas nécessaire, car l'impact n'est pas assez significatif. Les coûts d'installation et le temps de

maintenances pour les pompes sont trop élevées pour les agriculteurs pour les résultats attendus. Finalement, l'ajout de coagulant pourrait être un moyen de traiter le phosphore, mais il demeure toujours certaines incertitudes quant à leur utilisation.

Dans un premier temps, il est conseillé de transplanter plusieurs des espèces présentées dans le tableau 3.4 pour créer un marais avec une plus grande biodiversité, car elles sont indigènes au Québec. Par exemple, il est possible de transplanter 2 espèces sur une grande superficie et de sélectionner 3 autres espèces pour leur beauté et leur valeur écologique. Ces dernières espèces seraient plantées sur une petite superficie. Le choix des espèces végétales dépend des caractéristiques écologiques du milieu, comme la profondeur d'eau ou le niveau d'ensoleillement. Par exemple, aux endroits où la profondeur d'eau varie approximativement de 10 à 15 cm, le carex, le jonc épars, l'acorus roseau, la pontédérie cordée, le phalaris roseau, la saurure penchée ou l'éleocharide du marais pourraient être plantées. Si la profondeur d'eau est de 30 cm, il faut choisir parmi le nénuphar, le scirpe vigoureux, la sagittaire latifoliée, la peltandre de Virginie, la pontédérie cordée ou l'iris versicolore. Le choix des plantes peut varier d'année en année dépendamment des choix en pépinières et devrait être vérifié par un expert en botanique.

Dans un second temps, il est recommandé d'effectuer le dragage des sédiments des marais filtrants afin de régénérer les sites d'adsorptions du phosphore dans les sédiments dans tous les bassins. Les concentrations des nutriments dans les sédiments doivent être mesurées pour déterminer le moment optimal où ils seront excavés. Habituellement, pour un MFI, le dragage est suggéré à tous les 10 à 20 ans alors que, pour tous les autres types de marais filtrants, le dragage est conseillé à tous les 8 à 10 ans. Toutefois, une couche de sédiments d'une épaisseur de 10 cm doit rester dans le fond des marais filtrants pour maintenir l'intégrité biologique du benthos. Il est nécessaire de faire le dragage vers la fin de l'automne, puisque les plantes du marais sont mortes et le traitement ne perd pas son efficacité.

Dans un troisième temps, il est recommandé d'enlever toutes les plantes aquatiques et les algues du dernier bassin du marais filtrant, soit l'étang de polissage. En été, on y retrouve une épaisse couche de lentilles d'eau qui peut nuire au traitement de l'eau. De plus, en enlevant cette couche, on améliore le traitement puisque d'autres algues et plantes aquatiques croîtront. Il est conseillé d'effectuer ce ramassage de végétaux au milieu de l'été.

Dans un dernier temps, il est nécessaire d'effectuer un suivi de la qualité de l'eau à l'entrée et la sortie du marais. Si l'on constate un problème de fonctionnement, il devient plus facile de corriger la situation. De plus, ces résultats pourront être utiles lors de futures recherches en agriculture.

5.1.6 Nouvelles recherches

La coagulation est un procédé physicochimique déjà utilisé pour le traitement de l'eau potable dans un milieu fermé, puisqu'il est possible de recueillir les coagulants dans un bassin fermé. Dans un marais, il est très difficile de recueillir les coagulants et cela demande des travaux d'excavation. Plusieurs expérimentations ont prouvé que l'ajout d'amendements avec du calcium, du fer et de l'aluminium a des résultats positifs sur la rétention du phosphore dans les marais. Par contre, une fois les sites de liaisons saturés, ils deviennent inertes et ne retiennent plus le phosphore. Il devient nécessaire ajouter des amendements périodiquement. Ces amendements sont nuisibles et peuvent devenir toxiques pour la croissance des végétaux à un certain niveau de concentration (OMAFRA, 2013). Avant de recommander l'ajout de coagulants, il est nécessaire de faire de nouvelles recherches pour déterminer le niveau de concentration acceptable de ces coagulants afin d'éviter leurs effets toxiques sur la croissance des plantes des marais. De plus, il est important de déterminer quelle est la proportion de la quantité d'amendements ajoutés qui demeurent dans le marais filtrant. Il faut éviter de disperser ces coagulants dans la nature puisqu'ils ont en effet toxique sur certaines espèces végétales.

Peu d'études ont été publiées sur les similarités et les différences entre les marais filtrants artificiels et les marais naturels. Pourtant, il est primordial de déterminer si les fonctions et la structure sont similaires entre tous les différents types de marais filtrants et les marais naturels. Des résultats de telles études permettraient d'éclairer les décideurs sur le choix des marais artificiels à implanter et des modes de gestion à recommander. Par exemple, le dragage des sédiments influence-t-il la structure et les fonctions d'un marais filtrant artificiel à long terme? Il est donc important de trouver des réponses à ces questions pour avoir une vision à long terme des marais. Par contre, avec le niveau de connaissance actuel, le dragage constitue un mode de gestion qui est approprié pour améliorer l'efficacité à moyen terme des marais filtrants et c'est pourquoi ce mode de gestion est recommandé à la section précédente.

5.2 Recommandations au niveau social

Cette section décrit les recommandations proposées dans le but d'augmenter la connaissance des agriculteurs sur les marais filtrants, d'offrir un soutien financier jugé juste pour la société et pour les agriculteurs, de gérer les projets d'implantation de marais filtrant sur les terres des propriétaires. Ces recommandations font suite aux entretiens réalisés auprès des agriculteurs et tiennent compte de leur contexte socio-économique. Elles permettront un meilleur soutien aux agriculteurs désirant se lancer dans le projet d'aménagement de marais filtrant et une meilleure acceptabilité sociale de la part des agriculteurs.

5.2.1 Sensibilisation

Les résultats du questionnaire démontrent que les agriculteurs en savent peu sur les marais filtrants et ils demeurent ouverts à cette pratique. Dans un premier temps, il faut les sensibiliser pour qu'ils connaissent les avantages et les limites des marais pour qu'ils puissent prendre une décision éclairée en fonction du contexte de leur entreprise. Les agronomes sont les mieux placées pour fournir ces informations selon les agriculteurs sondés. Si les agronomes d'un club agroenvironnemental ne sont pas formés sur le sujet, il serait important d'inclure un programme de formation sur les marais filtrants. Il est également important de leur mentionner que le club agroenvironnemental est prêt à fournir un soutien au niveau financier (subventions du Prime-Vert) et au niveau opérationnel (suivi des opérations). Certains agriculteurs peuvent être intéressés, mais n'osent pas entreprendre toutes les démarches pour le financement et les opérations. Il est donc important de cibler ces agriculteurs et de leur offrir un encadrement pour qu'ils deviennent des exemples. Il serait également intéressant que ces producteurs agricoles (ceux qui ont implanté un marais filtrant) puissent témoigner devant d'autres agriculteurs, car l'audience sera plus réceptive. Des visites de ces marais filtrants pourraient être organisées pour permettre aux agriculteurs sceptiques et curieux de voir les résultats finaux. Finalement, il est important de ne pas négliger toutes autres formes de sensibilisation à travers des bulletins d'information ou des capsules dans des revues spécialisées en agriculture.

5.2.2 Soutien financier

Deux des quatre critères importants pour la sélection des marais filtrants selon les agriculteurs répondants sont ceux reliés aux coûts et aux subventions. Le moyen à privilégier est la subvention pour financer les coûts d'implantation et de maintenance des marais filtrants. Un pourcentage

variant entre 65 et 75 % des coûts totaux est souhaité selon une majorité des agriculteurs répondants.

En effet, les clubs agroenvironnementaux devraient aider les agriculteurs désirant implanter un marais dans leurs demandes de subventions auprès du programme Prime-Vert et offrir un suivi tout au long du projet. Pour l'horizon 2013-2018, ce programme offre un montant de subvention maximal allant jusqu'à 50 000 \$ pour l'implantation d'un marais filtrant et d'une bande riveraine végétalisée entourant le marais (MAPAQ, 2013). Une telle subvention couvre 70 % des dépenses admissibles, ce qui correspond au pourcentage de subvention souhaité par les agriculteurs (MAPAQ, 2013). Il est important de noter qu'une subvention de l'ordre de 90 % des coûts peut aussi être demandée auprès du programme Prime-Vert pour « certaines interventions réalisées par des exploitations agricoles qui sont engagées dans une approche collective reconnue par le Ministère » (MAPAQ, 2013). Il est donc important de faire de la promotion auprès des agriculteurs d'une collectivité ou d'une région donnée.

5.2.3 Responsable des projets

Les agriculteurs intéressés par le projet de marais filtrant ont peu de temps à fournir pour son avancement, car ils sont très occupés dans la gestion de leur entreprise durant la saison estivale. Il est donc recommandé d'avoir un responsable de projet dans les clubs agroenvironnementaux qui s'occupera de faire le suivi des études préalables, des travaux d'implantation du marais filtrant et des travaux de maintenance avec les agriculteurs. Il s'occupera de la gestion du budget fourni par les agriculteurs et des montants obtenus par les subventions. Il est également responsable de l'échéancier des travaux. Il s'occupera de la gestion de toutes les parties prenantes, car les agriculteurs ne veulent pas avoir de nouvelles responsabilités. Ce responsable de projet coordonnera tous les travaux nécessaires et la maintenance à effectuer. C'est lui qui mène le projet à partir du début à la fin à partir des spécificités fournies initialement par l'agriculteur. Il est également disponible pour fournir toutes les informations au propriétaire ou pour entendre leurs préoccupations au long du projet. Lorsque le marais est construit, il devient également le responsable du suivi des mesures de la qualité de l'eau à l'entrée et à la sortie du marais. Toutes les données doivent être enregistrées et analysées pour voir s'il y a des problèmes de filtration et pour permettre d'apporter des correctifs.

5.3 Conclusion

Pour conclure la section recommandation, deux tableaux récapitulatifs ont été construits à partir de toutes les recommandations proposées dans ce présent essai. Ils ont pour but de faciliter la compréhension et de rassembler toutes les informations aux mêmes endroits. Il s'agit des tableaux 5.1 et 5.2. Le tableau 5.1 présente les recommandations d'ordre technique et le tableau 5.2 présente les recommandations d'ordre social.

Tableau 5.1 : Résumé des recommandations techniques

Recommandations		Résultats anticipés
Stratégie d'aménagement	Prioriser la 2 ^e stratégie d'aménagement du tableau 3.5 (Aménagement d'un marais filtrant de grande superficie dans le bas d'un bassin versant dans un cours d'eau)	Plus il y a d'exemplaires de marais filtrants, plus il y a de la sensibilisation indirecte. Il y aura aussi une épuration importante de l'eau
Choix du site d'implantation	Effectuer une étude préalable détaillée au niveau hydrologique sur les possibles sites d'implantation du marais filtrant sur un cours d'eau d'ordre 1 passant dans un milieu agricole	Éviter l'assèchement du marais et choisir le site optimal de traitement de l'eau (ex : choix d'un cours d'eau très pollué)
	Planter le marais filtrant en élargissant un cours d'eau si le débit est suffisamment bas, sinon il vaut mieux détourner une partie du cours d'eau vers le marais filtrant avec des tuyaux	Installation plus simple à construire, demandant moins d'effort et de coûts. Traitement plus efficace
	Installer une membrane imperméable à la base du marais filtrant si la vitesse d'infiltration est supérieure à 10 ⁻⁶ m/s dans le sol	Éviter que l'eau du marais ne percole dans les sols
	Sélectionner un site d'implantation pour avoir un temps de résidence de l'eau d'environ 5 jours	Optimiser le traitement des contaminants, particulièrement celui du phosphore
Choix du design de marais à 4 unités	Installer un bassin de sédimentation (1 ^{ère} unité de 4) ovale ou rectangulaire sur une superficie de 25 % de toute la superficie requise par l'ensemble du marais filtrant	Permettre au P particulaire de sédimenter et répartir le courant de l'eau sur toute l'étendue de l'unité
	Installer une unité de marais filtrant de type MEVS suivi d'un MEHS (2 ^e unité de 4) ovale ou rectangulaire sur une superficie de 35 % de toute la superficie requise par l'ensemble du marais filtrant	Permettre au P particulaire de sédimenter, transformation du nitrate en azote atmosphérique et répartir le courant sur toute l'étendue de l'unité
	Installer un fossé d'aération (3 ^e unité de 4) d'une profondeur de 0,15 m sur une superficie de 15 % de toute la superficie requise par l'ensemble du marais filtrant	Permet l'oxygénation de l'eau nécessaire pour la survie de plusieurs organismes dulcicoles
	Installer un étang de polissage (4 ^e unité de 4) d'une profondeur de 0,5 à 1 m sur une superficie de 25 % de toute la superficie requise par l'ensemble du marais filtrant	Permet la filtration pendant l'hiver et dernier traitement avant le rejet de l'eau vers l'environnement
Gestion d'ensemble du marais filtrant	Si le marais traite les eaux usées de laiterie, il est recommandé d'avoir un bassin d'accumulation où l'eau s'accumule durant l'hiver	Favoriser le traitement des eaux usées de ce type durant l'été, car le marais traite plus efficacement les contaminants
	Utilisation d'ouvrages régulant le niveau de l'eau (à la sortie du 2 ^e , du 3 ^e et du 4 ^e bassin)	Stabiliser le niveau de l'eau, évitant donc l'assèchement et permettant un temps de résidence plus grand
	Utilisation d'ouvrages régulant le débit de l'eau (avant le premier bassin)	Éviter que l'eau pénètre dans le marais avec une grande vitesse afin d'éviter la resuspension des sédiments
	Installer 2 unités de marais filtrants en parallèle	Permet de faire des travaux de maintenance sur une unité sans diminuer le traitement épuratoire
	Planter une bande riveraine végétalisée de 3 m de largeur autour de l'ensemble du marais filtrant	Assure la transition entre les écosystèmes aquatiques et terrestres; rétention des sédiments et des contaminants
Modes de gestions appropriées	Choisir des plantes indigènes au milieu et s'adaptant aux conditions des marais filtrants (se référer au tableau 3.4)	Augmenter les chances de colonisation des espèces végétales et création d'un écosystème
	Faire vérifier le choix des plantes par un botaniste	Vérification externe, afin de s'assurer que le choix des plantes permet un traitement optimal
	Transplanter plusieurs espèces de plantes (ex : 2 espèces sur une grande superficie et 3 espèces sélectionnées pour leur critère écologique et leur beauté sur une petite superficie)	Augmenter la biodiversité et les chances de colonisation et de survie des végétaux dans le marais. On augmente aussi la valeur écologique du marais pour les autres espèces.
	Effectuer un dragage des sédiments à tous les 10-20 ans pour les MFI et à tous les 8-10 ans pour les autres types de marais à la fin de l'automne.	Régénérer les sites d'adsorption du phosphore et augmenter la sédimentation du phosphore particulaire
	Lors du dragage, garder une couche de 10 cm de sédiments sur le fond du marais	Maintenir l'intégrité du benthos et des rhizomes des plantes nécessaires à la régénération
	Enlever toutes les plantes aquatiques bi-annuellement dans l'étang de polissage (au milieu et à la fin de l'été)	Améliorer l'efficacité de filtration et garder l'eau oxygénée
	Faire un suivi de la qualité de l'eau à l'entrée et à la sortie du marais	Vérifier s'il y a des problèmes de filtration et proposer des mesures correctives
Nouvelles recherches	Effectuer des recherches sur la concentration d'amendements d'aluminium, de fer et de calcium qui est toxique pour les plantes de marais filtrant	Permet de connaître la quantité d'amendements à ajouter durant la période printanière et estivale
	Déterminer quelle est la proportion de la quantité d'amendements ajoutés qui demeurent dans le marais filtrant lors du dragage	Permet de savoir si l'on contamine les autres cours d'eau en faisant de tels ajouts dans les marais
	Études sur les similarités et les différences entre les marais filtrants artificiels et les marais naturels	Déterminer si les fonctions et la structure sont similaires entre tous les différents types de marais filtrants et les marais naturels

Tableau 5.2 : Résumé des recommandations au niveau social

Recommandations		Résultats anticipés
Sensibilisation	Former les agronomes aux pratiques de marais filtrants (Bénéfices, limites et la construction)	Les agronomes formés pourront sensibiliser les agriculteurs et faire la promotion des marais filtrants
	Agronomes doivent sensibiliser les agriculteurs sur les bénéfices, les limites et sur ce qu'est un marais filtrant	Les agriculteurs développeront de nouvelles connaissances sur les marais filtrants
	Utiliser d'autres moyens de sensibilisation comme les bulletins d'informations, à travers les revues agricoles ou par l'entremise de visite de marais filtrants	Les agriculteurs développeront de nouvelles connaissances sur les marais filtrants
Soutien financier	Privilégier la subvention pour financer les coûts de l'ordre de 65-75 %	Financer les travaux
	Faire remplir des demandes de subvention auprès du Prime-vert pour les agriculteurs par un gestionnaire de projet dans un club agroenvironnemental	Financer les travaux jusqu'à 70 % des travaux
	Privilégier une approche collective auprès des agriculteurs	Financement jusqu'à 90 % des travaux
Gestion de projet	Avoir un seul gestionnaire de projet dans les clubs agroenvironnementaux qui prend en charge toutes les responsabilités liées à l'implantation d'un marais filtrant	Faciliter l'avancement des projets et garder un certain contrôle sur la qualité des travaux

CONCLUSION

Les objectifs de ce présent essai étaient de fournir des recommandations pour favoriser l'implantation de marais filtrants en zone agricole et pour améliorer leur efficacité de filtration dans le but d'améliorer la qualité des eaux sur le territoire agricole du Québec. Les recommandations proposées abondent en ce sens et font suite à la consultation de la littérature scientifique et à la récolte de l'opinion des agriculteurs. Ces recommandations visent particulièrement les clubs agroenvironnementaux. Même si le concept de marais filtrant est peu connu chez les agriculteurs, il y a déjà des intéressés. Pour le moment, il faut absolument identifier ces agriculteurs et leur fournir un soutien quant à la gestion et aux subventions disponibles du programme Prime-Vert pour qu'ils implantent un marais sur leurs terres. Plus il y a de marais implantés, plus les autres agriculteurs en entendront parler de bouche à oreille ou par le contact avec des agronomes. Il est également impératif de proposer plusieurs activités de sensibilisation pour faire connaître ces nouvelles pratiques environnementales pour avoir un meilleur résultat de qualité de l'eau dans les bassins versants à vocation agricole et éviter l'eutrophisation des cours d'eau.

Les recommandations sur l'aspect technique font état d'un système hybride de marais filtrant composé d'un MEVS suivi d'un MEHS. Ce marais doit être accompagné d'un bassin de sédimentation, d'un fossé d'oxygénation et d'un étang de polissage. Dans la littérature, ces structures ont été construites par Braskerud et montrent une efficacité remarquable dans les climats nordiques. Ils arrivent à retenir le phosphore comme aucun autre type de marais filtrant trouvé dans la littérature. Il y a également quelques modes de gestion qui sont proposés pour maintenir les structures efficaces sur une plus longue durée, notamment le dragage des sédiments et le remplacement du substrat des MEVS et MEHS. Il est aussi important de continuer le suivi après l'installation et de surveiller si le marais demeure efficace. La prise de données régulière des concentrations de phosphore, de nitrates et de pesticides permet de déterminer à quel moment les travaux de dragage doivent avoir lieu. Ces données permettent également de comparer l'efficacité des différents marais dans une perspective d'amélioration continue des designs.

Aujourd'hui, les marais filtrants semblent une évidence pour l'amélioration de la qualité de l'eau en milieu agricole, mais il existe aussi d'autres moyens peu publicisés. En effet, depuis peu de temps, une nouvelle entreprise a vu le jour et a mis sur le marché des îles flottantes comme moyen d'éviter

l'eutrophisation. Ces îles ont pour effet de créer un milieu naturel similaire aux marais filtrants au cœur des lacs. Seul bémol, les études montrant leur efficacité ont été réalisées par l'entreprise qui commercialise le produit. De futures recherches indépendantes afin de valider ces résultats d'études seraient les bienvenues avant de se pencher sur ce dossier.

RÉFÉRENCES

- Aber, J.D. et Melillo, J.M. (2001). *Terrestrial Ecosystems*. Second edition, San Diego, Academic Press, 556 p.
- Agence Science Presse (2007). Le maïs OGM menace l'écosystème. *In* Agence Science Presse. *Actualités*. <http://www.sciencepresse.qc.ca/actualite/2007/11/14/ogm-menace-ecosysteme> (page consultée le 27 septembre 2013).
- Agrobio Conseil (s.d.). *Assainissement Autonome : La solution du Marais Artificiel*. Rennes, Agrobio Conseil, 33 p.
- Agudelo, C.R.M., Jaramillo, M.L. et Penuela, G. (2012). Comparison of the removal of chlorpyrifos and dissolved organic carbon in horizontal sub-surface and surface flow wetlands. *Science of The Total Environment*, Vol.431, p.271-277.
- Ann, Y., Reddy, K.R. et Delfino, J.J. (2000). Influence of chemical amendments on phosphorus immobilization in soils from a constructed wetland. *Ecological Engineering*, Vol. 14, p.157-167.
- Atlantic Committee on Land and Engineering (2005). *Constructed Wetlands for the Treatment of Agricultural Wastewater in Atlantic Canada*. Provinces Maritimes du Canada, Atlantic Committee on Land and Engineering, 6 p.
- Bradley, R. (2010). Écologie des sols. Communication orale. *Cours : Les sols*, Novembre, 2010, Université de Sherbrooke.
- Braskerud, B.C. (2002). Factors affecting Phosphorus Retention in small Constructed Wetlands treating Agricultural Non-point source Pollution. *Ecological Engineering*, Vol. 19, p.42-61.
- Braskerud, B.C. (2004). Wetlands, water quality and agriculture Retention of soil particles and phosphorus in small constructed wetlands in agricultural watersheds. *In* Dunne, E.J., Reddy, K.R. et Carton, O.T. (red). *Nutrient management in agricultural watersheds : a wetland solution*. Wageningen, The Netherlands : Wageningen Academic Publishers, p.121-131.
- Braskerud, B.C. et Haarstad, K. (2003). Screening and Retention of thirteen Pesticides in a small Constructed Wetland. *Water Science and Technology*, vol. 48, n^o5, p.267-274.
- Brix, H. (1994). Functions of Macrophytes in Constructed Wetlands. *Water Science and Technology*, vol. 29, n^o4, p.71-78.
- Campbell, D.A., Cole, C.A. et Brooks, R.P. (2002). A Comparison of Created and Natural Wetlands in Pennsylvania, USA. *Wetlands Ecology and Management*, Vol. 10, p.41-49.
- Campbell, N.A. et Reece, J.B. (2004). *Biologie*. 2e édition, Canada, Éditions du Renouveau Pédagogique Inc. 1364 p.

- Carroll, P., Keohane, J., Harrington, R. et Ryder, C. (2004). Water treatment performance and environmental impact of integrated constructed wetlands in the Anne valley watershed, Ireland. *In* Dunne, E.J., Reddy, K.R. et Carton, O.T. (red). Nutrient management in agricultural watersheds : a wetland solution. Wageningen, The Netherlands : Wageningen Academic Publishers, p.207-218.
- Central Park Paving Ltd (2012). Expert Excavation in the Durham Region. *In* Central Park Paving Ltd. *Excavation*. <http://www.centralparkpaving.com/excavation.html> (page consultée le 17 septembre 2013).
- Chez Alice (s.d.). Le sol .*In* Chez Alice. *Les effets du ruissellement*. (Page consultée le 27 Septembre 2013).
- Crum, S.J.H. et Brock, T.C.M. (1994). Fate of Chlorpyrifos in Indoor Microcosms and Outdoor Experimental Ditches. *In* *Freshwater fields tests for hazard assessment of chemicals*, CRC Press, p.315-322.
- DeBusk, T.A. (s.d.). The Hybrid Wetland Technology. *In* University of Central Florida. *Chemical treatments*. http://www.stormwater.ucf.edu/chemicaltreatment/documents/DeBusk_HWTT1_FINAL.pdf (page consultée le 23 Septembre 2013).
- DeBusk, T.A., Dierberg, F.E. et Grace, K.A. (2004). Treatment wetlands for removing phosphorus from agricultural drainage waters. *In* Dunne, E.J., Reddy, K.R. et Carton, O.T. (red). Nutrient management in agricultural watersheds : a wetland solution. Wageningen, The Netherlands : Wageningen Academic Publishers, p.167-178.
- Dong, H., Qiang, Z., Li, T., Jin, H. et Chen, W. (2011). Effect of artificial aeration on the performance of vertical-flow constructed wetland treating heavily polluted river water. *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 24, n°4, p.596-601.
- Dunne, E.J. et Reddy, K.R. (2004). Phosphorus Biogeochemistry of Wetlands in Agricultural Watersheds. *In* Dunne, E.J., Reddy, K.R. et Carton, O.T. (red). Nutrient management in agricultural watersheds : a wetland solution. Wageningen, The Netherlands : Wageningen Academic Publishers, p.105-120.
- Dunne, E.J., Reddy, K.R. et Carton, O.T. (2004). *Nutrient management in agricultural watersheds : a wetland solution*. Wageningen, The Netherlands : Wageningen Academic Publishers, 284 p.
- Festa-Bianchet, M. (2007). Les cycles biogéochimiques. Communication orale. *Cours : Écologie générale*. Octobre 2007, Université de Sherbrooke.
- Fink, D.F. et Mitsch, W.J. (2004). Seasonal and storm event nutrient removal by a created wetland in an agricultural watershed. *Ecological Engineering*, Vol. 23, p.313-325.
- Gagnon, E., et G. Gangbazo (2007). Efficacité des bandes riveraines : analyse de la documentation scientifique et perspectives. Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs, Direction des politiques de l'eau, 17 p.

- Gagnon, V. et Brisson, J. (s.d.). Les marais filtrants artificiels pour le traitement des polluants de source agricole. *In* Agri-reseau. horticulture-pepinierie.
http://www.agrireseau.qc.ca/horticulture-pepinierie/documents/vincentgagnon_jacquesbrissonirbv.pdf (Page consultée le 21 Septembre 2013).
- Gagnon, V., Brisson, J. et les membres du CA de SQP (2013). *Les Marais filtrants (Eaux usées)*. Montréal, Société québécoise de Phytotechnologie, 12 p.
- Garon-Boucher, C. (1998). Rétention des produits phytosanitaires par les végétaux des fossés: mises au point analytiques et expérimentations de terrain. Université Lyon, 43 p.
- Gruyer, N. (2012). *Traitements Biologiques des Effluents de Serre par des Marais Filtrants Artificiels et des Bioréacteurs Passifs*. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec, Québec, 243 p.
- Harrington, R., Dunne, E.J., Carroll, P., Keohane, J. et Ryder, C. (2004). The concept, design and performance of integrated Chapter 6 constructed wetlands for the treatment of farmyard dirty water. *In* Dunne, E.J., Reddy, K.R. et Carton, O.T. (red). Nutrient management in agricultural watersheds : a wetland solution. Wageningen, The Netherlands : Wageningen Academic Publishers, p.179-188.
- Hefting, M.M., Van den Heuvel, R.N. et Verhoeven, J.T.A. (2013). Wetlands in Agricultural Landscapes for Nitrogen Attenuation and Biodiversity Enhancement : Opportunities and Limitations. *Ecological Engineering*, vol. 56, p.5-13.
- Hijri, M. (2012). Phosphate, the Unknown Crisis in Agriculture. *In* Youtube. Phosphate: the unknown crisis in agriculture: Mohamed Hijri at TEDxUdeM.
<http://www.youtube.com/watch?v=gL-iLzh0SqI> (page consultée le 5 Octobre 2013)
- Ireland. *Department of the environment, heritage and local government* (2010). *Integrated Constructed Wetlands*. Ireland. *Department of the environment, heritage and local government*, 124 p.
- Jacobson, M.A. (1994). *Prairie Wetland Restoration and Water Quality Concerns*. Thèse de Maîtrise, Université du Minnesota, USA, 101 p.
- Kadlec, R.H. et Knight, R.L. (1996). *Treatment Wetlands*. Boca Raton, Florida, GRC Press/Lewis Publishers, 893 p.
- Kalff, J. (2002). *Limnology*. Upper Saddle River (USA), Prentice-Hall, Inc. 592 p.
- Keohane, J., Carroll, P., Harrington, R. et Ryder, C. (2004). Integrated constructed wetlands for farmyard dirty water treatment: a site suitability assessment. *In* Dunne, E.J., Reddy, K.R. et Carton, O.T. (red). Nutrient management in agricultural watersheds : a wetland solution. Wageningen, The Netherlands : Wageningen Academic Publishers, p.196-206.

- Kroeger, A.C., Madramootoo, C.A., Enright, P., Laflamme, C., Francoeur-Leblond, N. et D'Auteuil, C. (2009). Les Marais Filtrants : une solution pour Restaurer les Cours d'Eau Agricoles. *Agrosolutions*, Vol. 20, n^o 1, p.5-14.
- Kuschik, P., Wiebner, A., Kappelmeyer, U., Weibbrodt, E., Kästner, M. et Stottmeister, U. (2003). Annual cycle of nitrogen removal by a pilot-scale subsurface horizontal flow in a constructed wetland under moderate climate. *Water Research*, Vol.37, n^o 17, p.4236-4242.
- La Coop (2006). Marais filtrant et compostage font bon ménage. In La coop. *Environnement*. <http://www.lacoop.coop/cooperateur/articles/2007/10/p88.asp> (page visité le 15 novembre 2013).
- Leroux, C. (2009). Les cours d'eau. Communication orale. *Cours : Écologie aquatique*, Juin 2009, Université de Sherbrooke.
- Les calories.com (2013). Maïs. In Les calories.com. *Les valeurs nutritives*. <http://www.les-calories.com/calorie-635-mais.html> (page consultée le 27 Septembre 2013).
- Malouin, F. (2007). Les bactéries. Communication orale. *Cours : Microbiologie*, Septembre, 2007, Université de Sherbrooke.
- Maltais-Landry, G., Charenc, F., Comeau, Y., Troesch, S. et Brisson, J. (2007). Effects of Artificial Aeration, Macrophyte Species and Loading Rate on Removal Efficiency in Constructed Wetland Mesocosms Treating Fish Farms Wastewater. *Journal of Environmental Engineering Sciences*, vol. 6, p.409-414.
- Maltais-Landry, G., Maranger, R., Brisson, J. et Chazarenc, F. (2009). Nitrogen Transformations and Retention in Planted and Artificially Aerated Constructed Wetlands. *Water Research*, vol 43, p.535-545.
- Margoum, C., Gouy, V., Williams, R. et Smith, J. (2001). Le role des Fossés Agricoles dans la Dissipation des Produits Phytosanitaires. *Ingénieries Phytosanitaires*, n^o spécial, p.55-65.
- Mitsch, W.J., Gosselink, J.G., 2000. *Wetlands*, 3rd ed. John Wiley and Sons, New York.
- Minnesota. Department of Agriculture (2013). *Constructed Wetlands*. In Minnesota. Department of Agriculture, 1 p.
- Nidermeier, A., Robinson, J.S. et Reid, D. (2004). Wetland restoration within agricultural watersheds: balancing water quality protection with habitat conservation. In Dunne, E.J., Reddy, K.R. et Carton, O.T. (red). *Nutrient management in agricultural watersheds : a wetland solution*. Wageningen, The Netherlands : Wageningen Academic Publishers, p.55-70.
- Office québécois de la langue française(OQLF). (2012). Marais In Gouvernement du Québec. *Fiche terminologique*. http://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/ficheOqlf.aspx?Id_Fiche=1299590 (Page consultée le 27 Septembre 2013).

- Ontario, Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation (OMAFRA) (2013). Les mesures de la teneur en aluminium du sol laissent les producteurs perplexes. *In crops Horticulture*. <http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/hort/news/tenderfr/tf1206a3.htm> (Page visitée le 20 Novembre 2013).
- Passeport, E., Tounebize, J., Chaumont, C., Guenne, A. et Coquet, Y. (2013). Pesticide contamination interception strategy and removal efficiency in forest buffer and artificial wetland in a tile-drained agricultural. *Chemosphere*, Vol. 91, p.1289-1296.
- Pionke, H.B., Gburek, W.J., Schnabel, R.R., Sharpley, A.N. et Elwinger, G.F. (1999). Seasonal flow, nutrient concentrations and loading patterns in stream flow draining an agricultural hill-land watershed. *Journal of Hydrology*, Vol. 220, n°1-2, p.62-73.
- Poe, A.C., Piehler, M.F., Thompson, S.P. et Paerl, H.W. (2003). Denitrification in a Constructed Wetland Receiving Agricultural runoff. *Wetlands*, Vol. 23, n°4, p.817-826.
- Price, J.S. et Waddington, J.M. (2000). Advances in Canadian wetland hydrology and biogeochemistry. *Hydrological Processes*, Vol. 14, n°9, p.1579-1589.
- Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (2012). *Hydrologie à l'échelle des parcelles agricoles en Montérégie*. Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 31 p.
- Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (2013). *Prime-Vert*. Québec, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, 24 p.
- Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (2001). *Marais artificiels*. Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, 36 p.
- Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (2002a). L'eau au Québec, une ressource à protéger. *In Eau. International*. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/inter.htm> (page visitée le 17 Octobre 2013)
- Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (2002b). La gestion intégrée de l'eau par bassin versant. *In Eau. Bassin versant*. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/index.htm> (page visitée le 17 Octobre 2013)
- Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (2002c). Foire aux questions : Le Règlement sur les exploitations agricoles (REA). In Pour tout voir. Milieu agricole. http://www.mddep.gouv.qc.ca/milieu_agri/voir.htm (page visitée le 17 octobre 2013).
- Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (2004). *Étude sur la qualité de l'eau potable dans sept bassins versants en surplus de fumier et impacts potentiels sur la santé*. Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, 24 p.

- Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (2005). *Capacité de support des activités agricoles par les rivières : le cas du phosphore total*. Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, 28 p.
- Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (2010a). *Portrait de la qualité des eaux de surface au Québec 1999-2008*. Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, 70 p.
- Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (2010b). *Tendance de la qualité de l'eau de 1999 à 2008 dans dix bassins versants agricoles au Québec*. Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, 32 p.
- Québec. Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (2013). *Tendance de la qualité de l'eau de 1999 à 2008 dans dix bassins versants agricoles au Québec*. Québec, Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs, 38 p.
- Reddy, G.B., Maldida, P.C. et Shirley, V. (2004). Treatment of Atrazine in Wetland Macrocosms. In Reddy, G.B., Maldida, P.C. et Shirley, V. International Symposium on "Nutrient Management in Agricultural Watersheds: A Wetlands Solution" (P.21). Wexford, Ireland, 24-26 mai 2004.
- Reddy, K.R. et Kadlec, R.H. (2001). Temperature Effects in Treatment Wetlands. *Water Environment Research*, Vol. 73, n^o5, p.543-557.
- Reddy, K.R., Kadlec, R.H., Flaig, E. et Gale, P.M. (1999). Phosphorus Retention in Streams and Wetlands: A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, Vol.29, p.83-146.
- Reinhardt, M., Gächter, R., Wehrli, B. et Müller, B. (2005). Phosphorus Retention in Small Constructed Wetlands Treating Agricultural Drainage Water. *Journal of Environmental Quality*, Vol. 34, n^o4, p.1251-1259.
- Richardson, C.J. et Marshall, P.E. (1986). Processes Controlling Movement, Storage, and Export of Phosphorus in a Fen Peatland. *Ecological Monographs*, Vol. 56, p.279-302.
- Ryder, C., Keohane, J., Carroll, P. et Harrington, R.. (2004). Integrated constructed wetlands: regulatory policy and practical experience in an Irish planning context. In Dunne, E.J., Reddy, K.R. et Carton, O.T. (red). Nutrient management in agricultural watersheds : a wetland solution. Wageningen, The Netherlands : Wageningen Academic Publishers, p.189-195.
- Seo, D.C., Hwang, S.H., Cho, J.S., DeLaune, R.D., Jugsujinda, S., Lee, S.T., Seo, J.Y. et Heo, J.S. (2008). Evaluation of 2- and 3-stage combinations of vertical and horizontal flow constructed wetlands for treating greenhouse wastewater. *Ecological Engineering*, Vol.32, n^o1, p.121-132.

- Shiple, J.W. (2010). La méta-analyse. Communication orale. *Cours : Projets d'intégration en écologie*, Septembre 2010. Université de Sherbrooke.
- Simard, A. (2004). Portrait global de la qualité de l'eau des principales rivières du Québec. In Site du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP). www.mddep.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/global-2004/ (page consultée le 23 septembre 2013).
- Skyrock (2009). Épendage d'engrais. In Skyrock. *Agriculteur 2*. <http://agriculteur-02.skyrock.com/2386884365-Epandage-d-engrais-2009.html> (page consultée le 27 Septembre 2013).
- Stottmeister, U., Wiebner, A., Kusch, P., Kappelmeyer, U., Kästner, M., Bederski, O., Müller, R.A. et Moormann, H. (2003). Effects of plants and microorganisms in constructed wetlands for wastewater treatment. *Biotechnology Advances*, Vol.22, p.93-117.
- Tanner, C.C. et Kloosterman, V.C. (1997). Guidelines for Constructed Wetland Treatment of Farm Dairy Wastewaters in New Zealand. *NIWA Science and Technology Series*, Vol.48, p.1-68.
- USDA et USEPA (s.d.). General Considerations. In Davis, L. (réd.), *A Handbook of Constructed Wetlands*. Pennsylvania.
- Van Der Heyden (2008). Étude de faisabilité visant l'aménagement intégré de bassins de stockage, de bassins de sédimentation, de marais filtrants, de zones de débordement et de digues afin de constituer des réserves d'eau destinées à l'irrigation et de réduire les impacts agricole et environnemental des débordements des ruisseaux Norton, Cranberry, Gibeault Delisle et de la rivière L'Acadie. Montérégie, Phytodata inc., 146 p.
- Vymazal, J. (2004). Constructed Wetlands for Wastewater treatment in Europe. In Dunne, E.J., Reddy, K.R. et Carton, O.T. (red). *Nutrient management in agricultural watersheds : a wetland solution*. Wageningen, The Netherlands : Wageningen Academic Publishers, p.230-244.
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, Vol. 230, n°2007, p.48-65.
- Vymazal, J. (2009). The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of wastewater. *Ecological Engineering*, vol. 35, n°1, p.1-8.
- Wallace, S., Parkin, G. et Cross, C. (2001). Cold Climate Wetlands : Design & Performance. In Wallace, S., Parkin, G. et Cross, C., 7th International Conference on Wetland systems for Water Pollution Control (p.1-14). Lake Buena Vista, Florida, USA, 11-16 Novembre 2000.
- Werker, A.G., Dougherty, J.M., McHenry, J.L. et Van Loon, W.A. (2002). Treatment variability for Wetland Wastewater Treatment design in Cold Climates. *Ecological Engineering*, Vol.19, p.1-11.
- Williams, R.J., White, C., Dreymann, S., Gouy, V., Garon-Boucher, C. et Souillier, C. (1999). Fate and Behaviour of Pesticides in Farm Ditches. Weeds, The 1999 Conference, p.675-680.

Zwiers, F.W., Alexander, L.V., Hegerl, G.C., Knutson, T.R., Kossin, J.P., Naveau, P., Nicholls, N., Schär, C., Seneviratne, S.I. et Zhang, X. (2013). *Climate Extremes: Challenges in Estimating and Understanding Recent Changes in the Frequency and Intensity of Extreme Climate and Weather Events*. Springer Science+Business Media Dordrecht, p.339-389.

BIBLIOGRAPHIE

- Forbes, E.G.A., Foy, R.H., Mulholland, M.V. et Brettell, J.L. (2011). Performance of a Constructed Wetland for Treating Farm-yard Dirty Water. *Water Science and Technology*, Vol. 64, p.22-28.
- Lin, Y.F., Jing, S.R., Wang, T.W. et Lee, D.Y. (2002). Effects of Macrophytes and External Carbon Sources on Nitrate Removal from Groundwater in Constructed Wetlands. *Environmental Pollution*, Vol. 119, n^o3, p.413-420.
- Vymazal, J. (2005). *Natural and Constructed Wetlands Nutrients, Metals and Management*. Leiden, Backhuys Publishers, 417 p.

ANNEXE 1- Questionnaire présenté aux agriculteurs

Introduction

Le présent questionnaire a été rédigé pour récolter des informations nécessaires à la rédaction d'un essai académique pour l'obtention du grade de maître en environnement à l'université de Sherbrooke. Le but de ce projet est de proposer une nouvelle façon de protéger les cours d'eau et les lacs contre la contamination d'origine agricole (Phosphore, nitrates et pesticides). Pour se faire, il est nécessaire de récolter les opinions des agriculteurs, aussi complètes que possible, au sujet des marais filtrants via ce questionnaire.

Ce questionnaire comporte 2 sections : la première section définit le marais filtrant et la deuxième section est le questionnaire en soi. Il est nécessaire de lire la première section avant de passer à la deuxième section. Cette dernière section comporte 13 questions (la plupart à choix de réponse) et le temps de réponse est d'une durée de moins de 15 minutes. Il est important de répondre aux questions selon vos opinions et vos valeurs. Les réponses fournies au questionnaire demeureront confidentielles.

Section 1 : Définition de marais filtrant

Un marais filtrant est un marais artificiel, utilisé comme technique d'épuration des eaux en utilisant les plantes et les microorganismes qui leur sont associés. Ils sont constitués d'une série de plusieurs bassins de différentes tailles creusés dans le sol qui retiennent l'eau pendant une période de temps prolongée. L'eau doit demeurer un certain temps dans les bassins pour le traitement. On plante différentes espèces végétales dans les bassins. Les plantes vont utiliser le phosphore et les nitrates rejetés dans le marais pour pousser. Quand l'eau est rejetée à la sortie du marais, il ne reste presque plus de phosphore ou de nitrates; elle est purifiée.

Rôles des marais filtrants :

-Les marais filtrants retiennent le phosphore, le nitrate et les pesticides, donc ils ne sont pas rejetés dans les cours d'eau. Ils sont très efficaces pour purifier les eaux drainant le territoire agricole. Il y a moins de pollution des cours d'eau et moins de prolifération de cyanobactéries (algues bleues) d'algues et de plantes aquatiques dans les lacs et les cours d'eau d'un même bassin versant.

-Les marais sont également un moyen de réguler le drainage et la rétention de l'eau dans les fossés ou les cours d'eau agricoles. Durant la crue du printemps, il s'agit d'une mesure de protection contre les inondations, car ils recueillent un grand volume d'eau, favorisant la reprise des travaux en champs plus rapidement.

- Les marais filtrants sont des infrastructures de traitement des eaux à faible coût d'installation et d'exploitation qui ne nécessitent aucun produit chimique et peu ou pas d'énergie pour leur fonctionnement.

-Les marais sont des habitats de préférence pour de nombreux mammifères, amphibiens, reptiles, oiseaux et les plantes de milieux humides, favorisant l'établissement d'une biodiversité. Une meilleure biodiversité est favorable au contrôle des espèces envahissantes ou nuisibles pour l'agriculture. Une meilleure diversité permet également d'augmenter la productivité agricole. En purifiant les eaux, les marais filtrants permettent l'établissement d'espèces de poissons de valeur économique dans les cours d'eau et les lacs environnants

Section 2 : Questionnaire

Cette section est la plus importante, car c'est en fonction de vos réponses que je formulerai mes recommandations. Ces questions ont pour but de connaître vos opinions face à l'implantation des marais filtrants, mais aussi face aux autres mesures de protection de l'environnement. Alors, répondez en fonction de votre niveau de connaissances et selon vos convictions propres.

- 1) Dans quelle catégorie d'âge vous situez-vous ?
 - a) 0-25 ans
 - b) 26-35 ans
 - c) 36-45 ans
 - d) 46-55 ans
 - e) 56 ans et plus

- 2) Depuis combien de temps travaillez-vous dans le domaine de l'agriculture ?
 - a) 0-10 ans
 - b) 11-20 ans
 - c) 21-30ans
 - d) 31-40 ans
 - e) 41 ans et plus

- 3) Quels types de culture produisez-vous et quelles sont leur superficie respective approximative en 2013? (Ex : Maïs = 30hectares, soya = 20 hectares, etc.)

- 4) Quel type d'élevage avez-vous et combien d'unités animales possédez-vous? (Ex : 100 vaches, 50 moutons, etc.)

- 5) Quels sont les problèmes environnementaux qui vous préoccupent sur votre entreprise?
Souligner une ou plusieurs réponses parmi les choix suivants :
 - a) Pollution de l'atmosphère et rejet de gaz à effet de serre
 - b) Pollution diffuse des cours d'eau par la fertilisation
 - c) Pollution diffuse des cours d'eau par les pesticides
 - d) Dégradation du sol (compaction, érosion, travail du sol, lessivage, santé des sols)

- e) Changement de la biodiversité qui pourrait nuire à la productivité de l'entreprise (ex : diminution des abeilles suite à l'application de pesticide
 - f) Aucun problème
- 6) Mettez-vous en œuvre des mesures de protection de l'environnement? Si oui, lesquelles?
Mesures de protection de l'environnement mises en pratique:
- a) Bande riveraine des cours d'eau végétalisées sur une largeur de 3 mètres ou plus (arbres, arbustes et herbacées)
 - b) Tranchées drainantes
 - c) Réduction de l'utilisation de pesticides
 - d) Agriculture biologique
 - e) Rotation des cultures
 - f) Utilisation d'engrais vert
 - g) Détenir des plans de fertilisations et les améliorer
 - h) Réduction du travail du sol
 - i) Couverture de 30 % et plus de résidus
 - j) Semis-direct
 - k) Culture de couverture du sol
 - l) Économie d'énergie
 - m) Autres : _____
- 7) Avez-vous eu accès à de l'information sur les marais filtrants?
- a) Si oui, quelle est la source d'information?
 - b) Sinon quelles sources d'information consultez-vous régulièrement qui pourraient faire mention des marais filtrants?
 - b1) Bulletin d'information
 - b2) Conseils d'agronomes
 - b3) Visite de marais filtrants existants
 - b4) Autres agriculteurs
 - b5) Site internet des clubs agroenvironnementaux
 - b6) Autres : _____

- 8) Suite à la lecture de la section 1 qui détaille les rôles des marais filtrants, seriez-vous prêt à installer un marais filtrant sur vos terres?
- Oui
 - Peut-être
 - Ne sais pas
 - Non
- 9) Quel incitatif vous convaincrat le plus d'installer un marais filtrant?
- Si vous bénéficiez de soutien financier comme incitatif
 - Si vous ne disposez d'aucunes responsabilités pour la construction et la maintenance
 - Si vous bénéficiez de soutien financier et vous ne disposez d'aucunes responsabilités pour la construction et la maintenance
 - Aucun incitatif
 - Autres incitatifs : _____
 - Si vous avez répondu a ou c à la question précédente (bénéficiaire de soutien financier), quel soutien financier préférez-vous?
 - Subventions pour la construction du marais filtrant
 - Achats des terres nécessaires pour le marais au prix du marché
 - Compensation annuelle en fonction de la superficie occupée par le marais.
 - Autres : _____
- 10) Quel est le niveau de compensation financière qui serait le plus juste selon vous? Justifiez votre choix.
- 11) Avec qui aimeriez-vous travailler pour installer un marais filtrant sur vos terres? Justifier votre choix.
- Agence gouvernementale du Ministère du Développement durable de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP)
 - Club agroenvironnemental
 - Organisme de bassin versant
 - Entreprise privée en aménagement de marais filtrant
 - Vous-mêmes
 - Autres : _____

12) Selon vous, quelle superficie seriez-vous prêts à concéder pour un marais filtrant?

- | | |
|-------------------------------|------------------------------|
| a) 0 m ² | 0 hectare |
| b) 0-250m ² | 0 hectare – 0,025 hectare |
| c) 250-500m ² | 0,025 hectare - 0,05 hectare |
| d) 500-1000m ² | 0,05 hectare – 0,1 hectare |
| e) 1000-1500m ² | 0,1 hectare – 0,15 hectare |
| f) 1500m ² et plus | 0,15 hectare et plus |

13) Sur une échelle de 1 à 10 où 10 est le plus important et 1 est le moins important, quel degré d'importance attribuez-vous aux critères suivants pour le choix d'un marais filtrant:

- a) Beauté du marais filtrant ?
- b) Efficacité de filtration ?
- c) Coûts du marais filtrant (incluant les coûts d'installation et de maintenance) ?
- d) Superficie du marais filtrant ?
- e) Temps nécessaire pour la construction ?
- f) Temps nécessaire pour la maintenance ?
- g) Augmentation de la biodiversité ?
- h) Niveau de compensation financière ?

Je tiens à vous remercier d'avoir pris le temps de répondre à ces questions. Les réponses à ce questionnaire me permettront de tenir compte de l'opinion des agriculteurs face à la mise en œuvre des marais filtrants.