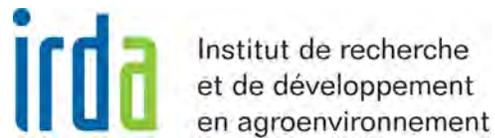


**Étude environnementale des enclos
d'hivernage de vaches-veaux :
analyses complémentaires**

Rapport final

Rapport présenté au :
Ministère du Développement durable,
de l'Environnement et des Parcs du Québec



Projet IRDA # : 100002

Révision # : 00

Par :

Frédéric Pelletier, ing., M.Sc.
Stéphane Godbout, ing., P. Eng., Ph.D. et agr.
Roch Joncas, ing., M.Sc. et agr.

23 mai 2008

L'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) est une corporation de recherche à but non lucratif, constituée en mars 1998 par quatre membres fondateurs soit le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), l'Union des producteurs agricoles (UPA), le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) et le ministère du Développement économique, de l'Innovation et de l'Exportation (MDEIE).



Notre mission

L'IRDA a pour mission de réaliser des activités d'acquisition de connaissances, de recherche, de développement et de transfert visant à favoriser le développement durable de l'agriculture.

Pour en savoir plus

www.irda.qc.ca

Le rapport peut être cité comme suit :

Pelletier, F., S. Godbout et R. Joncas. 2008. Étude environnementale des enclos d'hivernage de vaches-veaux : analyses complémentaires. Rapport final. Révision # 00. IRDA. 69 pages.

**Étude environnementale des enclos
d'hivernage de vaches-veaux :
analyses complémentaires**

Rapport final

Présenté au :

Ministère du Développement durable,
de l'Environnement et des Parcs du Québec
Direction des politiques en milieu terrestre
Édifice Marie-Guyart, 9^e étage, boîte 71
675 boulevard René-Lévesque Est
Québec (Québec) G1R 5V7

Préparé par :

Copie originale signée

Copie originale signée

Frédéric Pelletier, ing., M.Sc.

IRDA

Stéphane Godbout, ing., P. Eng.,
Ph.D. et agr.

IRDA

Copie originale signée

Roch Joncas, ing., M.Sc. et agr.

IRDA

23 mai 2008

Les lecteurs qui souhaitent commenter ce rapport peuvent s'adresser à :

Frédéric Pelletier
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)
2700, rue Einstein, D.1.110
Québec (Québec) G1P 3W8

Téléphone : (418) 528-9477
Télécopieur : (418) 644-6855
e-mail : frederic.pelletier@irda.qc.ca

Remerciements :

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec.

Résumé

Le présent rapport présente une analyse approfondie des résultats obtenus dans le rapport final du projet intitulé « Étude environnementale des enclos d'hivernage de vaches-veaux » déposé à la FPBQ en décembre 2004 (Pelletier et al., 2004).

La réalisation de la revue de littérature a permis de constater qu'il n'y avait aucune publication scientifique portant sur les impacts environnementaux des enclos d'hivernage d'élevage de vaches-veaux. La majorité de l'information trouvée portait sur les enclos de bovins de boucherie. Il est tout de même important de noter que dans ce cas, le concept d'enclos d'hivernage et de bandes végétatives filtrantes développé pour les élevages de bovins de boucherie est utilisé pour les élevages de vaches-veaux. La consultation de la littérature scientifique et des différents guides et feuillets techniques a permis de constater que le concept de bandes végétatives filtrantes est une pratique généralement bien acceptée et utilisée même si un risque environnemental y est associé. Le principe du « rejet zéro » en aval des bandes végétatives filtrantes n'est pratiquement jamais obtenu.

L'analyse des résultats a permis de constater que, pour les enclos d'hivernage et les bandes végétatives filtrantes, plus de 70 % du volume annuel d'eau de ruissellement s'écoulait durant les mois de mars, avril et mai avec plus de 80 % des charges annuelles d'éléments fertilisants analysés (N-NH₄, N-NO₃, N_{total} et P). Les bandes végétatives filtrantes ont permis de capter entre 70 et 90 % des éléments fertilisants analysés sortant des enclos d'hivernage.

L'analyse des résultats démontre que les aménagements d'enclos d'hivernage et de bandes végétatives filtrantes, dans la configuration utilisée dans le projet, peuvent avoir un impact sur l'environnement. Des concentrations élevées en éléments fertilisants ont été observées dans les sols et dans les eaux de ruissellement et de percolation. Des précautions devraient être prises pour éviter de telles situations.

Suites aux résultats obtenus, les principales recommandations portent sur la conception des enclos d'hivernage en vue de permettre le captage à la source des éléments fertilisants et la conception des bandes végétatives filtrantes pour en améliorer l'efficacité et tenter de s'approcher du principe de « rejet zéro ».

Table des matières

Résumé.....	v
Table des matières.....	vi
Liste des tableaux.....	viii
Liste des figures.....	x
1 Introduction.....	1
2 But et objectifs du projet.....	2
2.1 But du projet.....	2
2.2 Objectifs du projet.....	2
3 Revue de littérature.....	3
3.1 Introduction.....	3
3.2 Le concept d’enclos d’hivernage et de bandes végétatives filtrantes.....	4
3.2.1 Guides et feuillets techniques.....	4
3.2.2 Articles scientifiques.....	5
3.3 Enclos d’hivernage.....	5
3.4 Bandes végétatives filtrantes.....	9
3.5 Points à retenir de la revue de littérature.....	15
4 Matériel et méthodes.....	16
4.1 Durée du projet.....	16
4.2 Description du site.....	16
4.2.1 Enclos d’hivernage.....	16
4.2.2 Bandes végétatives filtrantes.....	17
4.3 Animaux.....	18
4.4 Échantillonnage et analyse des eaux.....	18
4.4.1 Échantillonnage des eaux de ruissellement.....	18
4.4.2 Échantillonnage des eaux de percolation.....	19
4.4.3 Analyse des eaux.....	19
4.5 Échantillonnage des sols.....	19
4.6 Méthodes d’analyse des résultats.....	21
4.6.1 Analyse statistique.....	21
4.6.2 Températures et précipitations.....	21
4.6.3 Éléments fertilisants dans les eaux.....	21
4.6.4 Éléments fertilisants dans les sols.....	22
4.6.5 Coliformes fécaux dans les eaux.....	22
4.6.6 Bilan des pertes.....	22

5	Résultats et discussion.....	24
5.1	Conditions climatiques.....	24
5.2	Précipitations et ruissellement.....	26
5.3	Éléments fertilisants dans les eaux.....	29
5.3.1	Eaux de ruissellement.....	29
5.3.2	Eaux de percolation.....	37
5.4	Éléments fertilisants dans les sols.....	43
5.4.1	Concentrations moyennes dans les enclos et les bandes végétatives filtrantes.....	43
5.4.2	Enclos d'hivernage 1 et 2.....	43
5.4.3	Enclos d'hivernage 3.....	44
5.4.4	Bandes végétatives filtrantes.....	44
5.4.5	Comparaison avec les échantillonnages réalisés à l'automne 2007.....	45
5.5	Coliformes fécaux dans les eaux de ruissellement et de percolation des enclos d'hivernage et des bandes végétatives filtrantes.....	55
5.6	Bilan des pertes.....	57
5.6.1	Bilan estimé d'azote et de phosphore dans les enclos d'hivernage.....	57
5.6.2	Bilan estimé d'azote et de phosphore dans les bandes végétatives filtrantes.....	59
6	Discussion et limites des résultats obtenus.....	60
7	Conclusion.....	62
8	Recommandations.....	63
9	Références.....	64

Liste des tableaux

Tableau 1.	Liste des mots clés utilisés pour la recherche de documents	3
Tableau 2.	Description des quatre enclos d'hivernage.....	18
Tableau 3.	Températures moyennes annuelles et précipitations totales annuelles de pluie et de neige de 1999 à 2003 et la moyenne sur 30 ans de 1971 à 2000.....	24
Tableau 4.	Rapport du volume d'eau de ruissellement sur le volume d'eau de précipitation pour les enclos d'hivernage et les bandes végétatives filtrantes (valeurs moyennes pour les quatre années du projet)	28
Tableau 5.	Répartition du volume d'eau de ruissellement par mois pour les quatre enclos d'hivernage (valeurs moyennes pour les quatre années du projet).....	28
Tableau 6.	Répartition du volume d'eau de ruissellement par mois pour les quatre bandes végétatives filtrantes (valeurs moyennes pour les quatre années du projet).....	29
Tableau 7.	Concentrations, charges et pourcentages mensuels d'éléments fertilisants dans les eaux de ruissellement de l'enclos d'hivernage 1	33
Tableau 8.	Concentrations, charges et pourcentages mensuels d'éléments fertilisants dans les eaux de ruissellement de l'enclos d'hivernage 2.....	33
Tableau 9.	Concentrations, charges et pourcentages mensuels d'éléments fertilisants dans les eaux de ruissellement de l'enclos d'hivernage 3.....	34
Tableau 10.	Concentrations, charges et pourcentages mensuels d'éléments fertilisants dans les eaux de ruissellement de l'enclos d'hivernage 4.....	34
Tableau 11.	Concentrations, charges et pourcentages mensuels d'éléments fertilisants dans les eaux de ruissellement de la bande végétative filtrante 1	35
Tableau 12.	Concentrations, charges et pourcentages mensuels d'éléments fertilisants dans les eaux de ruissellement de la bande végétative filtrante 2	35
Tableau 13.	Concentrations, charges et pourcentages mensuels d'éléments fertilisants dans les eaux de ruissellement de la bande végétative filtrante 3	36
Tableau 14.	Concentrations, charges et pourcentages mensuels d'éléments fertilisants dans les eaux de ruissellement de la bande végétative filtrante 4.....	36
Tableau 15.	Efficacité des bandes végétatives filtrantes pour le captage des éléments fertilisants contenus dans les eaux de ruissellement	37
Tableau 16.	Concentrations de N-NH ₄ (mg/L) dans les eaux de percolation des enclos d'hivernage.....	39
Tableau 17.	Concentrations de N-NO ₃ (mg/L) dans les eaux de percolation des enclos d'hivernage.....	39
Tableau 18.	Concentrations de N _{total} (mg/L) dans les eaux de percolation des enclos d'hivernage.....	40

Tableau 19. Concentrations de P_{total} ($\mu\text{g/L}$) dans les eaux de percolation des enclos d'hivernage.....	40
Tableau 20. Concentrations de $N\text{-NH}_4$ (mg/L) dans les eaux de percolation des bandes végétatives filtrantes.....	41
Tableau 21. Concentrations de $N\text{-NO}_3$ (mg/L) dans les eaux de percolation des bandes végétatives filtrantes.....	41
Tableau 22. Concentrations de N_{total} (mg/L) dans les eaux de percolation des bandes végétatives filtrantes.....	42
Tableau 23. Concentrations de P_{total} ($\mu\text{g/L}$) dans les eaux de percolation des bandes végétatives filtrantes.....	42
Tableau 24. Concentrations moyennes des éléments fertilisants dans le sol dans la section des enclos d'hivernage en novembre 1999, octobre 2003 et octobre 2007.....	46
Tableau 25. Concentrations moyennes des éléments fertilisants dans le sol dans la section des bandes végétatives filtrantes en novembre 1999, octobre 2003 et octobre 2007.....	46
Tableau 26. Répartition du nombre total d'échantillons en fonction de différentes concentrations de coliformes fécaux dans les eaux de ruissellement des enclos d'hivernage et des bandes végétatives filtrantes.....	56
Tableau 27. Répartition du nombre total d'échantillons en fonction de différentes concentrations de coliformes fécaux dans les eaux de percolation des enclos d'hivernage et des bandes végétatives filtrantes.....	56
Tableau 28. Bilan estimé d'azote dans les enclos d'hivernage.....	57
Tableau 29. Bilan estimé de phosphore dans les enclos d'hivernage.....	58

Liste des figures

Figure 1.	Schéma des enclos d'hivernage et des bandes végétatives filtrantes	17
Figure 2.	Fossé intercepteur pour le captage des eaux de ruissellement en aval des enclos d'hivernage	20
Figure 3.	Tuyau de PVC perforé installé en amont des bandes végétatives filtrantes pour rediriger les eaux de ruissellement des enclos d'hivernage.....	20
Figure 4.	Fossé intercepteur pour le captage des eaux de ruissellement en aval des bandes végétatives filtrantes	20
Figure 5.	Températures moyennes mensuelles durant le projet comparées aux températures moyennes mensuelles sur 30 ans (1971 à 2000)	25
Figure 6.	Précipitations totales par mois (pluie et neige) durant le projet comparées à la moyenne des précipitations totales sur 30 ans	25
Figure 7.	Concentrations de phosphore dans le sol des enclos d'hivernage de 1999 à 2007, à trois endroits et à trois profondeurs	47
Figure 8.	Concentrations de potassium dans le sol des enclos d'hivernage de 1999 à 2007, à trois endroits et à trois profondeurs	48
Figure 9.	Concentrations de N-NH ₄ dans le sol des enclos d'hivernage de 1999 à 2007, à trois endroits et à trois profondeurs	49
Figure 10.	Concentrations de N-NO ₃ dans le sol des enclos d'hivernage de 1999 à 2007, à trois endroits et à trois profondeurs	50
Figure 11.	Concentrations de phosphore dans le sol des bandes végétatives filtrantes de 1999 à 2007, à trois endroits et à trois profondeurs	51
Figure 12.	Concentrations de potassium dans le sol des bandes végétatives filtrantes de 1999 à 2007, à trois endroits et à trois profondeurs	52
Figure 13.	Concentrations de N-NH ₄ dans le sol des bandes végétatives filtrantes de 1999 à 2007, à trois endroits et à trois profondeurs	53
Figure 14.	Concentrations de N-NO ₃ dans le sol des bandes végétatives filtrantes de 1999 à 2007, à trois endroits et à trois profondeurs	54

1 Introduction

En 1999, la Fédération des producteurs de bovins du Québec (FPBQ) a publié un guide intitulé « Guide de bonnes pratiques agro-environnementales pour la gestion des fumiers des bovins de boucherie » (FPBQ et al., 1999). Ce guide regroupait l'information concernant la gestion des fumiers des élevages de vaches-veaux en enclos d'hivernage aménagés.

Suite à la publication du guide, un projet intitulé « Étude environnementale des enclos d'hivernage de vaches-veaux » a été réalisé par l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) sur le site du Centre de recherche en sciences animales de Deschambault inc. (CRSAD). D'une durée de quatre ans, ce projet avait pour but de comparer l'efficacité agroenvironnementale de quatre types d'aménagements d'enclos d'hivernage de vaches-veaux combinés à une bande végétative filtrante par une caractérisation des sols et des eaux de ruissellement, de percolation et de la nappe phréatique.

Le rapport final du projet a été déposé à la FPBQ en décembre 2004 (Pelletier et al., 2004). Dans un premier temps, le rapport présentait une description du dispositif expérimental (enclos d'hivernage et bandes végétatives filtrantes) et des méthodes d'échantillonnage et d'analyse des sols, des eaux de ruissellement et de percolation. Dans un deuxième temps, le rapport présentait les résultats d'analyse des principaux éléments fertilisants et des coliformes fécaux pour les quatre types d'aménagement.

Suite aux modifications apportées au Règlement sur les exploitations agricoles (REA), stipulant que les eaux contaminées provenant d'une cour d'exercice ne doivent pas atteindre les eaux de surface, il a été jugé nécessaire d'approfondir l'analyse des résultats pour bien quantifier les rejets provenant des aménagements de type enclos d'hivernage et bandes végétatives filtrantes.

Le présent rapport renferme une analyse approfondie des résultats obtenus dans le cadre du projet intitulé « Étude environnementale des enclos d'hivernage de vaches-veaux » réalisé par l'IRDA (Pelletier et al., 2004).

De plus, les résultats de l'échantillonnage des sols réalisé à l'automne 2007, dans le cadre d'un autre projet mené à l'IRDA, sont inclus dans ce rapport.

2 But et objectifs du projet

2.1 But du projet

Le but du projet proposé était de poursuivre et d'approfondir l'analyse des résultats présentés dans le rapport final du projet intitulé « Étude environnementale des enclos d'hivernage de vaches-veaux » déposé à la FPBQ en décembre 2004 (Pelletier et al., 2004).

2.2 Objectifs du projet

Le principal objectif du projet était de fournir des résultats permettant d'améliorer la conception des aménagements d'élevage de bovins de boucherie (enclos d'hivernage et bandes végétatives filtrantes) dans le but de rencontrer les exigences environnementales du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (MDDEP) dont, notamment celles du REA.

Les objectifs spécifiques associés au projet étaient :

- a) Identifier les critères environnementaux et les éléments fertilisants à prendre en compte lors de la réalisation du projet;
- b) Réaliser une revue de littérature sur les impacts environnementaux des aménagements d'enclos d'hivernage et de bandes végétatives filtrantes;
- c) Estimer le volume d'eau de ruissellement des enclos d'hivernage et des bandes végétatives filtrantes par rapport à la quantité de pluie et de neige tombée à chaque période de l'année;
- d) Estimer les concentrations d'éléments fertilisants dans les eaux de ruissellement et de percolation;
- e) Estimer les concentrations et les taux de saturation d'éléments fertilisants dans les sols;
- f) Estimer les concentrations de coliformes fécaux dans les eaux de ruissellement, de percolation et de la nappe phréatique;
- g) Estimer la concentration d'éléments fertilisants dans les eaux lors des événements pluvieux qui ont pu générer du ruissellement et qui n'ont pas été échantillonnés;
- h) Réaliser des bilans massiques et volumiques sur les pertes d'éléments fertilisants dans l'environnement;
- i) Réaliser un calcul d'erreur sur les bilans;
- j) Comparer les résultats obtenus avec ceux de la littérature;
- k) Identifier les limites des résultats obtenus;
- l) Émettre des recommandations pour la suite du projet.

3 Revue de littérature

3.1 Introduction

La présente revue de littérature regroupe la majorité de l'information scientifique et technique disponible sur les impacts environnementaux des aménagements d'enclos d'hivernage d'élevage de vaches-veaux et de bandes végétatives filtrantes.

Pour réaliser cette revue de littérature, une stratégie de recherche a été élaborée dans le but d'établir la liste des mots clés à utiliser et la liste des bases de données scientifiques et des différents moteurs de recherche à consulter. La liste des mots clés utilisés est présentée au tableau 1. Cette liste se divise en trois catégories, soit les animaux, les emplacements et les sous-produits. Lors de la recherche, les opérateurs booléens « et » et « ou » (« and » et « or ») ont été utilisés pour combiner les différentes catégories.

Tableau 1. Liste des mots clés utilisés pour la recherche de documents

Catégories		
Animaux	Emplacement	Sous-produits
Beef cattle	Feedlot	Bedding
Cattle	Vegetative filter strip	Fecal coliform
Cow-calf	Wintering area	Groundwater quality
Cow-calve	Wintering pen	Infiltration water
	Wintering site	Manure
		Nitrogen
		Nutrient runoff
		Phosphorus
		Runoff
		Water quality

Les bases de données scientifiques sélectionnées pour effectuer la recherche bibliographique sont CAB Abstracts et Current Contents. La base de données des documents publiés par l'American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) ainsi que le moteur de recherche de la bibliothèque de l'Université Laval ont aussi été utilisés. Les listes des références contenues à la fin des articles consultés ont permis d'identifier des textes pertinents pour compléter la revue de littérature. Les moteurs de recherche Google et Agri-Réseau ont aussi été interrogés en utilisant la liste des mots clés en français et en anglais. De plus, la lecture de certains articles a mené à la consultation des bases de données du *Journal of Environmental Quality* et du *Journal of Soil and Water Conservation* pour compléter la recherche de documents scientifiques.

La réalisation de la revue de littérature a permis de constater qu'il n'y avait aucune publication scientifique portant sur les impacts environnementaux des enclos d'hivernage d'élevage de vaches-veaux. La majorité de l'information trouvée portait sur les enclos de bovins de boucherie. Il est tout de même important de noter que dans ce cas, le concept

d'enclos d'hivernage et de bandes végétatives filtrantes développé pour les élevages de bovins de boucherie est utilisé pour les élevages de vaches-veaux.

La documentation consultée, mais non retenue pour la présente revue de littérature, renfermait beaucoup d'informations sur l'efficacité des bandes végétatives filtrantes à capter les eaux de ruissellement de provenances diverses telles que les cultures en rangées, les autoroutes et les stationnements.

La revue de littérature est séparée en trois sections. La première décrit brièvement les différents guides techniques et articles scientifiques disponibles portant sur la conception et la gestion des aménagements d'enclos d'hivernage et de bandes végétatives filtrantes. La deuxième section traite des pertes dans les eaux et les sols des enclos. La troisième section porte principalement sur l'efficacité des bandes végétatives filtrantes à capter les eaux de ruissellement des enclos.

3.2 Le concept d'enclos d'hivernage et de bandes végétatives filtrantes

3.2.1 Guides et feuillets techniques

Trois guides sont présentement disponibles pour aider les producteurs spécifiquement dans la gestion agroenvironnementale des élevages de vaches-veaux (FPBQ et al., 1999; Alberta, 2004; MAPAQ et TCAO, 2007). Ces trois guides recommandent l'aménagement d'une bande végétative filtrante en combinaison avec un enclos d'hivernage.

Deux autres guides publiés en Alberta et en Saskatchewan sur les élevages de bovins de boucherie sont aussi disponibles (Alberta, 2005 et SWA, 2003). L'information qui y est présentée peut être applicable aux enclos d'hivernage des élevages de vaches-veaux.

Finalement, plusieurs guides techniques et feuillets d'information ont été produits par des organismes publics pour informer les producteurs sur l'aménagement et la gestion des bandes végétatives filtrantes (Harner et al., 2000; Smith et Cruze, 2000; Murphy et Harner, 2001; Lorimor et al., 2002; KDHE, 2006; USDA NRCS 2006; MAAARO, 2006; MAPAQ, 2007).

Même si toutes les composantes sont bien définies, l'information retrouvée dans la majorité des guides et des feuillets demeure générale et laisse beaucoup de latitude quant à la conception et l'aménagement des enclos d'hivernage et des bandes végétatives filtrantes. Généralement, dans ces documents, une équation simple, faisant intervenir certaines contraintes, relie le nombre d'unités animales dans l'enclos à la surface de la bande végétative filtrante.

Les deux guides les plus complets portant sur la conception des bandes végétatives filtrantes sont celui du United State Department of Agriculture (USDA NRCS, 2006) et celui du ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO, 2006). Dans les guides du USDA NRCS (2006) et du MAAARO (2006), des variables plus précises, telles que les types de sol et de culture, sont utilisées dans la conception de la bande végétative filtrante. De plus, ces deux documents recommandent

l'implantation d'un bassin de captage et de décantation des eaux de ruissellement à la sortie de l'enclos pour retenir les eaux de ruissellement lors des périodes critiques.

3.2.2 Articles scientifiques

Au cours des 30 dernières années, des chercheurs ont proposé différentes formules aidant à la conception des bandes végétatives filtrantes (Vanderholm et Dickey, 1980; Schellinger et Clausen, 1992; Delgado et al., 1995; Edwards et al., 1996; Dittrich et al., 2003).

Les critères de conception proposés par ces auteurs pour la conception des bandes végétatives filtrantes sont variés allant des équations de base reliant la surface de la bande végétative filtrante au nombre d'unités animales dans l'enclos, à des équations plus complexes tenant compte, entre autres, de la conductivité hydraulique ou du coefficient de rugosité de Manning.

Certains articles scientifiques portent sur la modélisation de phénomènes spécifiques observés dans les enclos et les bandes végétatives filtrantes. Lee et al. (1989) ont travaillé à la modélisation des mouvements du phosphore dans les bandes végétatives filtrantes tandis que Jin et al. (2000 et 2001) ont caractérisé les mouvements de l'eau à la surface des bandes végétatives filtrantes à l'aide du coefficient de rugosité de Manning. Munoz-Carpena et Parsons (2004) proposent une méthode de conception des bandes végétatives filtrantes à l'aide d'un logiciel appelé VFSMOD-W. Baker (2005) et Williams et al. (2006) ont développé des équations permettant de modéliser le mouvement des éléments composant le fumier, dans les sols, les eaux de ruissellement et les eaux de drainage des enclos et des bandes végétatives filtrantes.

Selon Edwards et al. (1996), le statut de l'eau devant être protégés par la bande végétative filtrante doit guider la conception. En d'autres mots, le polluant que la bande végétative filtrante doit contrôler doit être identifié sur la base de l'eau à protéger, particulièrement lorsque la bande végétative filtrante est conçue sur une base de concentration ou de transport de masse. Il est inutile, par exemple, de concevoir une bande végétative filtrante pour réduire les concentrations d'azote lorsque le cours d'eau à protéger doit l'être sur une base de phosphore. Ces décisions sont essentielles dans la conception des bandes végétatives filtrantes, elles établissent le but et la raison d'être de la bande végétative filtrante. Ces principaux paramètres influencent la conception

Dickey et Vanderholm (1981) rapportaient que pour prévenir les dommages à la végétation et augmenter l'efficacité de la bande végétative filtrante, la sédimentation doit être préconisée pour retirer les solides en suspension des eaux de ruissellement des enclos.

3.3 Enclos d'hivernage

Tel que rapporté par Miller et al. (2004), les eaux de ruissellement provenant des enclos de bovins de boucherie peuvent contenir des polluants chimiques affectant la qualité de l'eau. Le type de polluants transportés dans les eaux de ruissellement varie en fonction de

la ration alimentaire, du type de couverture à la surface de l'enclos, du climat, de la qualité de l'eau en amont de l'enclos ainsi que de l'intensité et de la durée des précipitations. Si les eaux de ruissellement provenant des parcs d'engraissement ne sont pas gérées adéquatement, les polluants qu'elles contiennent peuvent nuire aux eaux de surface avoisinantes. Cette contamination peut affecter la vie aquatique, l'eau potable et les activités récréatives ainsi que la qualité des sols et des cultures avoisinantes.

Selon Olson et al. (2005), il y a peu d'études de caractérisation des sols et des eaux souterraines sous les parcs d'engraissement. Les quelques études sur la caractérisation des sols ont montré peu ou pas de mouvements des polluants sous les parcs d'engraissement. Tandis que les études traitant de la qualité de l'eau souterraine ont révélé des cas de contamination. Ce phénomène suggère que le mouvement de l'eau dans les macropores du sol est un mécanisme pouvant polluer les eaux souterraines tout en ayant peu d'effets sur le sol traversé.

Au milieu des années 90, les chercheurs d'Agriculture et agroalimentaire Canada au Centre de recherche de Lethbridge en Alberta ont construit un parc d'engraissement pour bovins de boucherie. Plusieurs articles, publiés récemment (Miller et al., 2003, 2004 et 2006; Olson et al., 2005 et Olson et al., 2006), traitent des résultats obtenus sur le site. Le dispositif était composé de 32 parcs de 14 m par 20 m pouvant contenir quinze bovins pour une densité animale d'environ 18 m² tête⁻¹. Les eaux de ruissellement de chacun des parcs étaient mesurées et échantillonnées individuellement avant d'être acheminées dans un bassin de décantation. À chaque année, les bovins faisaient leur entrée dans les enclos durant les mois d'automne (octobre, novembre ou décembre) pour en sortir au mois de juillet. Le fumier était retiré des enclos après le départ des bovins.

L'étude réalisée par Miller et al. (2004) avait pour but de quantifier et de caractériser les eaux de ruissellement provenant des enclos. D'une durée de quatre ans, le projet a débuté à l'automne 1997 pour se terminer à l'été 2002. Pendant toute la durée du projet, il y a eu six événements de ruissellement en 1998, trois en 1999, un en 2000, aucun en 2001 et un en 2002. La durée des événements de pluie variait entre 5 et 59 heures et la quantité de pluie tombée variait entre 12,2 et 136,9 mm. Tous les événements de ruissellement ont été provoqués par la pluie et non par la fonte des neiges. De plus, il n'y a pas eu de relation linéaire entre la quantité de pluie tombée et le ruissellement. En moyenne, les eaux de ruissellement contenaient 35,3 mg L⁻¹ de P_{total}, 5,8 mg L⁻¹ de P-ortho, 85,7 mg L⁻¹ de N_{total}, 33,0 mg L⁻¹ de N-NH₃, 3,4 mg L⁻¹ de N-NO₃ et 515 mg L⁻¹ de K. À l'intérieur des paramètres mesurés, les résultats obtenus ont permis de constater que dans les eaux de ruissellement, le phosphore total représentait un risque pour la qualité de l'eau alors que le potassium représentait un risque de dépassement de la capacité d'absorption des cultures si l'eau de ruissellement des enclos était utilisée à des fins d'irrigation.

Miller et al. (2003) ont mesuré l'effet du type de litière (paille ou copeaux de bois) et du moment de l'année sur les caractéristiques chimiques et bactériologiques du fumier dans les parcs d'engraissement tandis que Olson et al. (2006) ont mesuré, à l'aide d'un simulateur de pluie, l'effet du type et de la présence de litière dans les enclos sur les eaux de ruissellement. Même si les résultats obtenus durant les deux années de l'étude n'ont pas été constants, les auteurs en sont venus aux conclusions suivantes : (1) le type de

litière n'a pas eu d'effet significatif sur le temps et le volume de ruissellement produit, (2) la présence de litière n'a pas eu pour effet de réduire le volume de ruissellement produit une année sur deux et (3) le ruissellement débutait plus rapidement lorsqu'il n'y avait pas de litière.

Des résultats d'analyse supplémentaires des eaux de ruissellement du même projet sont présentés par Miller et al. (2006). Les concentrations de N-NH₄, de SO₄ et de coliformes totaux étaient plus élevées lorsque les eaux de ruissellement provenaient de litière de copeaux de bois comparativement à celles de la litière de paille. Les auteurs ont aussi constaté que les concentrations de TKN, Na, K, SO₄, Cl, coliformes (*Escherichia coli*) et de coliformes totaux étaient plus élevées dans le sol situé sous la litière.

Olson et al. (2005) ont présenté les résultats de leur étude dont le but était de caractériser le sol et l'eau souterraine sous les enclos. Des échantillons de sol ont été récoltés à différentes profondeurs (0 à 0,15 m, 0,15 à 0,3 m et à tous les 0,3 m jusqu'à 1,5 m de profondeur) en 1996 (avant l'insertion des vaches dans les enclos) et en 1999. Six puits d'échantillonnage d'eau souterraine ont été installés sur le site. Les concentrations de P-PO₄, N-NO₃, N-NH₄ et K ont augmenté significativement dans le premier 0,15 m de sol. Selon les auteurs, cette augmentation s'expliquerait par le piétinement des vaches qui favoriserait l'incorporation du fumier dans les premiers centimètres de sol. D'autres caractéristiques, telles que la conductivité électrique, le ratio d'absorption du sodium et les concentrations de S-SO₄, Mg, Ca et Na ont augmenté significativement à une profondeur de 0,6 m. La concentration de chlore a aussi augmenté significativement entre 0 et 1,5 m de profondeur prouvant l'infiltration du fumier sous les enclos.

Toujours selon Olson et al. (2005), certains résultats prouveraient l'existence du mouvement de l'eau dans les macropores du sol puisque certains éléments, tel que N-NH₄, K et P-PO₄, qui ne s'étaient pas accumulés dans les parties supérieures du sol augmentaient en profondeur dans le sol sous les enclos. Les concentrations de chlore et les comptes de *E. coli* et de coliformes totaux ont augmenté dans les puits situés près des enclos tandis qu'il n'y a eu que peu de changements dans le puits situé à l'extérieur des enclos. Les résultats indiquent qu'il y a eu contamination de la nappe phréatique sous les enclos. Les concentrations de P-PO₄, N-NH₃ et Mn ont aussi augmenté dans le sol sous les enclos.

Maulé et Fonstad (2000) ont étudié la qualité de l'eau souterraine de cinq parcs d'engraissement en fonction depuis 20 à 35 ans, dans les environs de Saskatoon. Des échantillons d'eau ont été obtenus à partir de 30 piézomètres (2,5 à 14,5 m de profondeur) à trois périodes d'échantillonnage (février, juin et août 1997). Tous les piézomètres étaient situés à l'extérieur des enclos d'engraissement mais à l'intérieur ou adjacents au périmètre délimitant les enclos. L'objectif de cette étude était de déterminer si l'eau souterraine, peu profonde à l'intérieur du périmètre du parc d'engraissement, était contaminée par le fumier de l'enclos. Des concentrations élevées des ions K⁺, Cl⁻, N-NO₃, N-NH₄ et P_{total} dissous ont été trouvées sous les enclos indiquant la présence de fumier dans l'eau souterraine. Parmi les cinq sites, quatre démontraient des concentrations indiquant la présence de fumier du parc d'engraissement.

Dans une analyse approfondie de la même étude, Maulé et Fonstad (2002) ont conclu que le N-NO₃ n'était pas toujours un indicateur fiable de l'infiltration du fumier due aux transformations biologiques qu'il subit.

Dans une étude réalisée en Finlande, Uusi-Kämpä (2002) a mesuré les pertes d'azote et de phosphore provenant de vaches laitières gardées en enclos durant l'hiver. Le dispositif expérimental consistait en quatre enclos pouvant contenir chacun huit vaches. Les vaches séjournèrent dans les enclos entre les mois d'octobre et mai. D'une superficie d'environ 1 000 m², les enclos étaient divisés en deux, la première moitié consistait en une aire d'alimentation, d'un brise vent et d'un abri tandis que la deuxième moitié de l'enclos était recouverte d'arbre à maturité (bouleau et pin) à une densité de 400 troncs ha⁻¹. Il est important de noter que les vaches avaient accès aux deux parties de l'enclos. Après deux hivers, les concentrations moyennes de P, de N-NH₄ et de N-NO₃ à la surface du sol (0 à 5 cm) étaient respectivement de 14, 73 et 3,0 mg L⁻¹ comparativement à 3,0, 4,2 et 0,06 mg L⁻¹ pour des échantillons témoins à l'extérieur des enclos. Les concentrations de P, de N-NH₄ et de N-NO₃ dans le sol des enclos étaient plus élevées dans la première partie de l'enclos.

Berry et Miller (2005) ont étudié l'impact de l'humidité du sol et des caractéristiques du fumier des parcs d'engraissement sur les concentrations de *E. coli*. L'étude a été réalisée en laboratoire avec des échantillons de sol et de fumier de bovins. Les auteurs ont conclu que *E. coli* et les autres types de coliformes pouvaient non seulement persister mais se multiplier dans le sol si les conditions étaient appropriées. Selon les auteurs, des travaux additionnels seront nécessaires pour déterminer les variables pouvant être manipulées pour limiter la présence des coliformes dans le sol des parcs d'engraissement.

Dans un autre article présentant les résultats du même projet, les auteurs rapportaient que les caractéristiques du fumier et le taux d'humidité affectaient les émissions de composés odorants, d'ammoniac, de gaz à effet de serre et de poussières (Miller et Berry, 2005). Selon les auteurs, les émissions de poussières seraient directement attribuables aux caractéristiques du fumier, tandis que les autres émissions seraient attribuables à l'activité microbienne.

Kissinger et al. (2007) présentent les résultats d'une étude dont le but était de caractériser les fumiers récoltés dans six parcs d'engraissement de bovins de boucherie de l'état du Nebraska et de réaliser un bilan massique aux frontières d'un enclos. Le bilan de masse a permis de démontrer que ce qui sortait, en matière d'animal, de fumier récolté et de perte d'éléments fertilisants, représentait respectivement 31, 23 et 47 % des apports d'azote et respectivement 38, 57 et 5 % des apports de phosphore.

Les résultats obtenus dans cette étude ont servi à développer un modèle permettant de réaliser le bilan massique des principaux éléments fertilisants entrants et sortants des enclos de bovins de boucherie (ASAE Standards, 2005).

3.4 Bandes végétatives filtrantes

La bande végétative filtrante consiste en un espace de terrain recouvert de végétaux, située en aval d'une source de pollution diffuse, utilisée pour retenir les sédiments, les nutriments et autres éléments polluants contenus dans les eaux de ruissellement (Chaubey et al., 1994 et 1995). La bande végétative filtrante purifie les eaux de ruissellement en y favorisant l'infiltration, le dépôt, les liaisons et l'absorption des polluants par le sol et les plantes (Dillaha et al., 1989). Le concept de bandes végétatives filtrantes est considéré comme une option pratique et peu coûteuse permettant d'améliorer la qualité des eaux de ruissellement (Chaubey et al., 1994).

Delgado et al. (1995) rapportaient que plusieurs études ont recommandé l'utilisation des bandes végétatives filtrantes en tant que méthode alternative permettant de réduire la contamination provenant de divers types d'eau de ruissellement, même si l'efficacité est variable et dépend de plusieurs paramètres. Cette technique a été traditionnellement, et plus intensivement, utilisée pour contrôler les sources de pollution diffuse. Les résultats obtenus dans certaines études démontrent qu'avec une conception et une gestion appropriée, les bandes végétatives filtrantes représentent une alternative économique et efficace pour réduire les concentrations d'éléments fertilisants et de pathogènes dans les eaux de surface. Avec une évaluation appropriée du site, les aménagements dont la conception était basée sur les plus importants volumes d'eau et sur l'infiltration du sol ont démontré leur efficacité. De plus, une conception flexible des bandes végétatives filtrantes combinant ces deux paramètres (en plus des avantages à la végétation tels que la capture des éléments fertilisants, la protection du sol et la rétention des solides en suspension) permet de développer des aménagements plus efficaces que ceux basés exclusivement sur un ou l'autre de ces paramètres.

Tel que rapporté par Chaubey et al. (1995), plusieurs projets de recherche ont été réalisés dans le but d'étudier l'utilisation des bandes végétatives filtrantes pour le contrôle des sources de pollution diffuse. Cependant, ils ont constaté qu'il n'existait pas de méthodes standard et approuvées permettant de tenir compte de l'efficacité de captage des polluants et des mécanismes affectant les performances de la bande végétative filtrante. Conséquemment, une bande végétative filtrante peut facilement être installée dans un endroit et sous des conditions dans lesquelles elle est, soit inefficace ou surdimensionnée (Chaubey et al., 1995).

Munoz-Carpena et Parsons (2004) abondent dans le même sens, et comme dans plusieurs autres bonnes pratiques de gestion, il n'existe pas de critères précis pour la conception optimale des bandes végétatives filtrantes. Plusieurs organismes ont établi des guides généraux pour la construction et la gestion des bandes végétatives filtrantes mais, ces approches ne permettent pas de quantifier les performances et l'efficacité dans un cas spécifique.

Koelsch et al. (2006) ont produit une revue de littérature sur les aménagements avec bandes végétatives filtrantes. Dans cette revue, les auteurs ont présenté sous forme de tableaux, un résumé d'une quarantaine de publications scientifiques sur les performances

et les principales recommandations relatives à la conception et à la gestion des bandes végétatives filtrantes.

Selon Koelsch et al. (2006), l'ensemble des résultats contenus dans la littérature démontrait que les bandes végétatives filtrantes permettaient de capter entre 70 et 90 % des solides totaux, 80 % des composés azotés (N_{total} , TKN et $N\text{-NH}_4$) et 70 % du phosphore. Les efficacités de captage des nitrates (NO_3) étaient généralement plus basses que celles des autres composés azotés. Des augmentations ont souvent même été constatées. L'efficacité des bandes végétatives filtrantes pour capter les coliformes fécaux semble aussi plus difficile à établir puisque beaucoup de variations ont été observées dans les résultats obtenus. Koelsch et al. (2006) font remarquer que peu d'études portant sur le captage des coliformes fécaux ont été réalisées dans les conditions réelles. En moyenne, dans les études faisant intervenir un simulateur de pluies, les bandes végétatives filtrantes ont permis de capter 75 % des coliformes fécaux.

Le rapport de la surface de la bande végétative filtrante sur celle de l'enclos est un paramètre important identifié par Koelsch et al. (2006). Les résultats obtenus avec de faibles rapports de surface semblaient très variables; plusieurs résultats montrant des réductions d'azote et de phosphore inférieures à 50 %. Un rapport de surface supérieur à deux assure des efficacités plus constantes et supérieures à 50 %.

En résumé, les trois principales conclusions rapportées par Koelsch et al. (2006) étaient à l'effet que :

- Plusieurs projets de recherche réalisés avaient permis de mieux comprendre et d'évaluer les performances des aménagements de bandes végétatives filtrantes;
- Les aménagements de bandes végétatives filtrantes incluant un bassin de sédimentation permettaient d'obtenir des performances supérieures;
- Une conception appropriée et une gestion rigoureuse des aménagements de bandes végétatives filtrantes étaient nécessaires pour assurer leur efficacité.

Hay et al. (2006) ont utilisé trois approches expérimentales pour étudier l'efficacité des bandes végétatives filtrantes. Les approches différaient principalement dans la méthodologie retenue pour générer un volume suffisant d'eau de ruissellement. La première approche consistait à tester l'efficacité, sous des conditions réelles, en utilisant les précipitations naturelles pour provoquer le ruissellement. Tate et al. (2000) ont mis en évidence le nombre restreint de travaux de recherche documentés traitant de l'efficacité des bandes végétatives filtrantes à capter les polluants provenant des pâturages et/ou des parcs d'engraissement pour bovins sous des conditions naturelles. Cependant, dans plusieurs cas, les précipitations elles-mêmes n'étaient pas suffisantes pour générer du ruissellement. Les deux autres approches consistent à utiliser un simulateur de pluie et à irriguer ou inonder les surfaces pour générer des volumes suffisants de ruissellement (Hay et al., 2006).

Aux méthodes utilisées pour générer du ruissellement, il faut ajouter le type de végétation des bandes, les caractéristiques de terrain et les différentes sources de pollution en amont des bandes végétatives filtrantes, soit principalement la présence d'animaux ou l'épandage de fumier. Pour toutes ces raisons, il devient alors difficile de comparer entre eux les résultats des différentes études.

Plusieurs travaux de recherche ont été menés afin d'évaluer l'efficacité des bandes végétatives filtrantes dans le but de traiter les eaux de ruissellement provenant des eaux de laiterie (Paterson, 1980; Yang, 1980; Schwer et Clausen, 1989; Meals, 1996; Kim, 2006), de l'épandage de lisier de porcs (Chaubey, 1994), de l'épandage de fumier de poules (Bingham et al., 1980; Chaubey et al., 1995; Coyne, 1995 et 1998), de l'épandage d'engrais minéraux sur les cultures (Heatwaite et al., 1998; Magette et al., 1989), de l'épandage de pesticides (Boyd et al. 2003) et du ruissellement des cultures elles-mêmes (Dillaha et al., 1989; Blanco-Canqui et al., 2004 a et b; Lee et al., 2000; Bedard-Haughn et al., 2004 et 2005).

Plusieurs études ont aussi porté sur l'efficacité des bandes végétatives filtrantes à réduire les charges dans les eaux de ruissellement provenant des pâturages et des parcs d'engraissement de bovins laitiers et de bovins de boucherie (Paterson, 1980; Young et al., 1980; Dicke et Vanderholm, 1981; Edward, 1983; Dillaha et al., 1988; Schellinger et Clausen, 1992; Heatwaite et al., 1998; Lim et al., 1998; Tate et al., 2000; Fajardo et al., 2001; Mankin et al., 2006). Les principaux résultats de recherche présentés dans ces articles sont résumés dans les paragraphes suivants.

Paterson et al. (1980) ont vérifié l'efficacité combinée d'un bassin de décantation et d'une bande végétative filtrante de 35 m pour traiter les eaux de laiterie et les eaux de ruissellement provenant du fumier produit par 70 vaches laitières gardées en stabulation libre dans une cours bétonnée. Les résultats d'échantillonnage, réalisés lors des mois de mai, juin et juillet, ont démontré une réduction de la DBO₅ de 42 %, du NH₄⁺ de 37 %, du PO₄⁻³ de 7,2 % et des solides en suspension de 70 %. Par contre, durant cette même période, la concentration de NO₃ a augmenté dans les eaux de ruissellement à la sortie de la bande végétative filtrante.

Young et al. (1980) ont mesuré l'efficacité des bandes végétatives filtrantes pour traiter les eaux de ruissellement provenant d'un enclos de 54,9 m par 111,3 m contenant 310 vaches. Un simulateur de pluie a été utilisé pour provoquer le ruissellement à deux reprises deux années de suite. Les bandes végétatives filtrantes mesuraient 4,06 m de large avaient entre 21,3 et 27,7 m de long, avec une pente de 4 %. Elles étaient recouvertes de maïs, de sorgho ou d'orge. Les bandes végétatives filtrantes ont permis de capter le ruissellement et les solides totaux provenant de l'enclos de respectivement 67 et 79 %. En moyenne, les bandes végétatives filtrantes ont permis une réduction de N_{total} (TKN + N-NO₃), du N-NH₄, du P_{total} et du P-PO₄ respectivement de 84, 63, 83 et 76 %. Cependant, les concentrations de N-NO₃ dans les eaux de ruissellement provenant des bandes végétatives filtrantes recouvertes de sorgho et d'orge avaient augmenté d'environ 9 %. Après le passage des eaux de ruissellement à travers les bandes végétatives filtrantes, les concentrations de coliformes totaux et de coliformes fécaux étaient réduites de 69 %.

Dickey et Vanderholm (1981) rapportaient que les bandes végétatives filtrantes pouvaient représenter une alternative satisfaisante aux systèmes de type rejets zéro et réduire les problèmes de pollution associés aux eaux de ruissellement des enclos. Ils ont étudié l'efficacité des bandes végétatives filtrantes pour traiter les eaux de ruissellement provenant de quatre types de gestion d'effluents en productions animales : le liquide issu du fumier de vaches laitières, le liquide provenant de deux parcs d'engraissement de bovins et celui d'un élevage extérieur de porcs à l'engraissement. En ce qui concerne les concentrations de N-NH₃, de TKN, de solides totaux et DCO, l'efficacité de captage des bandes végétatives filtrantes variait entre 95,5 et 97,7 % pour le liquide issu de fumier de vaches laitières, entre 71 et 81 % pour le premier parc d'engraissement, entre 90 et 93 % pour le deuxième parc d'engraissement et entre 78 et 92 % pour l'élevage extérieur de porcs à l'engraissement.

Durant une période de trois ans, Edwards et al. (1983) ont vérifié l'efficacité combinée d'un bassin de décantation et de deux bandes végétatives filtrantes de 4,5 m de large par 30 m de long utilisées en série pour traiter les eaux de ruissellement provenant d'un enclos pavé de 243 m² destiné à 56 bovins d'environ 225 kg. Les paramètres mesurés étaient le volume d'eau de ruissellement, les solides totaux, la DCO, la DBO₅, l'azote total et le phosphore total. Suite aux résultats obtenus, le bassin de décantation réduisait les solides totaux et la DCO d'environ 55 %, tandis que la DBO₅, l'azote et le phosphore étaient réduits d'environ 35 à 40 %. Après le passage de l'eau dans les deux bandes végétatives filtrantes, les taux de réduction des différents éléments augmentaient entre 80 et 90 %. Les auteurs ont fait remarquer que le bassin de décantation était plus efficace lors des événements pluvieux importants et que les bandes végétatives filtrantes étaient plus efficaces lorsque le bassin de décantation se vidait lentement suite à la sédimentation des solides en suspension.

Dillaha et al. (1988) ont mesuré l'efficacité des bandes végétatives filtrantes de 4,6 et 9,1 m de long suite à l'application de fumier de vaches à des taux de 7 500 et 15 000 kg ha⁻¹. Des bandes végétatives filtrantes de 9,1 et de 4,6 m ont été efficaces pour retirer 91 et 81 % des sédiments entrants. L'efficacité des bandes végétatives filtrantes pour retirer les sédiments semblait diminuer avec le temps au fur et à mesure que les sédiments s'accumulaient dans la bande. En moyenne, l'efficacité de la bande diminuait de 9 % entre les simulations. Les bandes végétatives filtrantes de 9,1 et de 4,6 m ont retiré respectivement 69 et 58 % du phosphore et 74 et 64 % de l'azote. De plus, les mêmes travaux ont permis de démontrer qu'une bande végétative filtrante ayant un canal d'écoulement préférentiel était de 40 à 60 %, de 70 à 95 % et de 61 à 70 % moins efficace pour capter respectivement les sédiments, le phosphore et l'azote qu'une bande végétative filtrante ayant une surface uniforme.

Schellinger et Clausen (1992) ont mesuré l'efficacité d'une bande végétative filtrante de 7,6 m de large par 22,9 m de long pour traiter les eaux de ruissellement provenant d'une cours bétonnée où était gardées 110 vaches laitières en stabulation libre. Les taux de captage des solides en suspension, d'azote et de phosphore étaient inférieurs à 33 %. Selon les mêmes auteurs, la conception de la bande végétative filtrante n'était pas adéquate.

Heatwaite et al. (1998) ont testé l'efficacité des bandes végétatives filtrantes suite à l'application de fumier liquide de vache et d'un fertilisant minéral en amont des bandes végétatives filtrantes. Les bandes végétatives filtrantes mesuraient 5 m de large par 10 m de long et étaient recouvertes de graminées. Un simulateur de pluie était utilisé pour provoquer le ruissellement. Suite à l'application de fumier liquide de vache, les bandes végétatives filtrantes ont permis de réduire de 75 % la quantité d'azote contenue dans les eaux de ruissellement et de seulement 10 % pour le phosphore. Suite à l'application d'un fertilisant minéral, les bandes végétatives filtrantes ont permis de réduire l'azote de 94 % et le phosphore de 98 % dans les eaux de ruissellement.

Lim et al. (1998) ont mesuré l'efficacité d'une bande végétative filtrante de 2,4 m de large par 30,5 m de long suite à l'application de fumier de vaches. Le fumier était appliqué à un taux équivalent à 60 kg N ha^{-1} sur les premiers 12,2 m, tandis que les derniers 18,3 m agissaient à titre de bande végétative filtrante. Un simulateur de pluie a été utilisé à un taux de 100 mm h^{-1} pour produire le ruissellement. Des échantillons d'eau de ruissellement ont été récoltés à 0, 6,1, 12,2 et 18,3 m du début de la bande. Les résultats ont démontré qu'approximativement 75 % du TKN, du P_{total} , du P-ortho et des solides en suspension étaient retirés dans le premier 6,1 m de la bande. Aucune concentration de coliformes fécaux n'a été mesurée après 6,1 m. L'efficacité de la bande végétative filtrante dépassait 90 % pour tous les éléments après 18,3 m. Les bandes végétatives filtrantes n'ont pas retiré des quantités significatives de N-NO_3 et de N-NH_3 dû au fait que le fumier de vaches ne contenait que de faibles quantités d'azote minéral.

Dans une étude réalisée dans l'état du Nevada, Tate et al. (2000) ont vérifié l'efficacité de bandes végétatives filtrantes d'une longueur de 10 m pour filtrer les eaux de ruissellement suite à l'irrigation de pâturages avec des gicleurs ou par inondation. Les auteurs ont trouvé que respectivement, 15 et 69 % de l'eau appliquée à l'aide de gicleurs et de l'eau appliquée par inondation se transformait en ruissellement. Pour les deux modes d'irrigation, à l'exception des solides totaux en suspension, les bandes végétatives filtrantes n'ont pas réduit de façon significative les concentrations de N-NO_3 et de phosphore total dans les eaux de ruissellement.

En général, selon Fajardo et al. (2001), une bande végétative filtrante est efficace pour réduire les concentrations de certains éléments fertilisants, de sédiments et de solides en suspension dans les eaux de ruissellement des parcs d'engraissement de bovins. Cependant, les résultats sont variables pour contrôler les éléments fertilisants qui sont solubles dans l'eau et les bactéries contenues dans les eaux de ruissellement. Fajardo et al. (2001) ont réalisé une expérience dont le but était de vérifier l'efficacité d'un champ de fétuque agissant à titre de bande végétative filtrante pour filtrer les eaux de ruissellement provenant de fumier de bovins épandu en amont. Les paramètres analysés étaient le N-NO_3 et les coliformes fécaux. Un simulateur de pluie a été utilisé pour provoquer le ruissellement lors de quatre événements. Les concentrations de N-NO_3 dans les eaux de ruissellement étaient réduites de 94 à 99 %. Les auteurs rapportent que les concentrations de N-NO_3 étaient affectées par la durée de l'événement de ruissellement. Plus le mouvement de l'eau à la surface était lent, plus les nitrates étaient dissous. Seulement deux des quatre événements de ruissellement qui ont été simulés durant

l'expérimentation ont permis des réductions de coliformes fécaux. Les réductions de coliformes fécaux obtenues étaient de l'ordre de 64 et 87 %.

Woodbury et al. (2002, 2003 et 2005) ont testé l'efficacité d'un aménagement comportant un bassin de sédimentation et d'une bande végétative filtrante pour traiter les eaux de ruissellement d'un parc d'engraissement pour bovins de boucherie situé dans l'état du Nebraska. Le parc d'engraissement était composé de huit enclos comptant chacun entre 70 et 80 bovins, mesurait 30 m de large par 90 m de long et avait une aire d'alimentation en béton. La bande végétative filtrante était recouverte d'une culture de brome et avait une superficie de six hectares pour une longueur variant entre 200 et 210 m. Le bassin de sédimentation a été conçu de façon à retenir le volume d'eau produit par une pluie de 24 heures d'une récurrence de 25 ans. La majeure partie de l'expérimentation s'est déroulée sur une période de trois ans, de 1999 à 2001. Durant ces trois années, il y a eu 18 événements de pluie qui ont provoqué du ruissellement entre les mois de mai et septembre. Aucun volume d'eau de ruissellement n'a été mesuré à la sortie des bandes végétatives filtrantes. L'efficacité de la bande végétative filtrante est considérée égale à 100 %. Les auteurs font remarquer qu'une attention particulière doit être portée aux conditions du sol sous le bassin de sédimentation. Les échantillonnages de sol réalisés en 1999 ont dépassé 20 mg N-NO₃ kg⁻¹ à seulement deux endroits. En 2002, les concentrations de N-NO₃ étaient supérieures à 20 mg kg⁻¹ à quatre endroits pour dépasser 50 mg kg⁻¹ (Woodbury et al., 2005).

Roodsari et al. (2005) ont comparé l'efficacité de captage de différents types d'aménagement de bandes végétatives filtrantes. Le montage était composé de quatre bandes végétatives filtrantes de 6 m de long par 6,4 m de large avec une pente de 20 %. Deux des bandes végétatives filtrantes avaient un sol de type loam sableux et les deux autres avaient un sol de type loam argileux. Les deux types de sol étaient laissés à nu ou recouverts d'une culture de fétuque. Un simulateur de pluie a été utilisé pour provoquer le ruissellement. La présence de végétation a permis de réduire les concentrations de coliformes fécaux de 99 %.

Dans une étude réalisée par Helmer et al. (2005), l'objectif était de quantifier les performances d'une bande végétative filtrante dans laquelle l'écoulement de l'eau n'était pas contrôlé par des barrières artificielles. Les résultats ont montré que l'écoulement de l'eau n'était pas uniforme dans une bande végétative filtrante grandeur nature et qu'il n'était pas possible de le prédire en utilisant des cartes topographiques à haute résolution. Cependant, même si l'écoulement n'était pas uniforme, la bande végétative filtrante a permis de capter approximativement 80 % des sédiments entrants.

Mankin et al. (2006) ont réalisé une étude dans le but de caractériser les eaux de ruissellement provenant de quatre parcs d'engraissement de bovins et de leur bande végétative filtrante respective. Les quatre sites possédaient un bassin de rétention entre l'enclos et la bande végétative filtrante. Les parcs d'engraissement étaient utilisés entre les mois d'octobre et mars. Les échantillonnages d'eau de ruissellement ont été réalisés à l'été lorsque les parcs d'engraissement étaient vides, soit entre les mois de mai et novembre. En moyenne, les bandes végétatives filtrantes ont permis de réduire les concentrations de coliformes fécaux de 77 %, de *E. coli* de 83 %, de N_{total} de 66 % et de

P_{total} de 66 %. Les bandes végétatives filtrantes ont permis de capter toutes les eaux de ruissellement provenant des parcs d'engraissement dans 92 et 93 % des cas pour les deux sites où le rapport aire de la bande végétative filtrante sur aire de l'enclos était supérieur à 0,5 et dans 77 et 83 % des cas pour les deux sites où ce même rapport était inférieur à 0,5. Les auteurs concluent que l'efficacité des bandes végétatives filtrantes pour réduire les concentrations de polluants augmente lorsque le rapport aire de la bande végétative filtrante sur l'aire de l'enclos augmente.

3.5 Points à retenir de la revue de littérature

Suite à la consultation de la littérature scientifique et des différents guides et feuillets techniques les points suivants sont à retenir :

- Le concept d'enclos d'hivernage et de bandes végétatives filtrantes est une pratique généralement bien acceptée et utilisée. Cependant, même si plusieurs projets de recherche ont porté sur l'évaluation des performances des bandes végétatives filtrantes, le principe du « rejet zéro » en aval de ces dernières n'est pratiquement jamais obtenu;
- La majorité des projets de recherche réalisés dans les 30 dernières années ont porté sur la quantification des pertes provenant des enclos. Pratiquement aucun projet de recherche n'a été réalisé dans le but de vérifier l'efficacité d'aménagements ou de technologies permettant de réduire l'impact environnemental des enclos. De plus, peu d'innovations sur l'aménagement des enclos ont été répertoriées;
- Le concept de bandes végétatives filtrantes est recommandé dans plusieurs états et provinces au Canada et aux États-Unis. L'encadrement des autorités en place est représenté par la publication de feuillets et de guides techniques. Cependant, l'information présentée est un peu disparate et non précise. Les guides publiés par MAAARO (2006) et USDA NRCS (2006) sont plus complets en matière de critères de conception. La conception des futurs aménagements de bandes végétatives filtrantes devrait s'en inspirer. De plus, tel que recommandé dans ces deux guides, l'ajout d'un bassin de décantation entre l'enclos et la bande végétative filtrante devrait permettre d'augmenter l'efficacité du système.

4 Matériel et méthodes

4.1 Durée du projet

D'une durée de quatre ans, le projet a débuté en novembre 1999 pour se terminer en octobre 2003. L'échantillonnage des sols et des eaux de ruissellement et de percolation a débuté en novembre 1999. Les vaches ont été introduites dans les enclos pour la première fois à la fin du mois de novembre 1999.

4.2 Description du site

L'expérimentation a été réalisée sur le site de la ferme expérimentale du CRSAD à Deschambault. Cette section présente les principales caractéristiques du dispositif expérimental. Une description plus complète est disponible dans Pelletier et al. (2004).

4.2.1 Enclos d'hivernage

Un schéma d'aménagement complet des enclos d'hivernage et des bandes végétatives filtrantes est présenté à la figure 1. Les principales caractéristiques des enclos d'hivernage 1 à 4 sont présentées au tableau 2.

Les enclos d'hivernage 1 et 2 possédaient les mêmes caractéristiques de base : dimensions, pente, type de sol, végétation et densité animale. Dans l'enclos 1, 7,6 cm de paille étaient appliqués à chaque année, au début de l'hiver, sur 20 % de la surface. Dans l'enclos 2, 7,6 cm de paille et de ripe étaient appliqués à chaque année au début de l'hiver, et ajouté à un taux de 3 kg jour⁻¹ vache⁻¹. La régie de l'enclos d'hivernage 2 était conforme à celle présentée dans le guide de bonnes pratiques (FPBQ et al., 1999) tandis que la régie de l'enclos d'hivernage 1 s'approchait de celle utilisée par la majorité des producteurs avant la publication du guide.

Les enclos 3 et 4 étaient des enclos à haute densité utilisés en période de gel et de dégel. La surface de l'enclos 3 était recouverte d'un lit de copeaux grossiers (25 à 75 mm) d'une épaisseur de 60 cm. La surface de l'enclos 4 était bétonnée et recouverte de 15 cm de ripe. De la ripe était aussi appliquée à un taux de 6,5 kg jour⁻¹ vache⁻¹ pour assurer le bien-être des animaux.

En période d'occupation, les enclos contenaient 12 vaches. La densité animale était calculée en utilisant 10 vaches avec leur veau respectif par enclos. Cependant, aucun veau n'a été gardé dans les enclos durant l'expérimentation. L'hypothèse réalisée était que 12 vaches équivalaient à 10 vaches avec leur veau respectif.

4.2.2 Bandes végétatives filtrantes

Les eaux de ruissellement de chaque enclos étaient dirigées vers une bande végétative filtrante composée d'une prairie de graminées (mil et brome). Quatre bandes végétatives filtrantes de 22 m de largeur par 60 m de longueur avec une pente moyenne de 2 % ont été aménagées en aval des enclos d'hivernage.

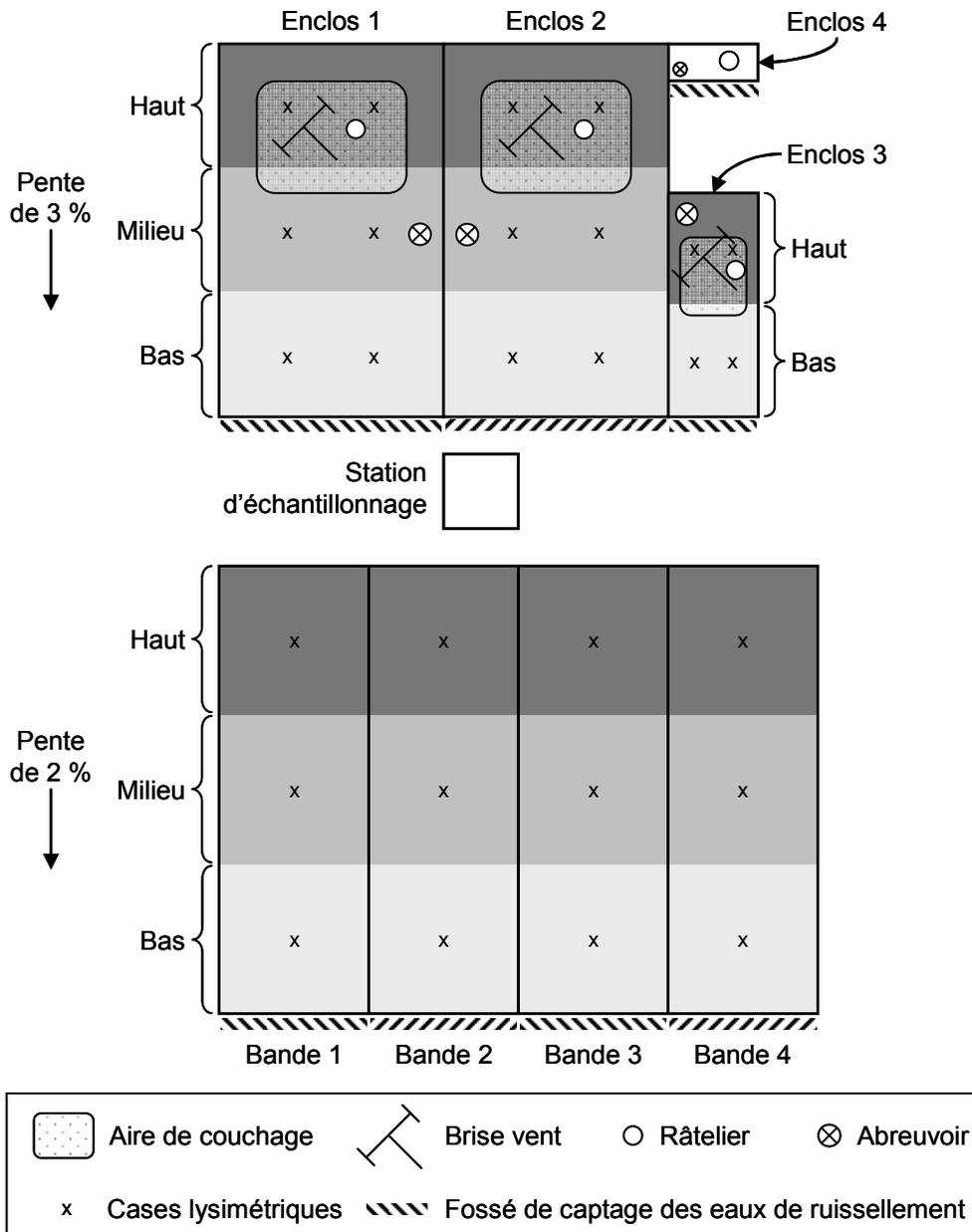


Figure 1. Schéma des enclos d'hivernage et des bandes végétatives filtrantes

Tableau 2. Description des quatre enclos d'hivernage

	Enclos d'hivernage			
	1	2	3	4
Caractéristiques				
Période d'occupation	Mi-décembre à la mi-avril	Mi-décembre à la mi-avril	Mi-novembre à la mi-décembre et mi-avril à la mi-mai	Mi-novembre à la mi-décembre et mi-avril à la mi-mai
Densité animale	150 m ² vache ⁻¹	150 m ² vache ⁻¹	30 m ² vache ⁻¹	5 m ² vache ⁻¹
Dimension	28,8 x 50,5 m	28,8 x 50,5 m	12 x 30 m	5 x 12 m
Superficie	1 454,4 m ²	1 454,4 m ²	360 m ²	60 m ²
Pente	3 %	3 %	1,5 %	1 %
Type de sol	Loam sableux	Loam sableux	Loam sableux	Surface bétonnée
Végétation	Alpiste roseau	Alpiste roseau	-	-
Litière				
Type	Paille	Paille et ripe	Copeaux	Ripe
Quantité appliquée au début de la période d'occupation	7,6 cm sur 20 % de la surface	7,6 cm sur 20 % de la surface	60 cm sur 100 % de la surface	15 cm sur 100 % de la surface
Quantité appliquée à tous les jours d'occupation	-	3 kg vache ⁻¹ jour ⁻¹	-	6,5 kg vache ⁻¹ jour ⁻¹

4.3 Animaux

Durant le projet, des vaches de différentes races pur-sang ou croisées ont été achetées pour occuper les enclos. Les performances animales n'ont pas été étudiées. En moyenne durant le projet, les vaches avaient une masse de 550 kg. La consommation moyenne de foin était de 14,7 kg jour⁻¹.

4.4 Échantillonnage et analyse des eaux

4.4.1 Échantillonnage des eaux de ruissellement

Les eaux de ruissellement des enclos étaient captées par un fossé recouvert d'une membrane de PVC construit en aval des enclos (figure 2). À partir du fossé, les eaux de ruissellement étaient transportées par gravité vers la station d'échantillonnage. Après échantillonnage, l'eau était pompée vers un tuyau de PVC perforé installé en amont des bandes végétatives filtrantes (figure 3).

Le même type de fossé a été construit en aval des bandes végétatives filtrantes pour capter les eaux de ruissellement. Au bout de chacun des fossés, un réservoir a été installé,

pour permettre la mesure du volume et l'échantillonnage des eaux de ruissellement (figure 4). Les volumes d'eau de ruissellement provenant des bandes végétatives filtrantes ont été mesurés seulement à partir de l'été 2000 suite à la construction du fossé en aval des bandes.

4.4.2 Échantillonnage des eaux de percolation

Des cases lysimétriques constituées d'une membrane de PVC ont été installées pour recueillir les eaux de percolation à 1 m de profondeur. Six cases lysimétriques (de 1 m x 1 m x 1 m) ont été installées dans chacun des enclos 1 et 2, quatre dans l'enclos 3 et trois par bande végétative filtrante.

Les eaux de percolation des enclos d'hivernage étaient acheminées par gravité vers la station d'échantillonnage. Le volume des eaux de percolation provenant de chaque case lysimétrique était calculé automatiquement par des pluviomètres à bascule.

Les eaux de percolation des bandes végétatives filtrantes étaient acheminées et échantillonnées dans un puits d'accès, construit à côté de la case lysimétrique.

4.4.3 Analyse des eaux

Les échantillonnages des eaux de ruissellement et de percolation pour les analyses chimiques et les analyses des coliformes fécaux étaient réalisés simultanément lorsque la quantité d'eau accumulée dans les pluviomètres était suffisante.

Les échantillonnages n'ont pas été réalisés systématiquement à tous les jours où il y avait du ruissellement mais sur une base d'événements. Par exemple, plusieurs jours de pluie combinés à plusieurs jours de ruissellement ont été considérés comme un événement. L'échantillonnage était donc réalisé lorsque l'eau de ruissellement cessait de s'accumuler dans la station d'échantillonnage. De plus, pour être échantillonné et analysé par la suite, l'événement devait avoir permis d'accumuler au moins 500 ml d'eau.

4.5 Échantillonnage des sols

Les sols des enclos d'hivernage et des bandes végétatives filtrantes ont été échantillonnés à trois différentes profondeurs (30, 60 et 90 cm) à proximité des cases lysimétriques. Les échantillonnages ont eu lieu en novembre 1999 avant le début du projet et, par la suite, deux fois par année durant les mois de mai et d'octobre.

Dans le cadre d'un autre projet réalisé par l'IRDA, un échantillonnage des sols des enclos d'hivernage et des bandes végétatives filtrantes a été réalisé au mois d'octobre 2007 suivant le même protocole. Le site n'ayant pas été utilisé durant les quatre dernières années, cet échantillonnage devait permettre de vérifier l'état du sol après une période de repos.



Source : Michel Côté (IRDA)

Figure 2. Fossé intercepteur pour le captage des eaux de ruissellement en aval des enclos d'hivernage



Source : Michel Côté (IRDA)

Figure 3. Tuyau de PVC perforé installé en amont des bandes végétatives filtrantes pour rediriger les eaux de ruissellement des enclos d'hivernage



Source : Michel Côté (IRDA)

Figure 4. Fossé intercepteur pour le captage des eaux de ruissellement en aval des bandes végétatives filtrantes

4.6 Méthodes d'analyse des résultats

4.6.1 Analyse statistique

Le dispositif expérimental en place ne permet pas de réaliser une analyse statistique comparative conventionnelle (ex.: ANOVA). Le principal défaut du dispositif est qu'il n'y a pas de répétitions dans le plan d'expérience. Même si l'échantillonnage s'est échelonné sur une période de quatre ans, les années ne peuvent être considérées comme des répétitions puisque les caractéristiques du sol changent en accumulant les éléments fertilisants. Le seul moyen d'obtenir des répétitions aurait été d'avoir au mois deux enclos identiques en même temps.

L'absence d'une parcelle témoin, non contaminée par le fumier des vaches, limite aussi l'analyse des résultats. L'analyse des eaux de ruissellement et de percolation d'une parcelle témoin aurait permis d'établir les concentrations et les charges de base en éléments fertilisants sur le site.

4.6.2 Températures et précipitations

Les conditions météo (température et précipitations) proviennent de la station météo d'Environnement Canada à Deschambault (# 7011982; latitude 46.67 et longitude -71.92; altitude 15,2 m; Environnement Canada, 2007). La station météo est située à moins de 100 m des enclos d'hivernage. Les températures moyennes annuelles et les précipitations totales annuelles de pluie et de neige de 1999 à 2003 ainsi que la moyenne sur 30 ans de 1971 à 2000 ont été utilisées à titre comparatif.

4.6.3 Éléments fertilisants dans les eaux

Les concentrations obtenues dans les eaux de ruissellement et dans les eaux de percolation ont été comparées aux critères de qualité de l'eau du MDDEP (MDDEP, 2007). Les critères de qualité de l'eau du N-NH₄, N-NO₃ et P_{total} sont respectivement de 1,5 mg L⁻¹, 10 mg L⁻¹ et 30 µg L⁻¹ (MDDEP, 2007). Les charges annuelles d'éléments fertilisants perdues dans les eaux de ruissellement ont été obtenues en multipliant les concentrations d'éléments fertilisants par le volume d'eau de ruissellement. Les charges dans les eaux de percolation n'ont pas été déterminées car seuls des échantillonnages ponctuels ont été réalisés.

L'efficacité des bandes végétatives filtrantes à capter les éléments fertilisants contenus dans les eaux de ruissellement des enclos d'hivernage a été calculée à l'aide de l'équation 1 :

$$\text{Efficacité} = \frac{C_{\text{entrée}} - C_{\text{sortie}}}{C_{\text{entrée}}} \times 100 \quad [1]$$

où $C_{entrée}$ est la charge annuelle d'éléments fertilisants en kg ha^{-1} à l'entrée de la bande végétative filtrante et C_{sortie} est la charge annuelle d'éléments fertilisants en kg ha^{-1} à la sortie de la bande végétative filtrante.

4.6.4 Éléments fertilisants dans les sols

Les concentrations et les taux de saturation d'éléments fertilisants dans les sols ont été déterminés à partir des résultats d'échantillonnage et d'analyse des sols. L'analyse des concentrations mesurées à différents endroits dans les enclos d'hivernage et les bandes végétatives filtrantes a aussi été réalisée. Les éléments analysés dans les échantillons de sol étaient le N-NO₃, le N-NH₄, le K et le P.

Les enclos d'hivernage 1 et 2 et les quatre bandes végétatives filtrantes ont été divisés en trois parties soit le haut, le milieu et le bas. L'enclos d'hivernage 3 a été divisé en deux parties soit, le haut et le bas (figure 1).

4.6.5 Coliformes fécaux dans les eaux

Les concentrations de coliformes fécaux ont été traitées de la même façon que les concentrations d'éléments fertilisants dans les eaux de percolation, soit en regroupant les concentrations obtenues à différents intervalles. Les intervalles ont été établis selon les critères de qualité de l'eau du MDDEP (2007). Les différents intervalles retenus sont : 0 UFC 100 ml⁻¹; 1 à 200 UFC 100 ml⁻¹; 201 à 999 UFC 100 ml⁻¹ et plus de 1 000 UFC 100 ml⁻¹.

4.6.6 Bilan des pertes

Un bilan massique a été réalisé sur les principaux éléments fertilisants, soit l'azote et le phosphore, dans les enclos d'hivernage et les bandes végétatives filtrantes. La réalisation du bilan a permis de constater que le plan d'expérimentation n'a pas été conçu de façon à évaluer en détail le mouvement des éléments fertilisants de l'entrée des enclos d'hivernage à la sortie des bandes végétatives filtrantes. Les principales données manquantes étaient les suivantes :

- L'analyse des intrants, tels que le foin utilisé pour nourrir les vaches, de même que la paille et la ripe utilisées comme litière;
- L'analyse de fumier frais (sous la queue des vaches);
- Les mesures de volume de l'eau de percolation;
- Les mesures de rendement des cultures récoltées dans les enclos d'hivernage et les bandes végétatives filtrantes.

Pour pallier le manque de certaines données, les valeurs manquantes ont été évaluées selon les hypothèses suivantes :

- Des valeurs moyennes provenant de sources diverses ont été trouvées pour estimer les teneurs en azote et en phosphore du foin utilisé pour nourrir les vaches, de même que la paille, la ripe et les copeaux utilisés comme litière. Les teneurs en azote et en

phosphore du foin utilisé pour nourrir les vaches, perdu sous forme de litière, étaient respectivement de $13,6 \text{ kg N t}^{-1}$ et $4,08 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ t}^{-1}$ (Robitaille, 2001). Les teneurs en azote et phosphore de la paille étaient respectivement de $4,5 \text{ kg t}^{-1}$ et $1,5 \text{ kg t}^{-1}$, celles de la ripe de $1,1 \text{ kg t}^{-1}$ et $0,1 \text{ kg t}^{-1}$ et celles des copeaux de $1,0 \text{ kg t}^{-1}$ et $0,0 \text{ kg t}^{-1}$ (Marquis et Désilets, 2000);

- Les volumes de l'eau de drainage dans les enclos d'hivernage et dans les bandes végétatives filtrantes ont été estimés en faisant l'hypothèse que les volumes d'eau drainés annuellement équivalaient à des volumes d'eau équivalents à la surface de l'enclos ou de la bande multipliés par $0,3 \text{ m}$ d'épaisseur;
- Les valeurs références publiées dans ASAE (2005) ont été utilisées pour estimer les quantités d'azote et de phosphore produites par les vaches. Les concentrations d'azote et de phosphore dans le fumier produit par les vaches étaient de respectivement $0,19 \text{ kg N jour}^{-1} \text{ vache}^{-1}$ et de $0,044 \text{ kg P jour}^{-1} \text{ vache}^{-1}$;
- Les rendements annuels des cultures d'alpiste roseau dans les enclos d'hivernage et du mélange de mil et de brome dans les bandes végétatives filtrantes ont été arbitrairement fixés à 6 t ha^{-1} avec un taux de matière sèche de 85% . Les prélèvements d'azote et de phosphore des cultures de foin ont été fixés à $23,5 \text{ kg N t}^{-1}$ et à $7,6 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ t}^{-1}$ (CRAAQ, 2003).

Les hypothèses suivantes ont été posées pour compléter le bilan :

- Les valeurs utilisées étaient des moyennes pour les quatre années du projet;
- Les caractéristiques (concentrations d'éléments fertilisants et masse) du fumier récolté dans les enclos d'hivernage ont été tirées des valeurs présentées dans Pelletier et al. (2004);
- Les pertes par ruissellement utilisées ont été tirées des valeurs présentées aux tableaux 7 à 14;
- La consommation de foin des vaches dans les enclos d'hivernage 1 et 2 était de $16,0 \text{ kg jour}^{-1} \text{ vache}^{-1}$ et de $13,5 \text{ kg jour}^{-1} \text{ vache}^{-1}$ dans les enclos 3 et 4;
- Les temps de séjour des vaches dans les enclos 1 et 2 ont été fixés à 120 jours et à 60 jours dans les enclos 3 et 4;
- Les accumulations ou les pertes d'azote et de phosphore dans le sol des enclos d'hivernage et des bandes végétatives filtrantes ont été calculées en divisant par quatre la différence entre la concentration en octobre 2003 et la concentration en novembre 1999. Puisque les différences entre les bandes végétatives filtrantes étaient minimales, les concentrations d'azote et de phosphore dans le sol ont été considérées identiques pour les quatre bandes;
- Les accumulations ou les pertes d'éléments fertilisants dans les sols et les eaux de percolation ont été calculées par tiers d'enclos d'hivernage et de bandes végétatives filtrantes.

Les bilans d'azote et de phosphore dans les enclos d'hivernage sont présentés sous les formes de N et de P_2O_5 , tandis que dans les bandes végétatives filtrantes, les bilans sont présentés sous forme de N-NH_4 et de P_2O_5 .

5 Résultats et discussion

5.1 Conditions climatiques

Le tableau 3 présente les températures moyennes annuelles et les précipitations totales annuelles de pluie et de neige de 1999 à 2003, ainsi que la moyenne sur 30 ans de 1971 à 2000. La figure 5 présente les températures moyennes mensuelles durant le projet comparées aux températures moyennes mensuelles sur 30 ans (1971 à 2000). La figure 6 présente les précipitations totales par mois (pluie et neige) durant le projet, comparées à la moyenne des précipitations totales sur 30 ans

Pour les cinq années couvertes par le projet, les précipitations totales ont été supérieures à la moyenne durant les années 1999, 2000 et 2003 et inférieures à la moyenne durant les années 2001 et 2002. Les quantités de pluie reçues ont été supérieures à la moyenne en 1999 et en 2003 et inférieures à la moyenne pour les années 2000, 2001 et 2003. Les précipitations de pluie ou les quantités de pluie les plus importantes ont été observées durant les mois précédant le début du projet en 1999 et les mois suivant la fin du projet en 2003. Les chutes de neige les plus importantes ont été observées durant l'année 2000. Les plus grands écarts par rapport à la moyenne ont été observés durant les mois de janvier (+40 %) et décembre (+110 %).

À l'exception de l'année 2003, les températures moyennes annuelles durant le projet ont été supérieures à la moyenne. Les températures moyennes supérieures à la moyenne ont été majoritairement observées durant les mois de janvier et février 2000, 2001 et 2002. L'hiver 2003 a été plus froid que la moyenne.

Tableau 3. Températures moyennes annuelles et précipitations totales annuelles de pluie et de neige de 1999 à 2003 et la moyenne sur 30 ans de 1971 à 2000

Année	Température	Pluie	Neige	Total des précipitations
	°C	mm	cm	mm
1999	6,3	968	192	1 160
2000	4,9	864	301	1 165
2001	6,0	754	209	963
2002	5,2	695	249	944
2003	4,5	1 049	227	1 276
Moyenne 5 ans	5,4	866	236	1 102
Moyenne 30 ans	4,5	927	213	1 140

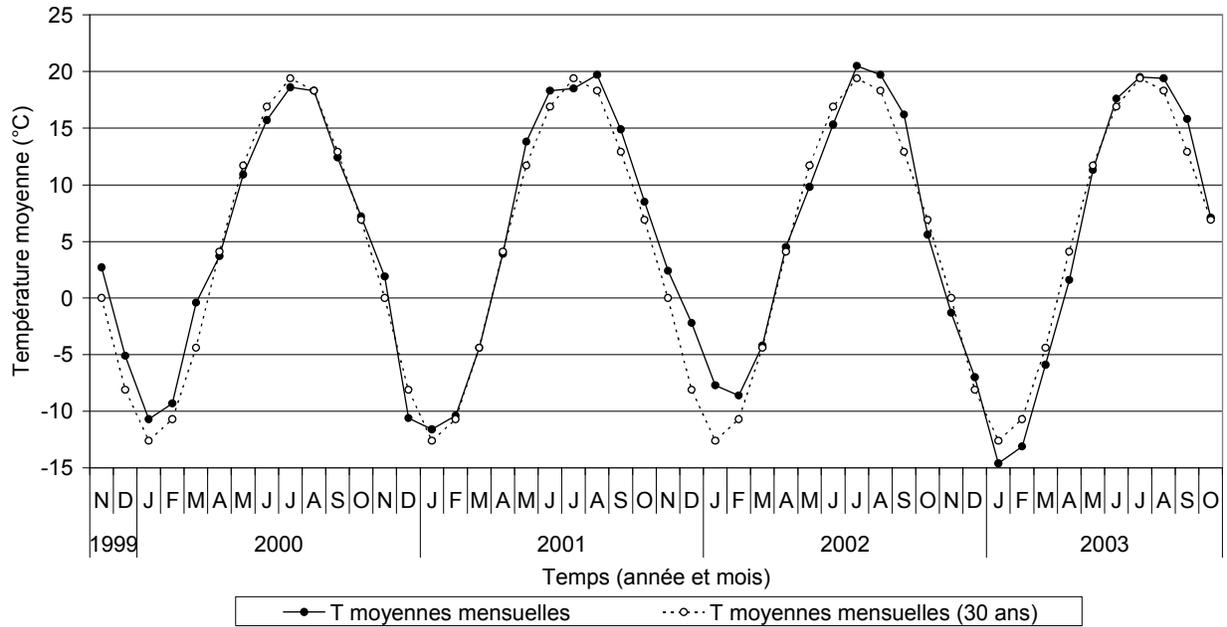


Figure 5. Températures moyennes mensuelles durant le projet comparées aux températures moyennes mensuelles sur 30 ans (1971 à 2000)

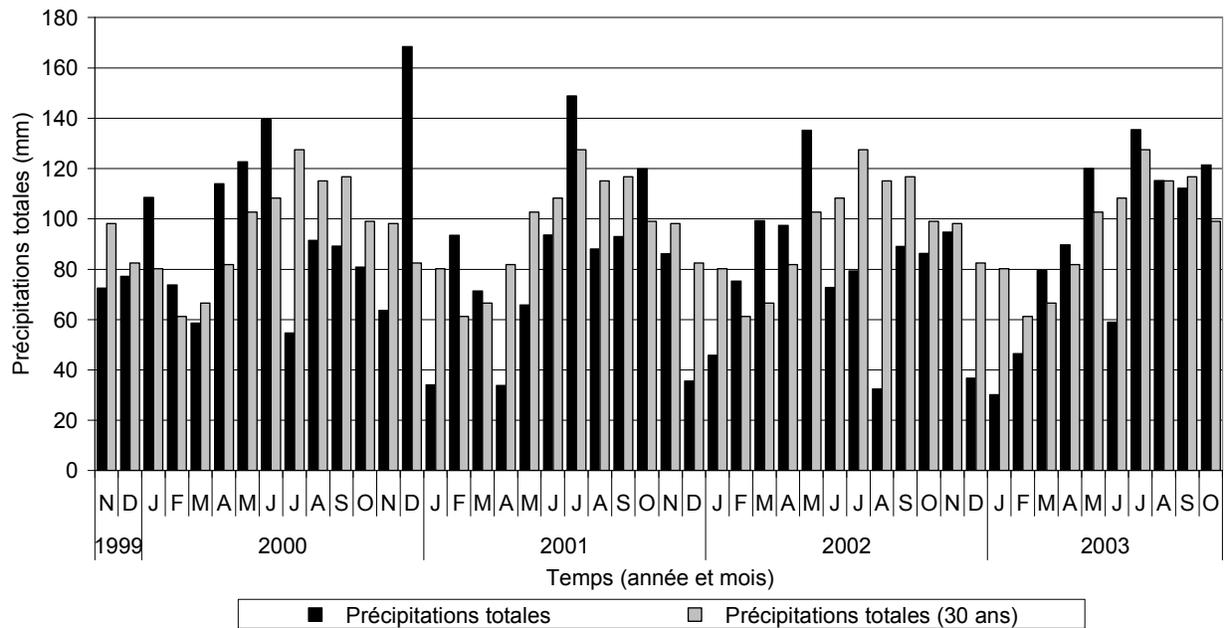


Figure 6. Précipitations totales par mois (pluie et neige) durant le projet comparées à la moyenne des précipitations totales sur 30 ans

5.2 Précipitations et ruissellement

Le tableau 4 présente les volumes d'eau de précipitation et les volumes d'eau de ruissellement, ainsi que le rapport du volume d'eau de ruissellement sur le volume d'eau de précipitation pour les enclos d'hivernage et les bandes végétaives filtrantes. Les tableaux 5 et 6 présentent respectivement la répartition du volume d'eau de ruissellement par mois pour les quatre enclos d'hivernage et les quatre bandes végétaives filtrantes. Les valeurs présentées dans ces trois tableaux sont des valeurs moyennes pour les quatre années du projet.

La quantité d'eau de ruissellement provenant de l'enclos 1 était plus élevée que celle provenant de l'enclos 2 ($478 \text{ m}^3 \text{ année}^{-1}$ vs $306 \text{ m}^3 \text{ année}^{-1}$). Cette différence s'explique par la présence de litière dans l'enclos 2 qui a eu pour effet de favoriser l'infiltration de l'eau dans le sol.

Année après année, les volumes d'eau ruisselés par rapport aux volumes de précipitation sont demeurés sensiblement les mêmes pour les enclos 1 et 2 même si des variations ont été observées au niveau des précipitations totales. Le volume d'eau ruisselé de l'enclos 1 correspondait en moyenne à 30 % du volume d'eau de précipitation tandis que pour l'enclos 2, le volume d'eau ruisselé correspondait à 19 %.

La plus grande partie du volume d'eau ruisselé des enclos 1 et 2 a été observée durant les mois de mars, avril et mai. Durant cette période, pour ces deux enclos, les valeurs obtenues étaient sensiblement identiques, 71 et 75 % du ruissellement annuel était concentré durant les mois de mars, avril et mai. Ces mois correspondent à la fonte des neiges.

Le volume d'eau ruisselé provenant de l'enclos 3 était en moyenne 128 m^3 par année, celui de la première année était égal à 97 m^3 comparativement à 144, 134 et 137 m^3 pour les années suivantes. Le lit de copeaux utilisé pour recouvrir le sol de l'enclos 3 a absorbé une certaine quantité d'eau la première année pouvant expliquer l'augmentation du ruissellement les années subséquentes. En proportion, la première année, le volume d'eau ruisselé a représenté 23 % du volume d'eau de précipitation comparé à 41, 39 et 29 % pour les trois années suivantes.

Durant les quatre années du projet, le volume d'eau de ruissellement provenant de l'enclos 4 a varié entre 46 et $72 \text{ m}^3 \text{ année}^{-1}$ pour une moyenne de $62 \text{ m}^3 \text{ année}^{-1}$. Le volume d'eau ruisselé par rapport au volume d'eau de précipitation était en moyenne de 96 %. La plus grande partie du volume d'eau ruisselé des enclos 3 et 4 a été observée durant les mois de mars et d'avril. Durant cette période, pour ces deux enclos, le volume d'eau ruisselé a représenté un peu plus de 40 % du total annuel. Pour les mois de mai à décembre, le volume d'eau ruisselé a représenté en moyenne 7 % du total annuel.

La répartition du volume d'eau de ruissellement par mois à partir des bandes végétaives filtrantes est présentée au tableau 6. Pour les quatre bandes, entre 88 et 96 % du ruissellement total annuel s'écoulait durant les mois de mars et avril. En moyenne, le ruissellement total provenant de la bande végétaive filtrante 1 était de 256 m^3

comparativement à 186 m³ pour la bande végétative filtrante 2. Une quantité d'eau supérieure provenant de l'enclos 1 a provoqué un ruissellement plus important en aval de la bande végétative filtrante 1.

Comparativement aux enclos d'hivernage, des variations plus importantes du volume d'eau de ruissellement ont été observées sur les bandes végétatives filtrantes. Pour les quatre bandes végétatives filtrantes, le volume d'eau de ruissellement était beaucoup plus élevé durant la dernière année. La formation de chemins d'écoulement préférentiel à la surface des bandes végétatives filtrantes peut avoir contribué à augmenter le volume d'eau de ruissellement tout en réduisant l'infiltration d'eau. Les observations réalisées durant le projet n'ont pas permis d'identifier précisément la ou les raisons de cette augmentation de volume.

Tableau 4. Rapport du volume d'eau de ruissellement sur le volume d'eau de précipitation pour les enclos d'hivernage et les bandes végétatives filtrantes (valeurs moyennes pour les quatre années du projet)

Enclos d'hivernage ou bande végétative filtrante	Volume d'eau de précipitation sur l'enclos ou la bande		Volume d'eau de ruissellement provenant de l'enclos ou de la bande		Rapport du volume d'eau de ruissellement sur le volume d'eau de précipitation
	mm	m ³ année ⁻¹	mm	m ³ année ⁻¹	%
EH 1	1 087	1 581	329	478	30
EH 2	1 087	1 581	210	306	19
EH 3	1 087	391	356	128	34
EH 4	1 087	65	1 027	62	96
BVF 1	1 087	1 435	194	256	18
BVF 2	1 087	1 435	141	186	12
BVF 3	1 087	1 435	133	175	12
BVF 4	1 087	1 435	142	188	13

Tableau 5. Répartition du volume d'eau de ruissellement par mois pour les quatre enclos d'hivernage (valeurs moyennes pour les quatre années du projet)

Mois*	Enclos 1		Enclos 2		Enclos 3		Enclos 4	
	Total	Proportion	Total	Proportion	Total	Proportion	Total	Proportion
	m ³	%						
Janvier	0,2	0,0	0,3	0,1	1,9	1,5	0,7	1,1
Février	1,4	0,3	1,5	0,5	3,4	2,7	1,4	2,2
Mars	111,7	23,3	77,7	25,4	20,4	15,9	8,3	13,6
Avril	190,0	39,7	129,5	42,4	33,6	26,2	16,8	27,3
Mai	38,5	8,0	23,7	7,8	10,8	8,4	4,5	7,3
Juin	8,6	1,8	4,6	1,5	6,3	4,9	3,5	5,6
Juillet	13,6	2,8	9,5	3,1	9,1	7,1	5,0	8,2
Août	13,3	2,8	9,1	3,0	7,3	5,7	3,9	6,3
Septembre	13,8	2,9	6,7	2,2	6,4	5,0	4,8	7,8
Octobre	34,9	7,3	14,6	4,8	11,9	9,3	5,9	9,5
Novembre	18,3	3,8	6,9	2,3	9,0	7,0	4,2	6,9
Décembre	34,1	7,1	21,7	7,1	8,1	6,3	2,6	4,2
Total	478	100	306	100	128	100	62	100

* Les mois problématiques sont soulignés en gris.

Tableau 6. Répartition du volume d'eau de ruissellement par mois pour les quatre bandes végétatives filtrantes (valeurs moyennes pour les quatre années du projet)

Mois*	BVF 1		BVF 2		BVF 3		BVF 4	
	Total	Proportion	Total	Proportion	Total	Proportion	Total	Proportion
	m ³	%						
Janvier	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	0,2
Février	0,4	0,2	0,0	0,0	0,3	0,1	0,2	0,1
Mars	155,2	60,5	95,3	51,3	88,0	50,2	76,4	40,6
Avril	76,1	29,7	82,9	44,6	78,5	44,8	89,8	47,8
Mai	1,1	0,4	0,0	0,0	0,9	0,5	4,1	2,2
Juin	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Juillet	11,5	4,5	5,4	2,9	2,7	1,5	5,3	2,8
Août	0,5	0,2	0,0	0,0	0,3	0,2	2,0	1,0
Septembre	0,2	0,1	0,0	0,0	0,4	0,2	1,0	0,5
Octobre	6,5	2,5	0,6	0,3	2,2	1,3	5,3	2,8
Novembre	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,6	0,3
Décembre	4,9	1,9	1,7	0,9	1,9	1,1	3,0	1,6
Total	256	100	186	100	175	100	188	100

* Les mois problématiques sont soulignés en gris.

5.3 Éléments fertilisants dans les eaux

5.3.1 Eaux de ruissellement

Enclos d'hivernage

Les concentrations moyennes et les charges d'éléments fertilisants retrouvées à chaque mois dans les eaux de ruissellement des enclos d'hivernage sont présentées aux tableaux 7 à 10. L'analyse de ces tableaux montre que les mois de mars, avril et mai avaient généré les plus grands volumes d'eau de ruissellement.

Plus de 70 % des eaux de ruissellement des enclos 1 et 2 s'écoulaient durant les mois de mars, avril et mai. Ces eaux contenaient plus de 93 % des charges de N-NH₄, N_{total} et P_{total}.

Les pertes d'éléments fertilisants dans les eaux de ruissellement ont également été problématiques au mois de décembre. En général, les vaches ont fait leur entrée dans les

enclos 1 et 2 au début du mois de décembre lorsque le sol était gelé. À cette période, les concentrations d'éléments fertilisants dans les eaux de ruissellement des enclos 1, 3 et 4 étaient plus élevées. Ce phénomène s'explique par une augmentation des précipitations (pluie et neige), combinées à un sol gelé favorisant les pertes par ruissellement au détriment de l'infiltration.

En général, durant les mois de mars, avril et mai, les concentrations moyennes d'éléments fertilisants dans les eaux de ruissellement de l'enclos 1 étaient plus élevées que dans les eaux de ruissellement de l'enclos 2. Durant ces trois mois, les concentrations de N-NH₄ dans les eaux de ruissellement de l'enclos 1, ont varié entre 25,8 et 131,4 mg L⁻¹ comparativement à entre 25,5 et 49,9 mg L⁻¹ dans les eaux de l'enclos 2. Cette réduction de la charge dans les eaux de ruissellement de l'enclos 2 est due à la présence de litière qui a eu pour effet de retenir l'eau et les éléments fertilisants.

Le cas du N-NO₃ est différent de ceux des trois autres éléments étudiés, les concentrations mesurées dans les eaux et les charges retrouvées à la sortie des enclos étaient plus importantes durant les mois de juillet, août, septembre et octobre. Comparativement à celles des autres éléments, les charges mesurées pendant les mois de mars, avril et mai représentaient seulement environ 20 % de la charge annuelle. Un peu plus de 70 % de la charge de N-NO₃ contenue dans les eaux de ruissellement des enclos 1 et 2 s'écoulait durant les mois de juillet, août, septembre et octobre.

Les concentrations de P_{total} mesurées dans les eaux de ruissellement des quatre enclos diminuaient après le mois de mai mais restaient tout de même relativement élevées entre les mois de juin et octobre. Par contre, l'impact sur la quantité annuelle de phosphore perdue dans les eaux de ruissellement était relativement faible puisque durant cette période, le volume d'eau de ruissellement était moins important.

Rapportées en kg ha⁻¹, les pertes annuelles de N-NH₄, N-NO₃, N_{total} et P_{total} étaient respectivement de 219, 2,1, 313 et 8,7 dans l'enclos 1 comparativement à 68, 1,3, 102 et 4,5 dans l'enclos 2.

Les pertes par ruissellement des enclos 3 et 4 sont sensiblement les mêmes que celles des enclos 1 et 2. La majorité de l'eau de ruissellement et de la charge s'écoulait durant les mois de mars, avril et mai. Rapportées en kg ha⁻¹, les pertes annuelles de N-NH₄, N-NO₃, N_{total} et P_{total} étaient respectivement de 5,9, 11, 23 et 6,1 dans l'enclos 3 comparativement à 177, 21, 280 et 30 dans l'enclos 4.

Les valeurs de concentrations d'azote total et de N-NO₃ obtenues dans les enclos 1 et 2 en période de ruissellement important sont sensiblement identiques à celles présentées par Miller et al. (2004). En moyenne, les concentrations d'azote total et de N-NO₃ obtenues par Miller et al. (2004) étaient de 85,7 et de 3,4 mg L⁻¹. Les valeurs obtenues durant le projet pour l'enclos 2 étaient en moyenne de 54,2 mg L⁻¹ pour l'azote total (entre mars et mai) et de 2,3 mg L⁻¹ pour le N-NO₃ (entre juillet et octobre). Pour les mêmes périodes, les concentrations d'azote total et de N-NO₃ dans les eaux de ruissellement de l'enclos 1 étaient respectivement de 111 mg L⁻¹ et de 3,1 mg L⁻¹. Les concentrations de phosphore total obtenues par Miller et al. (2004) étaient en moyenne dix fois supérieures aux

concentrations obtenues dans le projet, et ce pour les quatre enclos. Une densité animale beaucoup plus élevée ($19 \text{ m}^2 \text{ vache}^{-1}$ vs $150 \text{ m}^2 \text{ vache}^{-1}$) pourrait expliquer ces différences.

Les concentrations de N-NH₄ à la sortie des enclos d'hivernage ont pratiquement toujours excédé $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ durant les mois de mars, avril, mai et décembre. Des dépassements ont aussi été observés à quelques occasions durant les autres mois de l'année.

Les concentrations de N-NO₃ n'ont jamais dépassé le critère de 10 mg L^{-1} . Cependant, plusieurs valeurs se retrouvent tout de même entre 5 et 10 mg L^{-1} .

Les concentrations de phosphore total dans les eaux de ruissellement des enclos d'hivernage ont dépassé le critère de $30 \mu\text{g L}^{-1}$ à plusieurs reprises et ce, dans tous les enclos. De plus, en ce qui concerne les concentrations de phosphore total mesurées, il ne semble pas y avoir de différence entre les enclos.

Bandes végétatives filtrantes

Les concentrations moyennes et les charges d'éléments fertilisants retrouvées à chaque mois dans les eaux de ruissellement des bandes végétatives filtrantes sont présentées aux tableaux 11 à 14.

Entre 88 et 96 % du volume d'eau de ruissellement provenant des quatre bandes végétatives filtrantes s'écoulait durant les mois de mars et avril lorsque la surface du sol était encore recouverte de neige. Un faible pourcentage des eaux de ruissellement s'écoulait au mois de mai.

Plus de 90 % de la charge annuelle d'éléments fertilisants s'écoulait durant les mois de mars et avril. Les concentrations d'éléments fertilisants mesurées dans les eaux de ruissellement des bandes végétatives filtrantes étaient en général significativement inférieures, et de beaucoup, aux concentrations mesurées dans les eaux de ruissellement des enclos d'hivernage.

Sur une base de charges annuelles moyennes, les bandes végétatives filtrantes permettent de réduire les quantités d'éléments fertilisants perdues dans les eaux de ruissellement. Les résultats obtenus pour les quatre bandes végétatives filtrantes sont présentés au tableau 15. La combinaison de l'enclos d'hivernage 1 et de la bande végétative filtrante 1 a permis de réduire respectivement de 97, 76, 93 et 99 % les pertes de N-NH₄, N-NO₃, N_{total} et P_{total} dans les eaux de ruissellement. Les pourcentages d'efficacité de réduction entre la sortie des enclos et la sortie des bandes végétatives filtrantes étaient sensiblement les mêmes pour les combinaisons d'enclos d'hivernage et de bandes végétatives filtrantes 2, 3 et 4.

Même si les concentrations et les charges moyennes d'éléments fertilisants provenant des enclos 2, 3 et 4 étaient généralement inférieures à celles de l'enclos 1, les bandes végétatives filtrantes 2, 3 et 4 n'avaient pas un pourcentage d'efficacité supérieur.

En comparaison avec l'enclos 2, l'enclos 1 rejette beaucoup plus d'eau de ruissellement ($478 \text{ m}^3 \text{ année}^{-1}$ vs $306 \text{ m}^3 \text{ année}^{-1}$ pour l'enclos 2; tableau 4) avec des charges annuelles d'éléments fertilisants plus élevées (environ le double en kg ha^{-1}). Cependant, à l'exception du volume d'eau de ruissellement, qui est plus élevé à la sortie de la bande végétative filtrante 1 ($256 \text{ m}^3 \text{ année}^{-1}$ vs $186 \text{ m}^3 \text{ année}^{-1}$ pour la bande végétative filtrante 2; tableau 6), les concentrations et les charges d'éléments fertilisants dans les eaux de ruissellement des bandes végétatives filtrantes 1 et 2 (tableaux 11 et 12) ne semblaient pas affectées par les rejets des enclos.

Les concentrations de N-NH_4 dans les eaux de ruissellement des quatre bandes végétatives filtrantes ont dépassé $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ durant les mois de mars et avril. Un seul dépassement du critère a été observé par la suite, soit au mois d'octobre dans les eaux de ruissellement de la bande végétative filtrante 1.

Comme pour les eaux de ruissellement des enclos d'hivernage, les concentrations de N-NO_3 dans les eaux de ruissellement des bandes végétatives filtrantes n'ont jamais dépassé le critère de 10 mg L^{-1} .

Les concentrations de phosphore total dans les eaux de ruissellement des bandes végétatives filtrantes ont dépassé le critère de $30 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ pratiquement à tous les mois de mars et avril durant le projet. Les concentrations de phosphore total ont aussi dépassé $30 \text{ } \mu\text{g L}^{-1}$ durant les mois d'août; correspondant à la période de la deuxième coupe de foin. Ce phénomène n'a pas été observé au mois de juin puisque le volume de l'eau de ruissellement des bandes végétatives filtrantes était nul.

Selon les résultats obtenus dans le projet, les bandes végétatives filtrantes ne sont pas en mesure de capter et de retenir 100 % des éléments fertilisants contenus dans les eaux de ruissellement des enclos d'hivernage. De plus, certaines concentrations d'éléments fertilisants (N-NH_4 et P_{total}) retrouvées dans les eaux de ruissellement des bandes végétatives filtrantes étaient supérieures aux critères de qualité de l'eau pour la prévention de la contamination de l'eau ou des organismes aquatiques du MDDEP.

Tableau 7. Concentrations, charges et pourcentages mensuels d'éléments fertilisants dans les eaux de ruissellement de l'enclos d'hivernage 1

Mois*	N-NH ₄			N-NO ₃			N _{total}			P _{total}		
	mg/L	kg/ha	%	mg/L	kg/ha	%	mg/L	kg/ha	%	µg/L	kg/ha	%
Jan.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Fév.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Mars	131,4	100,9	46,0	0,1	0,1	4,9	167,8	128,9	41,2	3174	2,4	28,1
Avril	83,5	109,1	49,8	0,3	0,5	21,5	127,9	167,2	53,4	3553	4,6	53,4
Mai	25,8	6,8	3,1	0,1	0,04	1,8	37,7	10,0	3,2	4083	1,1	12,4
Juin	1,9	0,1	0,1	0,9	0,1	2,4	8,3	0,5	0,2	894	0,1	0,6
Juil.	1,1	0,1	0,04	1,7	0,2	7,6	6,5	0,6	0,2	2319	0,2	2,5
Août	0,2	0,02	0,01	4,9	0,4	20,9	8,1	0,7	0,2	891	0,1	0,9
Sept.	1,2	0,1	0,1	4,5	0,4	19,9	9,1	0,9	0,3	1	0,0	0,0
Oct.	0,1	0,04	0,02	1,3	0,3	14,7	2,3	0,6	0,2	731	0,2	2,0
Nov.	0,1	0,01	0,0	0,4	0,05	2,2	0,7	0,1	0,03	1	0,0	0,0
Déc.	9,0	2,1	1,0	0,4	0,1	4,2	15,2	3,6	1,1	3	0,0	0,01
Total		219	100		2,1	100		313	100		8,7	100

* Les mois problématiques sont soulignés en gris.

Tableau 8. Concentrations, charges et pourcentages mensuels d'éléments fertilisants dans les eaux de ruissellement de l'enclos d'hivernage 2

Mois*	N-NH ₄			N-NO ₃			N _{total}			P _{total}		
	mg/L	kg/ha	%	mg/L	kg/ha	%	mg/L	kg/ha	%	µg/L	kg/ha	%
Jan.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Fév.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Mars	35,9	19,2	28,2	0,3	0,2	14,2	46,6	24,9	24,4	2964	1,6	35,4
Avril	49,9	44,4	65,3	0,3	0,3	21,7	78,0	69,4	68,0	2339	2,1	46,5
Mai	25,5	4,2	6,1	0,2	0,04	3,0	37,9	6,2	6,0	3839	0,6	14,0
Juin	0,4	0,01	0,02	1,0	0,03	2,4	2,3	0,1	0,1	285	0,01	0,2
Juil.	0,2	0,01	0,02	5,5	0,4	28,3	9,3	0,6	0,6	1446	0,09	2,1
Août	0,2	0,01	0,02	1,8	0,1	8,6	3,6	0,2	0,2	864	0,05	1,2
Sept.	0,2	0,01	0,02	2,0	0,1	7,1	3,4	0,2	0,2	1	0,0	0,0
Oct.	0,1	0,01	0,01	1,2	0,1	9,4	1,8	0,2	0,2	279	0,03	0,6
Nov.	0,1	0,0	0,01	0,4	0,02	1,5	0,8	0,04	0,04	0,2	0,0	0,0
Déc.	1,1	0,2	0,2	0,3	0,05	3,9	2,1	0,3	0,3	0,2	0,0	0,0
Total		68	100		1,3	100		102	100		4,5	100

* Les mois problématiques sont soulignés en gris.

Tableau 9. Concentrations, charges et pourcentages mensuels d'éléments fertilisants dans les eaux de ruissellement de l'enclos d'hivernage 3

Mois*	N-NH ₄			N-NO ₃			N _{total}			P _{total}		
	mg/L	kg/ha	%	mg/L	kg/ha	%	mg/L	kg/ha	%	µg/L	kg/ha	%
Jan.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Fév.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Mars	0,3	0,2	2,6	1,0	0,6	5,1	1,8	1,0	4,4	379	0,2	3,5
Avril	1,7	1,6	26,1	6,4	6,0	53,0	10,8	10,1	44,2	1626	1,5	24,8
Mai	6,5	2,0	33,0	3,2	1,0	8,5	6,3	1,9	8,3	3509	1,1	17,2
Juin	0,3	0,1	1,0	8,8	1,5	13,7	13,3	2,3	10,3	699	0,1	2,0
Juil.	0,2	0,1	1,0	1,7	0,4	3,8	5,5	1,4	6,1	3295	0,8	13,6
Août	0,1	0,02	0,4	5,2	1,1	9,3	10,8	2,2	9,7	9017	1,8	30,1
Sept.	0,3	0,1	1,0	0,7	0,1	1,2	2,7	0,5	2,1	1	0,0	0,0
Oct.	0,1	0,02	0,3	0,3	0,1	0,9	1,5	0,5	2,2	1611	0,5	8,7
Nov.	0,02	0,01	0,1	0,6	0,2	1,4	1,0	0,2	1,1	0,3	0,0	0,0
Déc.	9,1	2,0	34,5	1,6	0,4	3,1	11,8	2,7	11,7	2	0,0	0,01
Total		5,9	100		11	100		23	100		6,1	100

* Les mois problématiques sont soulignés en gris.

Tableau 10. Concentrations, charges et pourcentages mensuels d'éléments fertilisants dans les eaux de ruissellement de l'enclos d'hivernage 4

Mois*	N-NH ₄			N-NO ₃			N _{total}			P _{total}		
	mg/L	kg/ha	%	mg/L	kg/ha	%	mg/L	kg/ha	%	µg/L	kg/ha	%
Jan.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Fév.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Mars	58,1	80,8	45,7	0,1	0,1	0,6	81,0	112,7	40,2	4307	6,0	19,9
Avril	23,4	65,5	37,0	6,7	18,8	90,5	36,8	102,9	36,7	5829	16,3	54,1
Mai	21,1	15,9	9,0	0,1	0,1	0,4	31,3	23,5	8,4	3463	2,6	8,6
Juin	13,1	7,6	4,3	0,8	0,5	2,3	42,4	24,6	8,8	4102	2,4	7,9
Juil.	0,8	0,7	0,4	0,4	0,4	1,8	5,7	4,7	1,7	1652	1,4	4,6
Août	0,2	0,1	0,1	0,5	0,3	1,5	1,8	1,2	0,4	916	0,6	2,0
Sept.	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,6	1,9	1,5	0,5	2	0,002	0,01
Oct.	0,04	0,04	0,02	0,2	0,2	0,9	0,6	0,6	0,2	891	0,9	2,9
Nov.	0,0	0,0	0,0	0,4	0,3	1,2	0,5	0,4	0,1	0,2	0,0	0,0
Déc.	14,6	6,4	3,6	0,02	0,01	0,1	18,4	8,0	2,9	2	0,001	0,004
Total		177	100		21	100		280	100		30	100

* Les mois problématiques sont soulignés en gris.

Tableau 11. Concentrations, charges et pourcentages mensuels d'éléments fertilisants dans les eaux de ruissellement de la bande végétative filtrante 1

Mois*	N-NH ₄			N-NO ₃			N _{total}			P _{total}		
	mg/L	kg/ha	%	mg/L	kg/ha	%	mg/L	kg/ha	%	µg/L	kg/ha	%
Jan.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Fév.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Mars	0,8	1,0	14,9	0,3	0,4	79,8	11,8	13,9	60,7	108	0,13	97,3
Avril	9,3	5,4	83,3	0,1	0,06	12,6	15,2	8,8	38,3	3	0,001	1,1
Mai	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Juin	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Juil.	0,1	0,01	0,1	0,3	0,03	5,8	0,7	0,06	0,3	0,05	0,0	0,0
Août	0,4	0,001	0,02	1,4	0,005	1,0	2,8	0,01	0,04	541	0,002	1,5
Sept.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Oct.	2,3	0,1	1,7	0,06	0,003	0,6	3,1	0,2	0,7	1	0,0	0,0
Nov.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Déc.	0,0	0,001	0,01	0,03	0,001	0,2	0,2	0,006	0,03	0,09	0,0	0,0
Total		6,5	100		0,5	100		23	100		0,13	100

* Les mois problématiques sont soulignés en gris.

Tableau 12. Concentrations, charges et pourcentages mensuels d'éléments fertilisants dans les eaux de ruissellement de la bande végétative filtrante 2

Mois*	N-NH ₄			N-NO ₃			N _{total}			P _{total}		
	mg/L	kg/ha	%	mg/L	kg/ha	%	mg/L	kg/ha	%	µg/L	kg/ha	%
Jan.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Fév.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Mars	7,9	5,7	61,6	0,02	0,01	7,2	11,9	8,6	58,7	624	0,45	81,4
Avril	5,7	3,6	38,4	0,3	0,2	91,7	9,5	6,0	41,0	164	0,1	18,6
Mai	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Juin	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Juil.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,03	0,2	0,1	0,0	0,0
Août	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Sept.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Oct.	0,0	0,0	0,0	0,3	0,001	0,7	0,5	0,002	0,01	0,1	0,0	0,0
Nov.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Déc.	0,0	0,0	0,0	0,05	0,001	0,3	0,2	0,002	0,02	0,1	0,0	0,0
Total		9,3	100		0,2	100		14,6	100		0,55	100

* Les mois problématiques sont soulignés en gris.

Tableau 13. Concentrations, charges et pourcentages mensuels d'éléments fertilisants dans les eaux de ruissellement de la bande végétative filtrante 3

Mois*	N-NH ₄			N-NO ₃			N _{total}			P _{total}		
	mg/L	kg/ha	%	mg/L	kg/ha	%	mg/L	kg/ha	%	µg/L	kg/ha	%
Jan.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Fév.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Mars	0,005	0,004	0,2	0,6	0,4	21,0	0,9	0,6	12,1	204	0,14	77,3
Avril	2,6	1,5	99,7	2,6	1,5	78,2	7,3	4,4	87,4	67	0,04	22,5
Mai	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Juin	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Juil.	0,04	0,001	0,1	0,2	0,005	0,2	0,5	0,01	0,2	0,2	0,0	0,0
Août	0,0	0,0	0,0	0,6	0,001	0,1	0,8	0,002	0,03	178	0,0004	0,2
Sept.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	0	0,0	0,0
Oct.	0,0	0,0	0,0	0,5	0,01	0,4	0,7	0,01	0,2	0,1	0,0	0,0
Nov.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0,0	0	0,0	0,0
Déc.	0,0	0,0	0,0	0,1	0,001	0,1	0,2	0,003	0,06	0,1	0,0	0,0
Total		1,5	100		2,0	100		5,0	100		0,2	100

* Les mois problématiques sont soulignés en gris.

Tableau 14. Concentrations, charges et pourcentages mensuels d'éléments fertilisants dans les eaux de ruissellement de la bande végétative filtrante 4

Mois*	N-NH ₄			N-NO ₃			N _{total}			P _{total}		
	mg/L	kg/ha	%	mg/L	kg/ha	%	mg/L	kg/ha	%	µg/L	kg/ha	%
Jan.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Fév.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Mars	1,4	0,8	32,1	0,2	0,1	8,8	2,7	1,6	25,6	367	0,2	67,5
Avril	2,5	1,7	67,7	1,5	1,0	86,1	6,5	4,4	72,1	135	0,09	29,2
Mai	0,0	0,001	0,04	0,9	0,03	2,3	1,3	0,04	0,7	129	0,004	1,3
Juin	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Juil.	0,02	0,001	0,04	0,0	0,0	0,0	0,7	0,03	0,5	0	0,0	0,0
Août	0,1	0,001	0,1	0,5	0,01	0,6	1,4	0,02	0,3	425	0,01	2,0
Sept.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0
Oct.	0,0	0,001	0,02	0,5	0,02	1,6	0,7	0,03	0,5	0,1	0,0	0,0
Nov.	0,0	0,0	0,001	0,5	0,002	0,2	0,6	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0
Déc.	0,1	0,003	0,1	0,2	0,004	0,4	0,8	0,02	0,3	0,1	0,0	0,0
Total		2,5	100		1,2	100		6,1	100		0,3	100

* Les mois problématiques sont soulignés en gris.

Tableau 15. Efficacité des bandes végétatives filtrantes pour le captage des éléments fertilisants contenus dans les eaux de ruissellement

Bande végétative filtrante	Éléments fertilisants			
	N-NH ₄	N-NO ₃	N _{total}	P _{total}
1	97 %	76 %	93 %	99 %
2	86 %	85 %	86 %	88 %
3	75 %	82 %	78 %	97 %
4	99 %	94 %	98 %	99 %

5.3.2 Eaux de percolation

Enclos d'hivernage

Les tableaux 16 à 19 présentent les concentrations de N-NH₄, N-NO₃, N_{total} et P_{total} dans les eaux de percolation récoltées dans les lysimètres installés dans les enclos d'hivernage. Les tableaux regroupent les concentrations moyennes, les valeurs médianes, les valeurs maximales et minimales, le nombre d'échantillons et les fréquences de mesure de différentes concentrations. Les valeurs présentées dans les tableaux sont des concentrations ponctuelles obtenues à partir d'échantillons récoltés dans les différents lysimètres.

L'analyse des tableaux 16 à 19 démontre que les concentrations d'éléments fertilisants étaient plus élevées dans le haut des enclos sous l'aire d'alimentation. Les concentrations moyennes et les valeurs médianes de N-NH₄, N-NO₃, N_{total} et P_{total} étaient en général au moins deux fois plus élevées dans l'enclos 2 que dans l'enclos 1. La présence de litière dans l'aire d'alimentation de l'enclos 2 a favorisé l'infiltration des éléments fertilisants dans le sol. Les concentrations mesurées ont dépassé les différents critères de qualité de l'eau dans au moins 50 % des échantillons.

Dans les eaux de percolation des lysimètres de l'enclos 3, les concentrations de N-NO₃ et de P_{total} étaient plus élevées que les concentrations mesurées dans les enclos 1 et 2. Cette différence est expliquée par la présence de copeaux qui a favorisé l'infiltration du phosphore dans le sol et la transformation de l'azote sous forme de nitrate.

Dans la majorité des cas pour les composés azotés (N-NO₃, N-NH₄ et N_{total}), plus de la moitié des échantillons ont dépassé les critères de qualité de l'eau du MDDEP. Pratiquement toutes les concentrations de phosphore ont dépassé le critère de qualité de l'eau du MDDEP de 30 µg L⁻¹.

Les concentrations de N-NO₃ observées étaient variables et elles se retrouvaient toutes dans le même ordre de grandeur que celles présentées par Olson et al. (2005) et par Maulé et Fonstad (2000).

Dans l'étude de Maulé et Fonstad (2000), les concentrations d'éléments fertilisants ont varié d'un site à l'autre, celles de N-NO₃ ont varié entre 0 et 341 mg L⁻¹, celles de N-NH₄ ont varié entre 0 et 26 mg L⁻¹ et celles de P_{total} ont varié entre 2,5 et 7,0 mg L⁻¹.

Dans l'étude d'Olson et al. (2005), la moyenne des concentrations de N-NO₃ obtenues dans les eaux de drainage était de 29 mg L⁻¹.

Bandes végétatives filtrantes

Les tableaux 20 à 23 présentent les concentrations de N-NH₄, N-NO₃, N_{total} et P_{total} dans les eaux de percolation des lysimètres installés dans les bandes végétatives filtrantes.

Les concentrations d'éléments fertilisants dans les eaux de percolation des lysimètres des bandes végétatives filtrantes étaient généralement plus élevées dans les bandes 1 et 2 que dans les bandes 3 et 4. Les eaux de percolation des bandes végétatives filtrantes 3 et 4 n'ont pas semblé affectées par ce qui s'est passé en amont dans les enclos d'hivernage 3 et 4.

Dans les eaux de percolation des lysimètres des bandes végétatives filtrantes 1 et 2, les concentrations d'éléments fertilisants étaient plus élevées dans le haut et dans le milieu que dans le bas des bandes. Généralement, les concentrations étaient plus élevées dans la bande végétative filtrante 1 que dans la bande végétative filtrante 2. Le critère de qualité de l'eau pour le phosphore total qui est de 30 µg l⁻¹ a été dépassé dans plus de 50 % des échantillons récoltés dans les bandes végétatives filtrantes 1 et 2.

Les concentrations de N-NO₃ obtenues dans les eaux de percolation des lysimètres des bandes végétatives filtrantes étaient sensiblement identiques à ce qui est mesuré au Québec. Giroux et al. (2003) rapportaient que la teneur en nitrates dans les drains sous les prairies se situait généralement entre 2 et 4 mg N-NO₃ L⁻¹. Ils ajoutaient aussi qu'une rotation maïs-soya-blé pouvait donner une concentration moyenne de près de 10 mg N-NO₃ L⁻¹ dans les eaux de drainage, soit 20 mg N-NO₃ L⁻¹ pour le maïs, 5 mg N-NO₃ L⁻¹ pour le soya et de 7 mg N-NO₃ L⁻¹ pour le blé. Les concentrations moyennes de N-NO₃ obtenues dans les eaux de percolation des enclos 2 et 3 étaient supérieures à ces valeurs.

Dans une étude réalisée par Giroux et Royer (2006), les concentrations moyennes pondérées de phosphore total aux drains sous les prairies étaient de 159 µg P L⁻¹ pour le fumier de bovins, de 210 µg P L⁻¹ pour la fumure minérale, de 269 µg P L⁻¹ pour le fumier de poulets et de 489 µg P L⁻¹ pour le lisier de porcs. Ces valeurs sont en général un peu plus élevées que celles mesurées dans les bandes végétatives filtrantes et plus basses que celles mesurées dans les enclos d'hivernage.

Tableau 16. Concentrations de N-NH₄ (mg/L) dans les eaux de percolation des enclos d'hivernage

Variables	Enclos 1			Enclos 2			Enclos 3	
	Haut	Milieu	Bas	Haut	Milieu	Bas	Haut	Bas
Moyenne	104	54	14	170	25	2,5	1,0	1,0
Médiane	91	24	0,9	105	7,6	1,0	0,2	0,2
Minimum	0	0	0	0	0	0	0	0
Maximum	300	672	187	701	206	28	12	19
Nombre*	76	74	66	60	67	65	81	88
Fréquences								
0 à 0,5	2	5	25	6	21	27	47	58
0,5 à 1,5	1	3	16	0	1	12	17	17
>1,5	73	66	25	54	45	26	17	12

* Nombre d'échantillons récoltés entre le 21 mars 2000 et le 27 octobre 2003.

Tableau 17. Concentrations de N-NO₃ (mg/L) dans les eaux de percolation des enclos d'hivernage

Variables	Enclos 1			Enclos 2			Enclos 3	
	Haut	Milieu	Bas	Haut	Milieu	Bas	Haut	Bas
Moyenne	11	12	4,7	34	23	5,1	90	28
Médiane	0,2	0,8	0,4	0	11	0,9	52	23
Minimum	0	0	0	0	0	0	3,5	0,1
Maximum	124	251	65	387	1226	47	315	72
Nombre*	76	74	66	61	67	65	81	88
Fréquences								
0 à 5	52	52	55	39	32	46	1	6
5 à 10	4	8	4	3	1	9	3	9
>10	20	14	7	19	34	10	77	73

* Nombre d'échantillons récoltés entre le 21 mars 2000 et le 27 octobre 2003.

Tableau 18. Concentrations de N_{total} (mg/L) dans les eaux de percolation des enclos d'hivernage

Variables	Enclos 1			Enclos 2			Enclos 3	
	Haut	Milieu	Bas	Haut	Milieu	Bas	Haut	Bas
Moyenne	133	75	23	244	55	9,7	106	33
Médiane	127	41	3,4	158	34	7,0	61	27
Minimum	0,5	0	0	3,4	3,4	0,4	3,8	0,6
Maximum	410	710	261	868	256	52	612	84
Nombre*	76	74	66	61	67	65	81	88
Fréquences								
0 à 0,5	0	2	5	0	0	2	0	0
0,5 à 1,0	1	2	3	0	0	4	0	1
>1,0	75	70	58	61	67	59	81	87

* Nombre d'échantillons récoltés entre le 21 mars 2000 et le 27 octobre 2003.

Tableau 19. Concentrations de P_{total} ($\mu\text{g/L}$) dans les eaux de percolation des enclos d'hivernage

Variables	Enclos 1			Enclos 2			Enclos 3	
	Haut	Milieu	Bas	Haut	Milieu	Bas	Haut	Bas
Moyenne	587	293	470	1577	704	211	775	1374
Médiane	94	46	37	395	139	80	222	521
Minimum	3	1	0	11	17	6,1	3,0	8,2
Maximum	13105	11290	13156	15908	15922	4364	16417	19180
Nombre*	76	74	66	61	67	64	81	88
Fréquences								
0 à 20	11	18	27	4	3	10	10	8
20 à 30	5	11	4	1	5	2	4	2
>30	60	45	35	56	59	52	67	78

* Nombre d'échantillons récoltés entre le 21 mars 2000 et le 27 octobre 2003.

Tableau 20. Concentrations de N-NH₄ (mg/L) dans les eaux de percolation des bandes végétatives filtrantes

Variables	Bande 1			Bande 2			Bande 3*		Bande 4		
	Haut	Milieu	Bas	Haut	Milieu	Bas	Haut	Milieu	Haut	Milieu	Bas
Moyenne	24	5,2	0,5	1,6	5,2	1,1	0,05	0,02	0,04	0,04	0,05
Médiane	1,6	0,2	0,03	0,1	0,2	0,04	0,02	0,006	0,01	0,006	0,02
Minimum	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Maximum	123	37	7,7	21	28	20	0,5	0,1	0,2	0,3	0,3
Nombre**	40	33	35	35	35	30	43	35	44	40	40
Fréquences											
0 à 0,5	16	19	32	26	19	26	43	35	44	40	40
0,5 à 1,5	4	0	1	3	4	1	0	0	0	0	0
>1,5	20	14	2	6	12	3	0	0	0	0	0

* Les résultats de la section du bas ne sont pas disponibles pour la bande végétative filtrante 3.

** Nombre d'échantillons récoltés entre le 5 novembre 1999 et le 28 octobre 2003.

Tableau 21. Concentrations de N-NO₃ (mg/L) dans les eaux de percolation des bandes végétatives filtrantes

Variables	Bande 1			Bande 2			Bande 3*		Bande 4		
	Haut	Milieu	Bas	Haut	Milieu	Bas	Haut	Milieu	Haut	Milieu	Bas
Moyenne	5,9	8,0	1,6	4,1	5,8	2,5	0,6	1,5	0,4	1,0	1,8
Médiane	0,7	0,8	1,4	1,1	1,2	0,5	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3
Minimum	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Maximum	68	86	6,0	27	43	17	5,8	17	10	19	22
Nombre**	40	33	35	35	35	30	43	35	44	40	40
Fréquences											
0 à 5	30	26	33	26	27	26	42	32	43	38	36
5 à 10	3	2	2	4	2	1	1	1	0	1	2
>10	7	5	0	5	6	3	0	2	1	1	2

* Les résultats de la section du bas ne sont pas disponibles pour la bande végétative filtrante 3.

** Nombre d'échantillons récoltés entre le 5 novembre 1999 et le 28 octobre 2003.

Tableau 22. Concentrations de N_{total} (mg/L) dans les eaux de percolation des bandes végétatives filtrantes

Variables	Bande 1			Bande 2			Bande 3*		Bande 4		
	Haut	Milieu	Bas	Haut	Milieu	Bas	Haut	Milieu	Haut	Milieu	Bas
Moyenne	40	16	2,9	7,4	14	4,5	1,1	1,8	0,7	1,3	2,2
Médiane	20	8,5	2,1	2,9	7,0	1,5	0,7	0,4	0,5	0,5	0,8
Minimum	0,3	0,3	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,2	0,3	0,1	0,1
Maximum	176	91	13	33	49	33	6,6	18	11	20	21
Nombre**	40	33	35	35	35	30	43	35	44	40	40
Fréquences											
0 à 0,5	4	3	1	2	3	5	7	18	25	20	10
0,5 à 1,0	1	3	6	4	0	8	23	6	17	11	12
>1,0	35	27	28	29	32	17	13	11	2	9	18

* Les résultats de la section du bas ne sont pas disponibles pour la bande végétative filtrante 3.

** Nombre d'échantillons récoltés entre le 5 novembre 1999 et le 28 octobre 2003.

Tableau 23. Concentrations de P_{total} (µg/L) dans les eaux de percolation des bandes végétatives filtrantes

Variables	Bande 1			Bande 2			Bande 3*		Bande 4		
	Haut	Milieu	Bas	Haut	Milieu	Bas	Haut	Milieu	Haut	Milieu	Bas
Moyenne	1733	545	84	132	583	78	27	19	11	20	33
Médiane	338	267	40	28	348	30	17	15	7	12	26
Minimum	5	5	2	7	1	2	1	2	0	2	5
Maximum	10256	2264	1091	1049	3573	741	198	50	31	112	137
Nombre**	39	33	35	34	34	30	43	35	43	40	40
Fréquences											
0 à 20	3	3	6	13	2	11	25	23	33	28	17
20 à 30	2	2	5	5	1	4	5	6	9	2	6
>30	34	28	24	16	31	15	13	6	1	10	17

* Les résultats de la section du bas ne sont pas disponibles pour la bande végétative filtrante 3.

** Nombre d'échantillons récoltés entre le 5 novembre 1999 et le 28 octobre 2003.

5.4 Éléments fertilisants dans les sols

5.4.1 Concentrations moyennes dans les enclos et les bandes végétatives filtrantes

Les concentrations moyennes d'éléments fertilisants dans le sol des enclos d'hivernage et des bandes végétatives filtrantes avant le début du projet sont présentées aux tableaux 24 et 25. Ces résultats représentent les valeurs moyennes de tous les échantillons de sol récoltés en novembre 1999 et sont utilisés à titre de valeurs de base pour établir les caractéristiques du sol avant le début de l'expérimentation. Les tableaux présentent aussi les concentrations moyennes obtenues lors des échantillonnages réalisés à l'automne 2003 et à l'automne 2007. Par exemple, avant le début de l'expérimentation, dans les premiers 30 cm de sol (profondeur 0 à 30 cm), la concentration de phosphore dans le sol des enclos était de 77 mg kg^{-1} avec un taux de saturation de 9,1 %.

5.4.2 Enclos d'hivernage 1 et 2

Les variations de la concentration de phosphore dans le sol des enclos d'hivernage, tout au long du projet, sont présentées à la figure 7. L'analyse de cette figure montre que le mode de gestion des enclos d'hivernage (enclos 1 et 2) a eu une influence sur la concentration de phosphore dans le sol de ces derniers.

L'analyse de la figure 7 démontre qu'il y a eu une augmentation rapide de la concentration de phosphore dans le sol des enclos après le premier hiver et que la concentration est demeurée sensiblement au même niveau par la suite. L'augmentation de la concentration a été plus importante dans l'enclos 2 que dans l'enclos 1 et dans le haut et le milieu des enclos sous l'aire d'alimentation. L'augmentation de la concentration dans l'enclos 2 était reliée à la présence de litière qui retenait les eaux de ruissellement et favorisait l'infiltration du phosphore dans le sol.

Les concentrations moyennes de phosphore, entre mai 2000 et octobre 2003, sous les aires d'alimentation, étaient respectivement d'environ 101 mg kg^{-1} et de 223 mg kg^{-1} dans les enclos 1 et 2. Pour la même période, aux mêmes endroits, le taux de saturation en phosphore était de 11,8 % dans l'enclos 1 et de 25,8 % dans l'enclos 2. Dans le bas de l'enclos 2, la concentration moyenne, mesurée durant la même période, était d'environ 141 mg kg^{-1} . À cet endroit, le taux de saturation en phosphore était de 14,9 %. En peu de temps, l'horizon de sol 0 à 30 cm de l'enclos 2, est donc passé d'une teneur moyenne à une teneur élevée en phosphore.

Le même phénomène d'augmentation de la concentration de phosphore, dans le sol des enclos 1 et 2, a été observé à des profondeurs de 30 à 60 cm et de 60 à 90 cm.

Contrairement au phosphore, les concentrations de potassium ont augmenté à toutes les années dans le sol des enclos 1 et 2 (figure 8). Ces augmentations sont plus importantes dans le haut et le milieu des enclos sous les aires d'alimentation. Cependant, il ne semble pas y avoir de différence entre l'enclos 1 et l'enclos 2.

Dans l'horizon 0 à 30 cm, la concentration moyenne de potassium dans le sol des enclos au début du projet était de 30 mg kg^{-1} . Après quatre ans, les concentrations de potassium variaient entre 858 et $1\,479 \text{ mg kg}^{-1}$ sous les aires d'alimentation des enclos 1 et 2. Dans le bas des enclos, la concentration de potassium était en moyenne de 234 mg kg^{-1} . L'augmentation de la concentration de potassium a aussi été observée à des profondeurs supérieures à 30 cm.

La figure 9 montre qu'il y a eu une accumulation importante de N-NH_4 sous l'aire d'alimentation dans l'enclos 2 entre 60 et 90 cm de profondeur.

L'analyse de la figure 10 montre qu'il n'y avait pratiquement pas de différence entre l'enclos 1 et 2 au niveau de la concentration de N-NO_3 dans le sol. Cependant, comme pour les autres éléments, les concentrations de N-NO_3 étaient plus élevées sous les aires d'alimentation. Les concentrations de N-NO_3 tendaient à augmenter avec le temps même s'il y avait beaucoup de variations.

5.4.3 Enclos d'hivernage 3

Les concentrations de phosphore et de potassium retrouvées dans le sol de l'enclos 3 étaient soit égales ou supérieures aux concentrations mesurées dans le sol des enclos 1 et 2 (figures 7 et 8).

Cette situation est un peu surprenante puisque l'enclos 3 était, en général, utilisé seulement durant une période de deux mois, soit un mois à l'automne et un mois au printemps. En comparaison, les enclos 1 et 2 étaient utilisés durant une période d'au moins quatre mois. Cependant, la densité animale dans l'enclos 3 ($30 \text{ m}^2 \text{ vache}^{-1}$) était beaucoup plus élevée que dans les enclos 1 et 2 ($150 \text{ m}^2 \text{ vache}^{-1}$).

Les copeaux auraient des réactions différentes selon la nature des éléments fertilisants étudiés. Les copeaux diminueraient les pertes par ruissellement et favoriseraient l'infiltration du phosphore et du potassium dans le sol sous l'enclos. La présence des copeaux favoriserait la nitrification du N-NH_4 en N-NO_3 , un élément soluble dans l'eau. Ce phénomène expliquerait le fait qu'il n'y a pas d'accumulation de N-NH_4 dans le sol sous l'enclos 3 (figure 9) mais qu'il y a accumulation de N-NO_3 (figure 10).

5.4.4 Bandes végétatives filtrantes

À l'exception du potassium et de quelques valeurs de N-NH_4 et de N-NO_3 , les concentrations d'éléments fertilisants dans le sol des bandes végétatives filtrantes ne semblaient pas affectées par les concentrations d'éléments fertilisants contenues dans les eaux de ruissellement provenant des enclos d'hivernage.

Au début du projet, la concentration de P dans le sol des bandes végétatives filtrantes était de 77 mg kg^{-1} comparativement à une moyenne de 56 mg kg^{-1} pour les années suivantes (tableau 25). Le prélèvement de P par le couvert végétal sur les bandes végétatives filtrantes semble avoir été supérieur aux apports de P contenu dans les eaux de ruissellement provenant des enclos d'hivernage (figure 11). Le rendement de la culture

n'a pas été mesuré. Il est donc impossible de comparer les différences de rendement entre les bandes végétatives filtrantes.

Tel que démontré à la figure 12, les concentrations de K dans le sol de la bande végétative filtrante 1 ont augmenté avec les années. Dans le haut de la bande, la concentration a atteint environ 500 mg kg^{-1} la dernière année. Une tendance à l'augmentation est aussi observée dans la bande végétative filtrante 2 mais le phénomène est plus faible que dans la bande végétative filtrante 1.

À l'exception de quelques échantillons qui avaient des valeurs de N-NH_4 et de N-NO_3 supérieures à la moyenne (figures 13 et 14), le sol des bandes végétatives filtrantes ne semblait pas être affecté par le contenu des eaux de ruissellement des enclos d'hivernage.

5.4.5 Comparaison avec les échantillonnages réalisés à l'automne 2007

Enclos d'hivernage

Les échantillonnages de sol réalisés à l'automne 2007 ont permis de constater que les concentrations de phosphore dans le sol des enclos étaient demeurées sensiblement identiques à celles obtenues lors des échantillonnages de l'automne 2003. Les taux de saturation du sol en phosphore sont aussi demeurés au même niveau qu'en 2003.

Dans les 30 premiers centimètres de sol, les concentrations de potassium ont diminué environ de moitié entre 2003 et 2007. Entre 30 et 90 cm de profondeur, les concentrations de potassium sont demeurées identiques à celles de 2003.

Les concentrations de N-NH_4 mesurées en 2007, dans les 30 premiers centimètres de sol, sont revenues au niveau de 1999. Les concentrations de N-NH_4 entre 30 et 90 cm de sol ont diminué par rapport aux niveaux de 2003 mais sont tout de même plus élevées qu'en 1999. Cette observation appuie l'hypothèse de la migration en profondeur du N-NH_4 . Les concentrations de N-NO_3 sont revenues au même niveau qu'en 1999, tandis que les concentrations de Ca, Mg et Al sont identiques à celles de 2003.

Bandes végétatives filtrantes

Les concentrations de phosphore ainsi que le taux de saturation du sol dans les bandes végétatives filtrantes ont diminué entre 1999 et 2003. Les échantillonnages de sol réalisés à l'automne 2007 ont permis de constater que ces concentrations sont demeurées identiques entre 2003 et 2007.

Les concentrations de potassium ont aussi diminué entre 2003 et 2007 mais ne sont pas revenues au niveau de 1999. Pour les autres éléments, à l'exception de quelques variations, les concentrations obtenues en 2007 sont relativement semblables aux niveaux de 1999 et 2003.

Tableau 24. Concentrations moyennes des éléments fertilisants dans le sol dans la section des enclos d'hivernage en novembre 1999, octobre 2003 et octobre 2007

Profondeur et année	P	K	N-NH ₄	N-NO ₃	Ca	Mg	Al	P/Al	
	mg kg ⁻¹ (écart-type)							%	
0 à 30 cm	1999	77 (37)	30 (4)	1,7 (0,7)	2,9 (1,2)	1277 (138)	40 (8)	839 (133)	9,1 (4,5)
	2003	175 (79)	924 (163)	7,2 (6,8)	34 (14)	1744 (183)	72 (24)	813 (45)	22 (10)
	2007	199 (103)	583 (214)	1,2 (0,5)	2,9 (1,3)	2146 (767)	91 (24)	878 (105)	24 (15)
30 à 60 cm	1999	51 (23)	30 (14)	1,2 (0,5)	2,1 (1,3)	973 (298)	47 (20)	641 (47)	7,4 (2,6)
	2003	95 (42)	677 (140)	20 (9,5)	34 (7,5)	1284 (173)	44 (12)	830 (98)	11 (4,2)
	2007	103 (70)	594 (354)	6,8 (16)	2,0 (2,2)	1740 (923)	57 (23)	878 (193)	13 (12)
60 à 90 cm	1999	59 (35)	32 (14)	1,2 (0,7)	1,6 (0,6)	914 (296)	58 (42)	604 (102)	8,9 (3,8)
	2003	72 (38)	534 (156)	33 (24)	19 (6,1)	1142 (249)	44 (14)	739 (114)	9,4 (4,1)
	2007	64 (55)	428 (315)	13 (21)	1,3 (1,5)	1325 (750)	74 (107)	735 (253)	11 (15)

Tableau 25. Concentrations moyennes des éléments fertilisants dans le sol dans la section des bandes végétatives filtrantes en novembre 1999, octobre 2003 et octobre 2007

Profondeur et année	P	K	N-NH ₄	N-NO ₃	Ca	Mg	Al	P/Al	
	mg kg ⁻¹ (écart-type)							%	
0 à 30 cm	1999	77 (27)	57 (32)	1,1 (0,3)	8,7 (3,7)	1464 (387)	59 (14)	899 (62)	8,5 (2,9)
	2003	48 (5)	170 (124)	0,9 (0,2)	2,3 (1,7)	1143 (379)	49 (16)	794 (154)	6,2 (0,6)
	2007	56 (16)	134 (66)	1,4 (0,8)	1,5 (1,0)	1362 (415)	57 (20)	895 (141)	6,5 (2,3)
30 à 60 cm	1999	30 (11)	36 (21)	0,8 (0,4)	2,5 (1,4)	704 (189)	36 (7)	607 (71)	4,6 (1,0)
	2003	35 (12)	112 (73)	2,1 (1,4)	4,4 (2,7)	1157 (487)	48 (14)	750 (227)	4,5 (0,9)
	2007	29 (15)	53 (28)	0,9 (0,3)	0,7 (0,5)	1066 (353)	51 (25)	858 (194)	3,4 (1,4)
60 à 90 cm	1999	17 (5)	31 (5)	0,6 (0,1)	1,3 (0,3)	732 (357)	46 (14)	464 (72)	3,6 (1,1)
	2003	23 (10)	117 (78)	0,6 (0,3)	4,2 (3,9)	1224 (698)	52 (22)	640 (244)	3,9 (0,8)
	2007	17 (9)	42 (21)	0,7 (0,2)	0,4 (0,5)	739 (288)	45 (19)	690 (225)	2,4 (0,9)

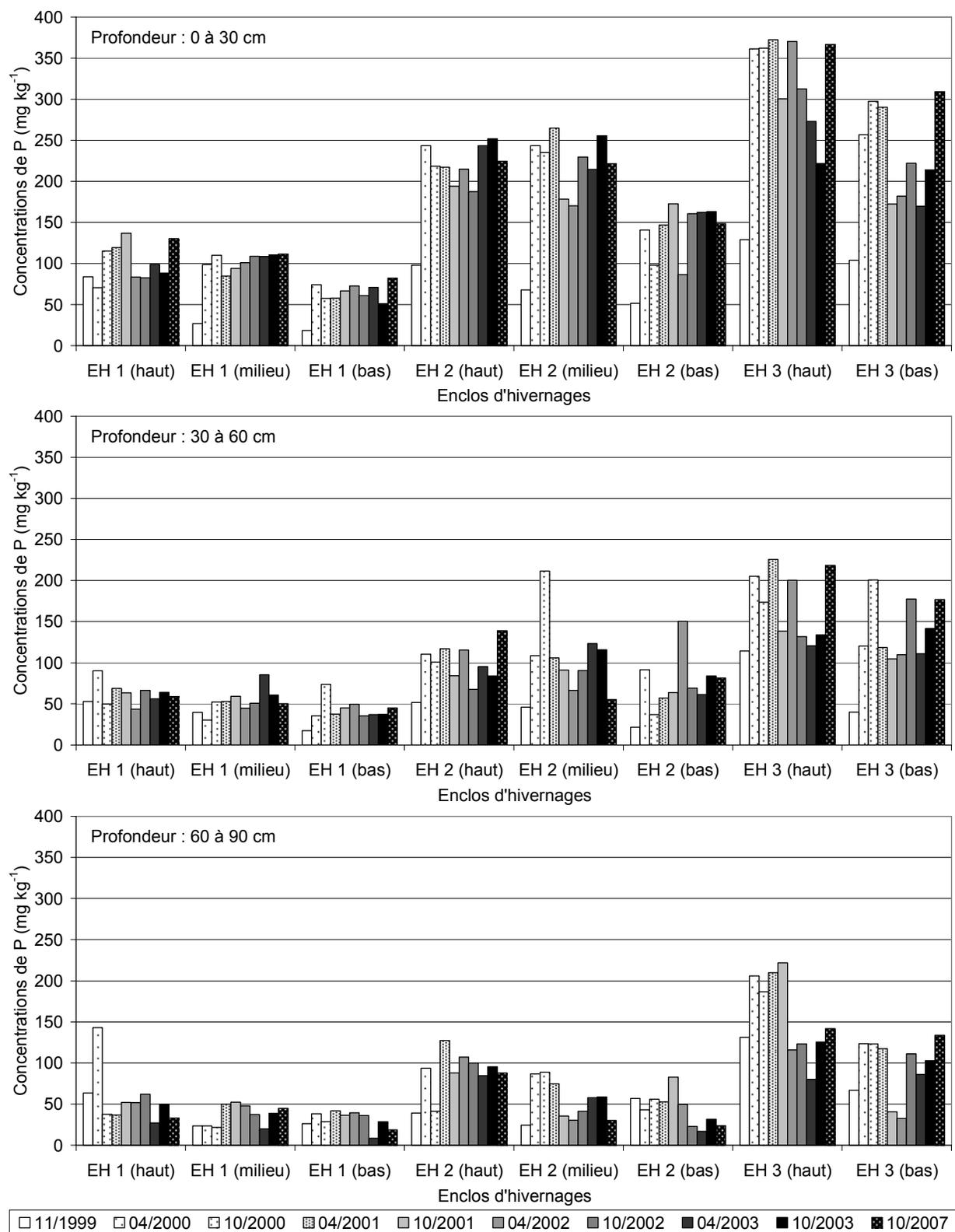


Figure 7. Concentrations de phosphore dans le sol des enclos d'hivernage de 1999 à 2007, à trois endroits et à trois profondeurs

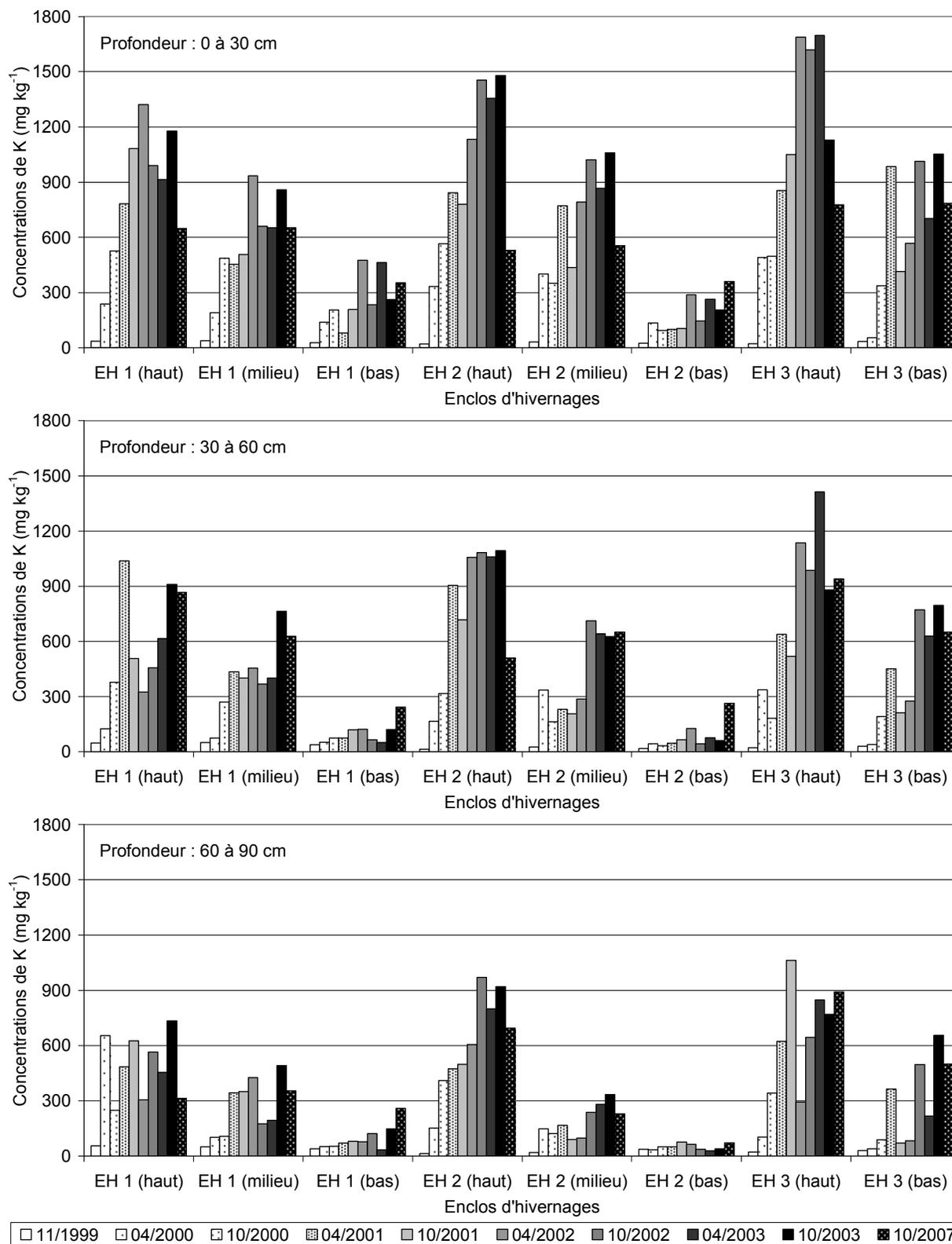


Figure 8. Concentrations de potassium dans le sol des enclos d'hivernage de 1999 à 2007, à trois endroits et à trois profondeurs

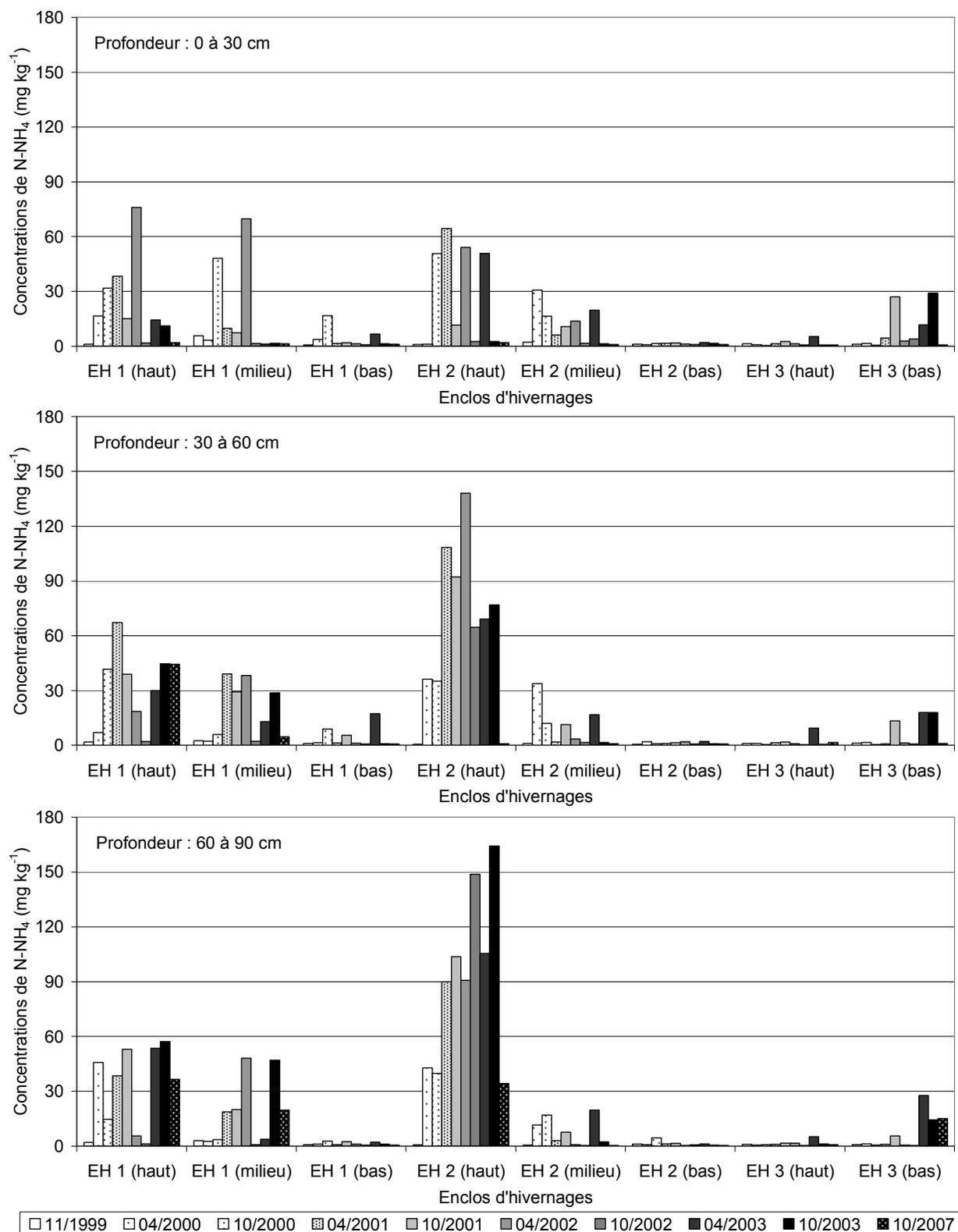


Figure 9. Concentrations de N-NH₄ dans le sol des enclos d'hivernage de 1999 à 2007, à trois endroits et à trois profondeurs

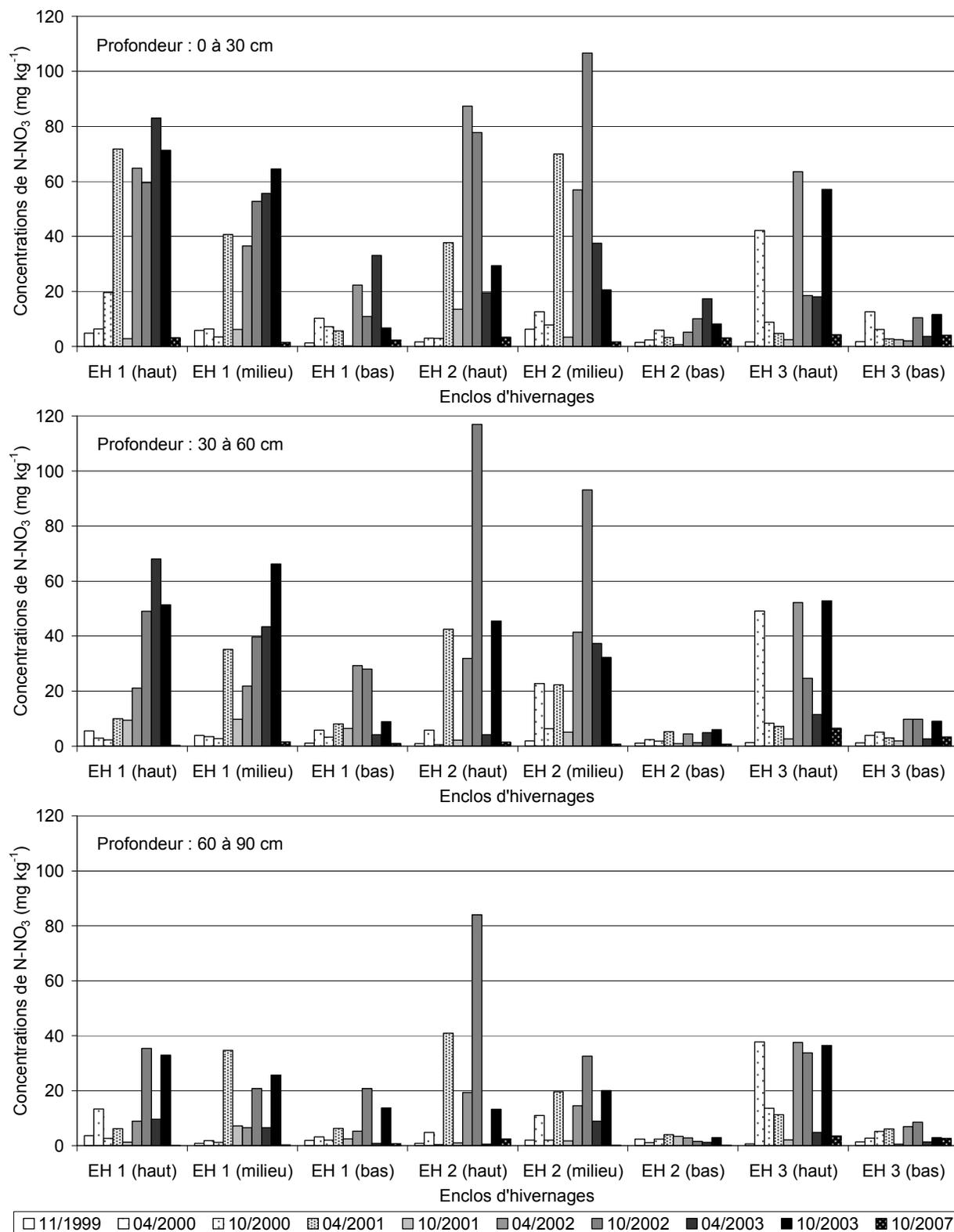


Figure 10. Concentrations de N-NO₃ dans le sol des enclos d'hivernage de 1999 à 2007, à trois endroits et à trois profondeurs

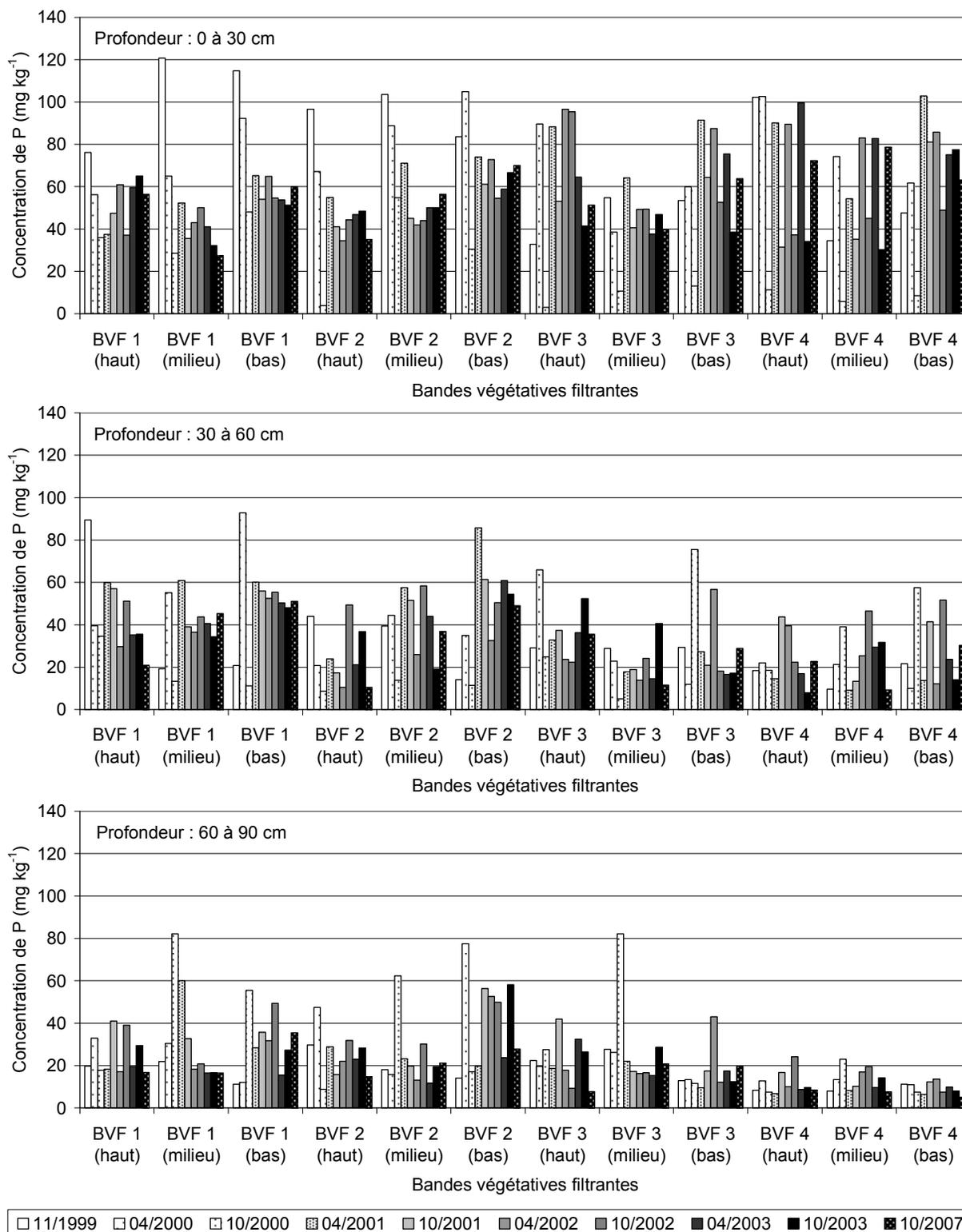


Figure 11. Concentrations de phosphore dans le sol des bandes végétatives filtrantes de 1999 à 2007, à trois endroits et à trois profondeurs

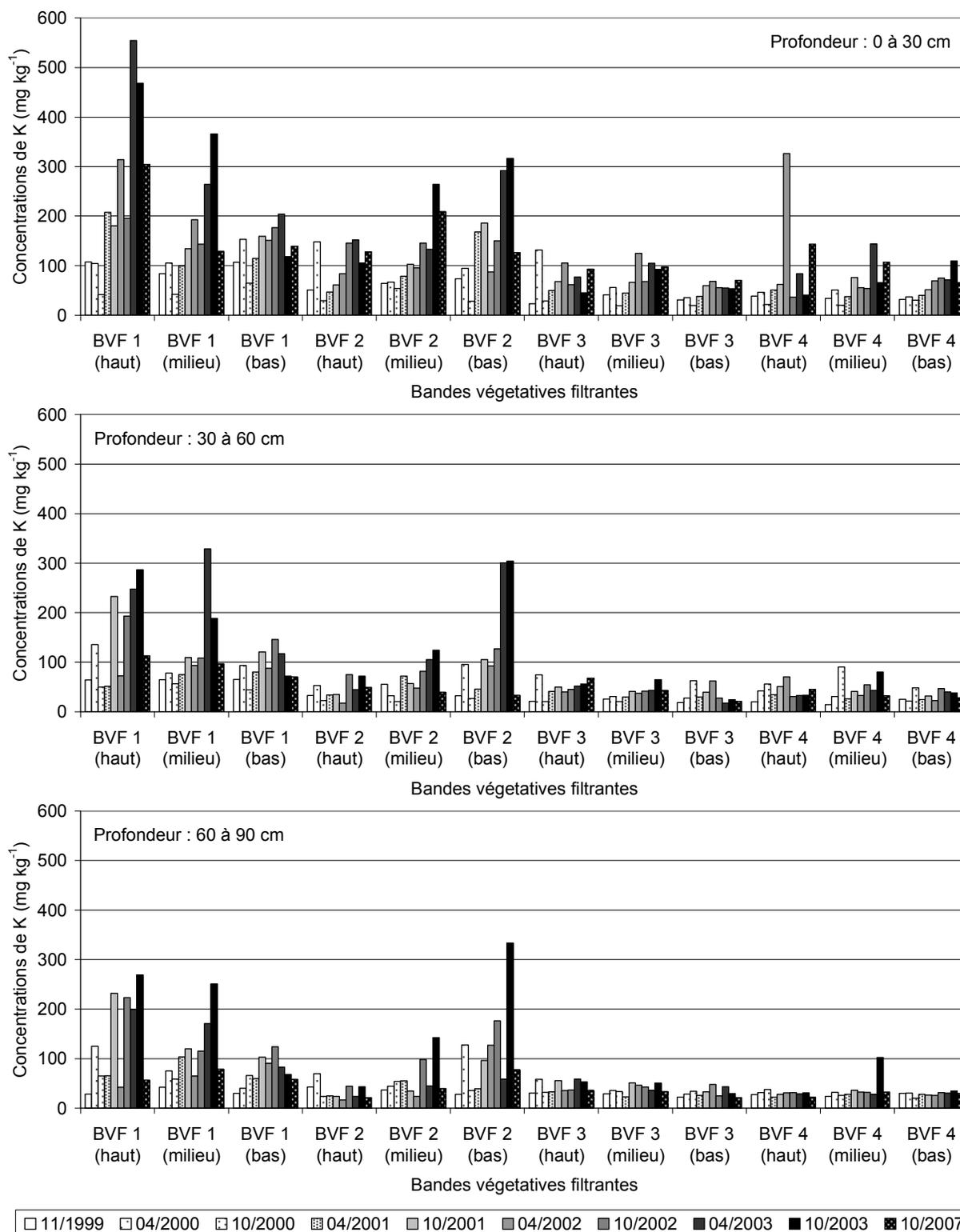


Figure 12. Concentrations de potassium dans le sol des bandes végétatives filtrantes de 1999 à 2007, à trois endroits et à trois profondeurs

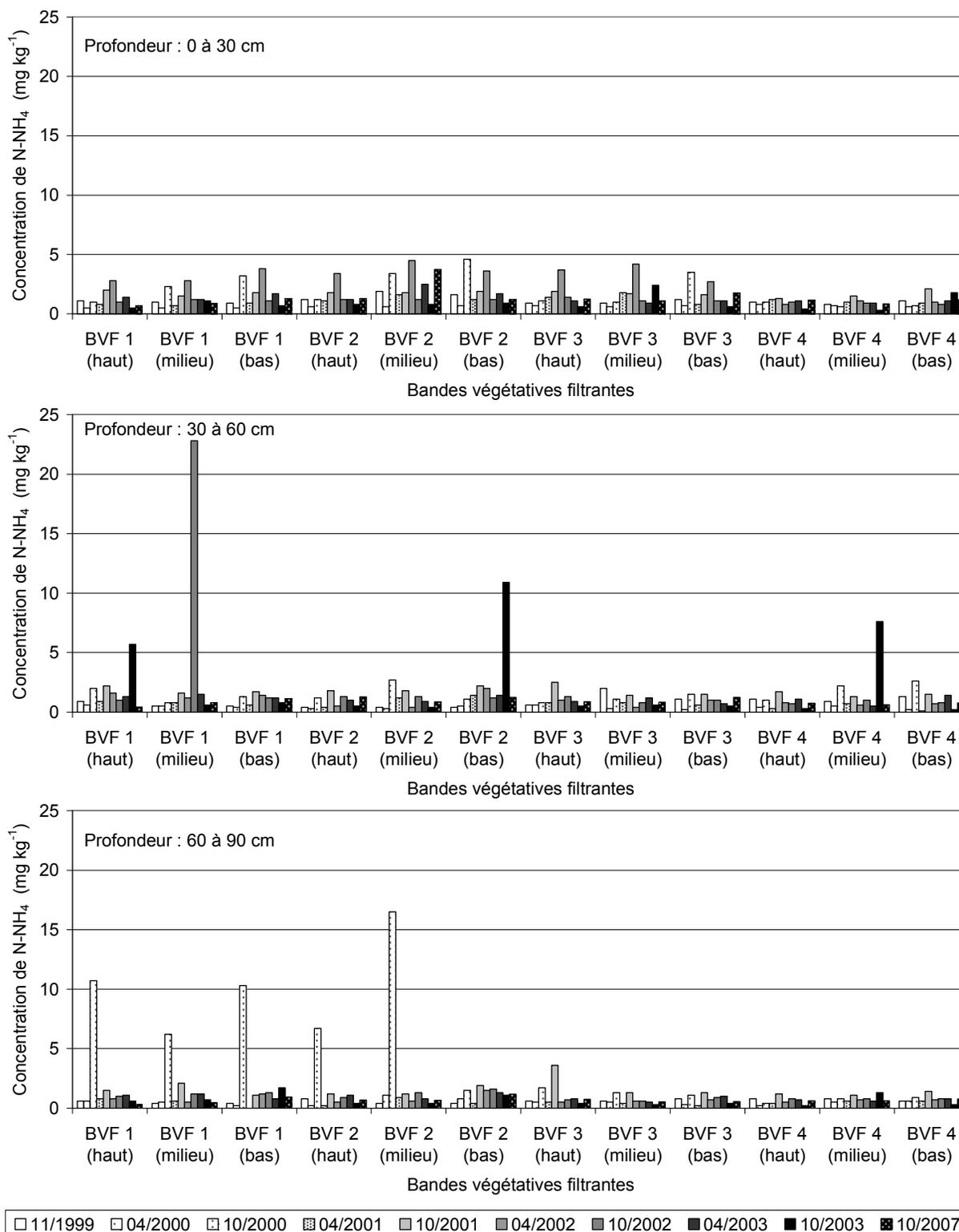


Figure 13. Concentrations de N-NH₄ dans le sol des bandes végétaives filtrantes de 1999 à 2007, à trois endroits et à trois profondeurs

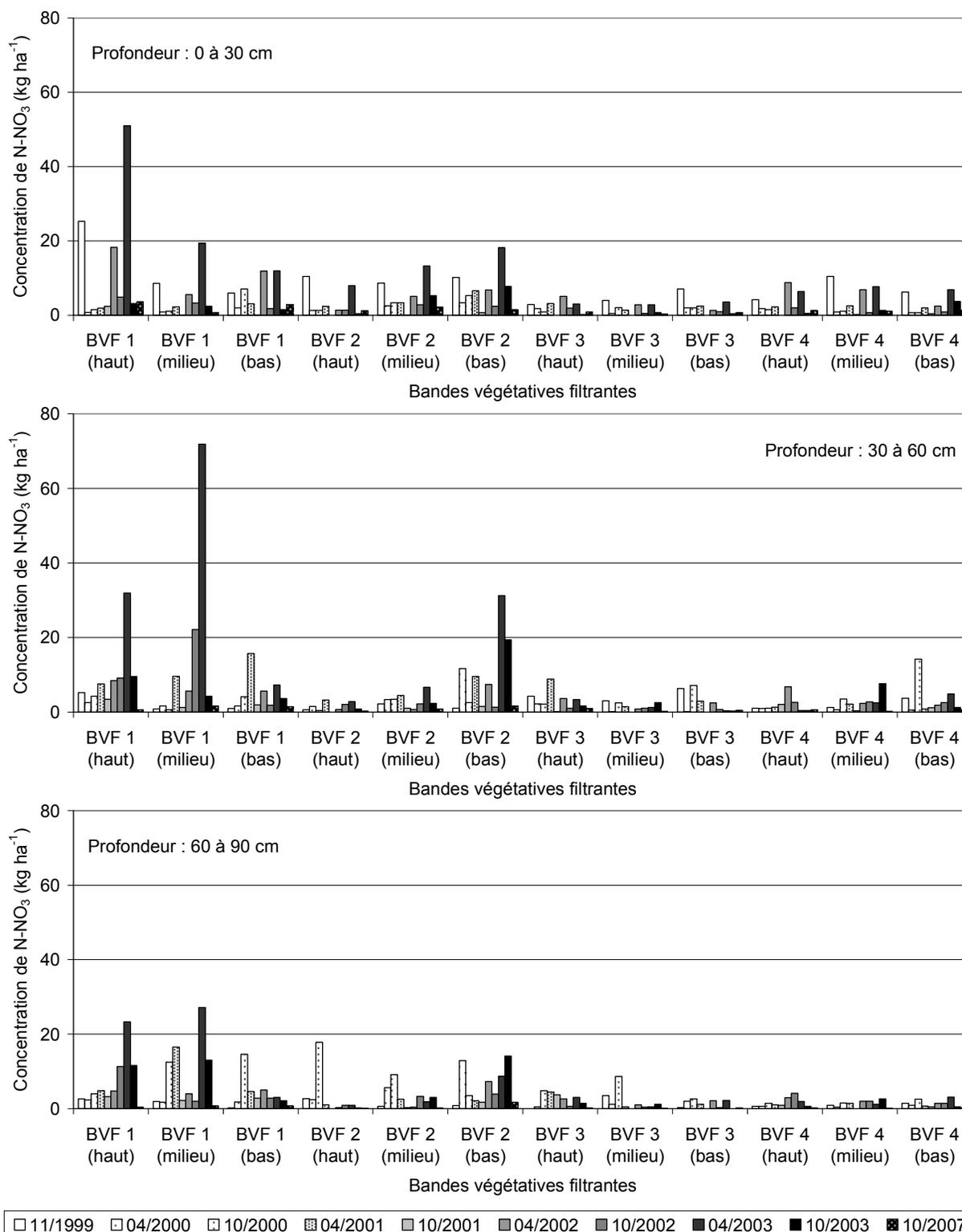


Figure 14. Concentrations de N-NO₃ dans le sol des bandes végétatives filtrantes de 1999 à 2007, à trois endroits et à trois profondeurs

5.5 Coliformes fécaux dans les eaux de ruissellement et de percolation des enclos d'hivernage et des bandes végétatives filtrantes

Les tableaux 26 et 27 présentent la répartition des échantillons en différents intervalles (0 UFC 100 ml⁻¹; 1 à 200 UFC 100 ml⁻¹; 201 à 999 UFC 100 ml⁻¹ et plus de 1 000 UFC 100 ml⁻¹) de concentrations de coliformes fécaux pour la durée entière du projet.

Durant les quatre années du projet, un faible nombre d'échantillons d'eau de ruissellement ont été analysés pour en déterminer la concentration de coliformes fécaux. Ainsi une quarantaine d'échantillons par enclos d'hivernage et moins d'une vingtaine par bande végétative filtrante ont été prélevés. De plus, l'échantillonnage a été réalisé de façon ponctuelle lorsque les quantités d'eau étaient suffisantes. L'échantillonnage n'a pas été non plus synchronisé avec les événements pluvieux importants entre la sortie des enclos et la sortie des bandes végétatives filtrantes. Avec les résultats obtenus, il n'est pas possible de déterminer de façon exacte l'efficacité de réduction des concentrations de coliformes fécaux par les bandes végétatives filtrantes. Au niveau des eaux de ruissellement, il ne semble pas y avoir de différence entre les enclos 1 et 2. La moitié des échantillons contenait plus de 1000 UFC 100 ml⁻¹ (tableau 26). Le même phénomène est observé avec les bandes végétatives filtrantes.

Un plus grand nombre d'échantillons d'eau de percolation ont été récoltés, soit plus de 100 pour les enclos et environ 50 pour les bandes végétatives filtrantes. Le comportement des enclos 1 et 2 semble différent, les concentrations de coliformes fécaux étaient plus élevées dans les eaux de percolation de l'enclos 2 (tableau 27). Cette différence est probablement due à la présence de litière et a eu le même effet sur les concentrations d'éléments fertilisants dans le sol et dans les eaux de percolation de l'enclos 2. Les résultats obtenus pour l'enclos 3 sont identiques à ceux obtenus pour l'enclos 1.

Il ne semble pas y avoir de différence entre les bandes végétatives filtrantes 1 et 2 de même qu'entre les bandes 3 et 4. Les concentrations de coliformes fécaux étaient plus élevées dans les eaux de percolation des bandes végétatives filtrantes 1 et 2. Dans ces deux bandes, 20 échantillons sur 99 avaient une concentration supérieure à 200 UFC 100 ml⁻¹. Presque tous les échantillons récoltés dans les eaux de percolation des bandes végétatives filtrantes 3 et 4 (119 échantillons sur 121) avaient une concentration de coliformes fécaux inférieure à 200 UFC 100 ml⁻¹.

Les résultats obtenus sont très variables et concordent avec ceux de Mankin et al. (2006) et Fajardo et al. (2001), à l'effet que les bandes végétatives filtrantes ne sont pas efficaces à 100 % pour capter les coliformes fécaux provenant des eaux de ruissellement des enclos.

Tableau 26. Répartition du nombre total d'échantillons en fonction de différentes concentrations de coliformes fécaux dans les eaux de ruissellement des enclos d'hivernage et des bandes végétatives filtrantes

Endroit	Classe de concentration (UFC 100 ml ⁻¹)				Total
	0	1 à 200	201 à 999	>1000	
Enclos 1	0	14	3	23	40
Enclos 2	1	14	7	19	41
Enclos 3	3	23	8	8	42
Enclos 4	1	14	8	17	40
Bande 1	0	4	1	4	9
Bande 2	0	1	2	1	4
Bande 3	6	8	1	1	16
Bande 4	4	8	1	4	17

Tableau 27. Répartition du nombre total d'échantillons en fonction de différentes concentrations de coliformes fécaux dans les eaux de percolation des enclos d'hivernage et des bandes végétatives filtrantes

Endroit	Classe de concentration (UFC 100 ml ⁻¹)				Total
	0	1 à 200	201 à 999	>1000	
Enclos 1	16	101	7	1	125
Enclos 2	6	77	12	15	110
Enclos 3	15	89	3	1	108
Bande 1	6	33	6	6	51
Bande 2	5	35	4	4	48
Bande 3	13	44	0	0	57
Bande 4	15	47	2	0	64

5.6 Bilan des pertes

5.6.1 Bilan estimé d'azote et de phosphore dans les enclos d'hivernage

Les bilans d'azote et de phosphore dans les enclos d'hivernage sont présentés aux tableaux 28 et 29. Les résultats inclus dans le tableau 28 montrent que les quantités d'azote ajoutées annuellement dans les enclos d'hivernage 1 et 2 étaient d'environ 600 kg et d'un peu moins de 275 kg dans les enclos d'hivernage 3 et 4. Les différences entre les ajouts et les pertes varient entre -12 et 20 %.

La majorité de l'azote retrouvée dans l'enclos provenait du fumier produit par les vaches et des pertes de foin du râtelier. À l'exception de l'enclos 3, les litières représentaient moins de 2 % des apports en azote.

Tableau 28. Bilan estimé d'azote dans les enclos d'hivernage

Ajouts et pertes	Enclos 1	Enclos 2	Enclos 3	Enclos 4
	kg N année ⁻¹ enclos ⁻¹			
Ajouts				
Fumier produit par les vaches	274	274	137	137
Litière (paille)	4,1			
Litière (paille et ripe)		5,5		
Litière (copeaux)			23	
Litière (ripe)				2,5
Litière (ripe – journalier)		4,8		2,4
Pertes de foin du râtelier	313	314	131	132
Sous total des ajouts	591	598	291	274
Pertes				
Eaux de ruissellement	46	15	0,83	1,7
Eaux de percolation	34	45	5,0	
Accumulation dans le sol	6,6	2,4	1,1	
Prélèvement de la culture	17	17		
Fumier récolté	372	590	257	232
Sous total des pertes	475	669	264	233
Bilan (ajouts – pertes)	116	-72	26	41
	20 %	-12 %	9 %	15 %

Même si les résultats obtenus sont variables, il est tout de même possible d'estimer que, pour les enclos 1 et 2, environ 80 % de l'azote produit demeure dans le fumier, que 3 % de l'azote est prélevé par les plantes dans l'enclos et 17 % de l'azote est perdu dans l'environnement.

Les résultats du bilan de phosphore dans les enclos d'hivernage sont présentés au tableau 29. Les résultats obtenus sont beaucoup plus variables que pour le bilan d'azote. Les différences entre les ajouts et les pertes varient entre -129 et -33 %. Dans tous les cas, les pertes estimées étaient plus élevées que les ajouts.

Comme pour l'azote, la majorité du phosphore ajouté dans l'enclos provenait du fumier produit par les vaches et des pertes de foin du râtelier. Au niveau des pertes, plus de 90 % du phosphore est demeuré dans le fumier. L'accumulation de phosphore dans le sol représentait la majorité des pertes.

Tableau 29. Bilan estimé de phosphore dans les enclos d'hivernage

Ajouts et pertes	Enclos 1	Enclos 2	Enclos 3	Enclos 4
	kg P ₂ O ₅ année ⁻¹ enclos ⁻¹			
Ajouts				
Fumier produit par les vaches	145	145	73	73
Litière (paille)	3,1			
Litière (paille et ripe)		1,9		
Litière (copeaux)			0,0	
Litière (ripe)				0,53
Litière (ripe – journalier)		0,99		0,49
Pertes de foin du râtelier	94	94	39	40
Sous total des ajouts	242	242	112	113
Pertes				
Eaux de ruissellement	2,9	1,5	0,50	0,41
Eaux de percolation	0,45	0,83	0,18	
Accumulation dans le sol	13	50	2,4	
Prélèvement de la culture	5,6	5,6		
Fumier récolté	383	498	149	151
Sous total des pertes	405	555	152	151
Bilan (ajouts – pertes)	-163	-313	-40	-38
	-67 %	-129 %	-36 %	-33 %

Même si les résultats obtenus sont très variables, ils sont dans le même ordre de grandeur que ceux présentés par Kissinger et al. (2007). Ces derniers ont réalisé un bilan massique aux frontières d'un enclos et les résultats ont permis de démontrer que ce qui sortait de l'enclos en matière d'animal, de fumier récolté et de perte d'éléments fertilisants représentait respectivement 31, 23 et 47 % des apports d'azote et respectivement 38, 57 et 5 % des apports de phosphore.

5.6.2 Bilan estimé d'azote et de phosphore dans les bandes végétatives filtrantes

Les résultats des bilans estimés d'azote et de phosphore dans les bandes végétatives filtrantes ne sont pas présentés. Les différences obtenues entre les ajouts et les pertes étaient trop variables. Le manque de données sur le rendement en foin dans chacune des bandes, rend difficile l'estimation des prélèvements d'azote et de phosphore.

Selon les résultats d'analyse de sol, il n'y a eu pratiquement aucune accumulation ou baisse de $N-NH_4$ dans le sol des bandes végétatives filtrantes. Quant au phosphore, sa concentration a diminué dans le sol des bandes végétatives filtrantes, indiquant que la quantité de cet élément présent dans les eaux de ruissellement des enclos n'était pas suffisante pour combler le besoin des plantes.

Ces observations portent à croire que le rendement du foin dans les bandes végétatives filtrantes était possiblement inférieur à $6 t ha^{-1}$ et par le fait même le prélèvement des plantes inférieur à $16 kg N-NH_4$.

6 Discussion et limites des résultats obtenus

En comparaison avec l'enclos d'hivernage 1, la litière ajoutée dans l'enclos d'hivernage 2 a influencé le comportement des éléments fertilisants contenus dans le fumier. Durant les quatre années du projet, la litière a permis de réduire le volume d'eau de ruissellement sortant de l'enclos d'hivernage 2 et, par le fait même, les quantités d'éléments fertilisants perdus dans l'environnement. Cependant, la présence de litière a favorisé l'infiltration des éléments fertilisants dans le sol et l'eau sous l'enclos d'hivernage.

Dans la configuration actuelle du dispositif expérimental, seule la comparaison des quatre aménagements d'enclos d'hivernage et de bandes végétatives filtrantes est possible. L'absence d'une parcelle témoin, non contaminée par le fumier des vaches, limite aussi l'interprétation des résultats. L'analyse des eaux de ruissellement et de percolation d'une parcelle témoin aurait permis de quantifier les concentrations et les charges de base d'éléments fertilisants sur le site. Par la suite, il aurait été possible d'établir la contribution du site sur l'environnement et l'impact de la présence des vaches dans les enclos pour les quatre années du projet.

Pour ces raisons, la transposition des résultats obtenus dans ce projet sur un autre site ayant des caractéristiques différentes (ex. : climat, type de sol, topographie, végétation, taille du troupeau, historique du site) doit être faite avec précaution. En reprenant le même protocole, le comportement des enclos 1 et 2 devrait donner sensiblement les mêmes résultats. Cependant, en ce qui concerne la quantité d'éléments fertilisants accumulée dans le sol et perdus dans les eaux, les résultats sont difficiles à prévoir. L'influence des caractéristiques telles que le type de sol, la topographie et la végétation n'a pas été quantifiée.

Les résultats obtenus en matière de concentrations d'éléments fertilisants dans les sols et dans les eaux des enclos d'hivernage ont tout de même pu être comparés à quelques résultats présentés dans la littérature. Les concentrations mesurées dans les eaux de ruissellement et de percolation étaient dans le même ordre de grandeur que celles obtenues par Olson et al. (2005), Miller et al. (2004) et Maulé et Fonstad (2000).

Les enclos d'hivernage, selon la configuration utilisée dans le projet, peuvent avoir un impact sur l'environnement. Des précautions devraient être prises pour éviter des situations telles que l'accumulation importante d'éléments fertilisants dans les sols et dans les eaux de ruissellement et de percolation. Des concentrations de phosphore supérieures à 500 kg ha^{-1} ont été mesurées dans le sol des enclos 2 et 3. De plus, des échantillons d'eau de ruissellement et de percolation ont dépassé les critères de la qualité de l'eau du MDDEP. Les problématiques de concentrations et de charges dans les eaux de ruissellement et de percolation sont concentrées durant les mois de mars, avril et mai; mois correspondant à la fonte des neiges.

Les bandes végétatives filtrantes ont permis de capter entre 70 et 90 % des éléments sortant des enclos d'hivernage. Les résultats obtenus sont relativement semblables à ceux rapportés par Koelsch et al. (2006) dans une revue de littérature portant sur les bandes végétatives filtrantes.

Selon le mode actuel de conception, présenté dans FPBQ et al. (1999), il serait difficile de garantir des efficacités supérieures pour les bandes végétatives filtrantes dans toutes les situations. La conception des bandes végétatives doit être améliorée. Delgado et al. (1995) rapportaient que la conception d'une bande végétative filtrante devait tenir compte de différents points tels que l'objectif de la bande, le type de sol, la perméabilité du sol, la topographie du site, le climat et la végétation. Il existe présentement deux guides qui tiennent compte de ces variables soit celui du United State Department of Agriculture (USDA NRCS, 2006) et celui du ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO, 2006). L'adaptation de ces guides au contexte des élevages de vaches-veaux devrait être envisagée.

7 Conclusion

Le présent rapport renferme une analyse approfondie des résultats obtenus dans le rapport final du projet intitulé « Étude environnementale des enclos d'hivernage de vaches-veaux » déposé à la FPBQ en décembre 2004 (Pelletier et al., 2004).

La réalisation de la revue de littérature a permis de constater qu'il n'y avait aucune publication scientifique portant sur les impacts environnementaux des enclos d'hivernage d'élevage de vaches-veaux. La majorité de l'information trouvée portait sur les enclos de bovins de boucherie. Il est tout de même important de noter que dans plusieurs cas, le concept d'enclos d'hivernage et de bandes végétatives filtrantes développé pour les élevages de bovins de boucherie est utilisé pour les élevages de vaches-veaux. La consultation de la littérature scientifique et des différents guides et feuillets techniques a permis de constater que le concept de bandes végétatives filtrantes est une pratique généralement bien acceptée et utilisée même si un risque de pollution y est associé. Le principe du « rejet zéro » en aval des bandes végétatives filtrantes n'est pratiquement jamais obtenu.

L'analyse des résultats a permis de constater que, pour les enclos d'hivernage et les bandes végétatives filtrantes, plus de 70 % du volume annuel de ruissellement s'écoulait durant les mois de mars, avril et mai avec plus de 80 % des charges annuelles des éléments fertilisants analysés (N-NH₄, N-NO₃, N_{total} et P). Les bandes végétatives filtrantes ont permis de capter entre 70 et 90 % des éléments fertilisants analysés sortant des enclos d'hivernage.

L'analyse des résultats démontre que les aménagements d'enclos d'hivernage et de bandes végétatives filtrantes, dans la configuration utilisée dans le projet, peuvent avoir un impact sur l'environnement. Des concentrations élevées d'éléments fertilisants ont été observées dans les sols et dans les eaux de ruissellement et de percolation. Des précautions devraient donc être prises pour éviter de telles situations.

Suite aux résultats obtenus, les principales recommandations portent sur la conception d'enclos d'hivernage pouvant permettre le captage à la source des éléments fertilisants et la conception des bandes végétatives filtrantes pour en améliorer l'efficacité et tenter de s'approcher du « rejet zéro ».

8 Recommandations

Le concept d'enclos d'hivernage et de bandes végétatives filtrantes doit être amélioré et mieux encadré pour en limiter l'impact sur l'environnement. Les actions entreprises devraient permettre de s'approcher du « rejet zéro ». Pour ce faire, les recommandations suivantes sont proposées par les auteurs :

1. Revoir les méthodes de conception des enclos d'hivernage pour réduire les pertes d'éléments fertilisants.

Les actions proposées sont :

Rendre le sol étanche en totalité ou en partie sous l'aire d'alimentation pour limiter l'accumulation d'éléments fertilisants dans le sol;

Étudier la possibilité d'implanter un système de traitement primaire de l'eau de ruissellement à la sortie de l'aire d'alimentation. Considérer l'implantation d'un bassin de sédimentation entre l'enclos d'hivernage et la bande végétative filtrante dans la conception pour limiter les pertes durant les mois critiques de mars, avril et mai.

2. Revoir les méthodes de conception des bandes végétatives filtrantes pour en améliorer l'efficacité.

L'action proposée est :

S'inspirer des guides publiés par le United State Department of Agriculture (USDA NRCS, 2006) et celui du ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO, 2006).

9 Références

- Alberta. 2005. Cattle wintering sites. Managing for good stewardship. Édition révisée. Agdex #420/580-2. 21 pages.
- Alberta. 2004. Beneficial management practices: Environmental manual for Alberta cow/Calf producers. 94 pages.
- ASAE. 2005. Manure production and characteristics. ASAE Standard D384.2 MAR2005. St. Joseph, Mich. ASAE.
- Baker, K.D. 2005. Temporal assessment of nutrient contributions to waterways from feedlots. *Applied Engineering in Agriculture* 21(3): 517-528.
- Bedard-Haughn, A., K.W. Tate et C. van Kessel. 2005. Quantifying the impact of regular cutting on vegetative buffer efficacy for nitrogen-15 sequestration. *Journal of Environmental Quality* 34(5): 1651-1664.
- Bedard-Haughn, A., K.W. Tate et C. van Kessel. 2004. Using nitrogen-15 to quantify vegetative buffer effectiveness for sequestering nitrogen in runoff. *Journal of Environmental Quality* 33(6): 2252-2262.
- Berry, E.D. et D.N. Miller. 2005. Cattle feedlot soil moisture and manure content: II. Impact on *Escherichia coli* O157. *Journal of Environmental Quality* 34(2): 656-663.
- Bingham, S.C., P.W. Westerman et M.R. Overcash. 1980. Effect of grass buffer zone length in reducing the pollution from land application areas. *Transactions of the ASAE* 23: 330-335, 342.
- Blanco-Canqui, H., C.J. Gantzer, S.H. Anderson, E.E. Alberts et A. L. Thompson. 2004a. Grass barrier and vegetative filter strip effectiveness in reducing runoff, sediment, nitrogen, and phosphorus loss. *Soil Science Society of America Journal* 68(5): 1670-1678.
- Blanco-Canqui, H., C.J. Gantzer, S.H. Anderson et E.E. Alberts. 2004b. Grass barriers for reduced concentrated flow induced soil and nutrient loss. *Soil Science Society of America Journal* 68(6): 1963-1972.
- Boyd, P.M., J.L. Baker, S.K. Mickelson et S.I. Ahmed. 2003. Pesticide transport with surface runoff and subsurface drainage through a vegetative filter strip. *Transactions of the ASAE* 46(3): 675-684.
- Chaubey, I., D.R. Edwards, T.C. Daniel, P.A. Moore Jr et D.J. Nichols. 1995. Effectiveness of vegetative filter strips in controlling losses of surface-applied poultry litter constituents. *Transactions of the ASAE* 38(6): 1687-1692.

- Chaubey, I., D.R. Edwards, T.C. Daniel, P.A. Moore Jr et D.J. Nichols. 1994. Effectiveness of vegetative filter strips in retaining surface-applied swine manure constituents. *Transactions of the ASAE* 37(3): 845-850.
- Coyne, M.S., R.A. Gilfillen, A. Villalba, Z. Zhang, R. Rhodes, L. Dunn et R.L. Blevins. 1998. Fecal bacterial trapping by grass filter strips during simulated rain. *Journal of Soil and Water Conservation* 53(2): 140-145.
- Coyne, M.S., R.A. Gilfillen, R. Rhodes et R.L. Blevins. 1995. Soil and faecal coliform trapping by grass filter strips during simulated rain. *Journal of Soil and Water Conservation* 50: 405-408.
- CRAAQ. 2003. Guide de référence en fertilisation. 1^{re} édition. 294 pages.
- Delgado, A.N., A.L. Periago et F.D.-F. Viqueira. 1995. Vegetated filter strips for wastewater purification: A Review. *Bioresource Technology* 51:13-22.
- Dickey, E.C. et D.H. Vanderholm. 1981. Vegetative filter treatment of livestock feedlot runoff. *Journal of Environmental Quality* 10(3): 279-284.
- Dillaha, T.A., R.B. Reneau, S. Mostaghimi et D. Lee. 1989. Vegetative filter strips for agricultural nonpoint source pollution control. *Transaction of the ASAE* 32(2): 513-519.
- Dillaha, T.A., J.H. Sherrard, D. Lee, S. Mostaghimi et V.O. Shanholtz. 1988. Evaluation of vegetative filter strips as a best management practice for feed lots. *Journal – Water Pollution Control Federation* 60(7): 1231-1238.
- Dittrich, T.M., L.D. Geohing, M.T. Walter et T.S. Steenhuis. 2003. Revisiting buffer strip design standards for removing dissolved and particulate phosphorus. In Proceedings of Total Maximum Daily Load (TMDL) Environmental Regulations–II. 8-12 Novembre 2003. Albuquerque, New Mexico USA. ASAE Publication Number 701P1503, ed. A. Saleh. Pages 527-534.
- Edwards, D.R., T.C. Daniel et P.A. Moore Jr. 1996. Vegetative filter strip design for grassed areas treated with animal manures. *Applied Engineering in Agriculture* 12(1): 31-38.
- Edwards, W.M., L.B. Owens et R.K. White. 1983. Managing runoff from a small, paved beef feedlot. *Journal of Environmental Quality* 12(2): 281-286.
- Environnement Canada. 2007. Rapport de données mensuelles de 1999 à 2003 et normales climatiques 1971 à 2000. Consultation Internet: <http://www.climate.weatheroffice.ec.gc.ca> (17 octobre 2007).
- Fajardo, J.J., J.W. Bauder et S.D. Cash. 2001. Managing nitrate and bacteria in runoff from livestock confinement areas with vegetative filter strips. *Journal of Soil and Water Conservation* 56(3): 185-191.

- FPBQ, MAPAQ et MENV. 1999. Guide de bonnes pratiques agroenvironnementales pour la gestion des fumiers des bovins de boucherie. Fédération des producteurs de bovins du Québec. 28 pages plus annexes.
- Giroux, M. et R. Royer. 2006. Influence des modes de fertilisation sur les pertes d'éléments nutritifs dans les drains agricoles sous prairies et orge grainée. Observatoire de la qualité des sols du Québec - Cahier no 5. IRDA. 57 pages.
- Giroux, M., A.R. Michaud, C. Côté et N. Ziadi. 2003. Stratégies de réduction à la ferme des risques environnementaux liés à la fertilisation avec des engrais de ferme. Colloque en agroenvironnement. 13 novembre 2003. 73-100.
- Harner, J.P., J.P. Murphy, D.L. Delvin, W.H. Fick et G.L. Kilgore. 2000. Vegetative filter strip systems for animal feeding operations. Kansas State University – Research and Extension. MF-2454. 8 pages.
- Hay, V., V. Pittroff, E.E. Tooman et D. Meyer. 2006. Effectiveness of vegetative filter strips in attenuating nutrient and sediment runoff from irrigated pastures. *Journal of Agricultural Science* 144 (4): 349-360.
- Heatwaite, A.L., P. Griffiths et R.J. Parkinson. 1998. Nitrogen and phosphorus in runoff from grassland with buffer strips following application of fertilizers and manures. *Soil Use and Management* 14:142-148.
- Helmets, M.J., D.E. Eisenhauer, M.G. Dosskey, T.G. Franti, J.M. Brothers et M.C. McCullough. 2005. Flow pathways and sediment trapping in a field-scale vegetative filter. *Transactions of the ASAE* 48(3): 955-968.
- Jin, C.-X. et M.J.M. Römkens. 2001. Experimental studies of factors in determining sediment trapping in vegetative filter strips. *Transactions of the ASAE* 44(2): 277-288.
- Jin, C.-X., M.J.M. Römkens et F. Griffioen. 2000. Estimating Manning's roughness coefficient for shallow overland flow in non-submerged vegetative filter strips. *Transactions of the ASAE* 43(6): 1459-1466.
- KDHE. 2006. Design standards for confined feeding facilities. Kansas Department of Health & Environment. Bureau of Water. 33 pages.
- Kim, Y.J., L.D. Geohring, J.H. Jeon, A.S. Collick, S.K. Giri et T.S. Steenhuis. 2006. Evaluation of the effectiveness of vegetative filter strips for phosphorus removal with the use of a tracer. *Journal of Soil and Water Conservation* 61(5): 293-302.
- Kissinger, W.F., R.K. Koelsch, G.E. Erickson et T.J. Klopfenstein. 2007. Characteristics of manure harvested from beef cattle feedlots. *Applied Engineering in Agriculture* 23(3): 357-365.

- Koelsch, R.K., J.C. Lorimor et K.R. Mankin. 2006. Vegetative treatment systems for management of open lot runoff: Review of literature. *Applied Engineering in Agriculture* 22(1): 141-153.
- Lee K.-H., T.M. Isenhardt, R.C. Schultz et S.K. Mickelson. 2000. Multispecies riparian buffers trap sediment and nutrients during rainfall simulations. *Journal of Environmental Quality* 29: 1200-1205.
- Lee, D., T.A. Dillaha et J.H. Sherrard. 1989. Modeling phosphorus transport in grass buffer strips. *Journal of Environmental Engineering* 115(2): 409-427.
- Lim, T.T., D.R. Edwards, S.R. Workman, B.T. Larson et L. Dunn. 1998. Vegetated filter strip removal of cattle manure constituents in runoff. *Transactions of the ASAE* 41(5): 1375-1381.
- Lorimor, J.C., S. Shouse et W. Miller. 2002. Vegetative filter strips for open feedlot runoff treatment – Solutions for open feedlot operators. Iowa State University, University Extension. PM 1919. 4 pages.
- MAAARO. 2006. Guide de conception des systèmes de bandes de végétation filtrantes. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario. Publication 826F. ISBN 1-4249-0713-6.
- Magette, W.L., R.B. Brinsfield, R.E. Palmer et J.D. Wood. 1989. Nutrient and sediment removal by vegetated filter strips. *Transactions of the ASAE* 32(2): 663-667.
- Mankin, K.R., P.L. Barnes, J.P. Harner, P.K. Kalita et J.E. Boyer. 2006. Field evaluation of vegetative filter effectiveness and runoff quality from unstocked feedlots. *Journal of Soil and Water Conservation* 61(4): 209-217.
- Marquis, A. et D. Désilet. 2000. Systèmes environnementaux. GAE-12358. Notes de cours. Université Laval.
- MAPAQ. 2007. Critère de sélection d'un site pour aménager des enclos d'hivernage. Feuillet technique 10501. 4 pages.
- MAPAQ et TCAO. 2007. Gestion environnementale des élevages vache-veau. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. Table de concertation agroalimentaire de l'Outaouais. Consultation Internet: www.agrireseau.qc.ca (5 septembre 2007).
- Maulé, C.P. et T.A. Fonstad. 2002. Solute and moisture flux beneath cattle feedlot pens. *Transactions of the ASAE* 45(1): 73-81.
- Maulé, C.P. et T.A. Fonstad. 2000. Impacts of cattle penning on groundwater quality beneath feedlots. *Canadian Agricultural Engineering* 42(2): 87-93.
- MDDEP. 2007. Critères de qualité de l'eau de surface au Québec. Consultation Internet: http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/criteres_eau/index.htm (17 octobre 2007).

- Meals, D.W. 1996. Watershed-scale response to agricultural diffuse pollution control programs in Vermont, USA. *Water Science and Technology* 33: 197-204.
- Miller, D.N. et E.D. Berry. 2005. Cattle feedlot soil moisture and manure content: I. Impacts on greenhouse gases, odor compounds, nitrogen losses and dust. *Journal of Environmental Quality* 34(2): 644-655.
- Miller, J.J., E.C.S. Olson, D.S. Chanasyk, B.W. Beasley, L.J. Yanke, F.J. Larney, T.A. McAllister, B.M. Olson et L.B. Selinger. 2006. Bedding and within-pen location effects on feedlot pen runoff quality using a rainfall simulator. *Journal of Environmental Quality* 35(2): 505-515.
- Miller, J.J., B.P. Handerek, B.W. Beasley, E.C.S. Olson, L.J. Yanke, F.J. Larney, T.A. McAllister, B.M. Olson, L.B. Selinger, D.S. Chanasyk et P. Hasselback. 2004. Quantity and quality of runoff from a beef cattle feedlot in southern Alberta. *Journal of Environmental Quality* 33(3): 1088-1097.
- Miller, J.J., B.W. Beasley, L.J. Yanke, F.J. Larney, T.A. McAllister, B.M. Olson, L.B. Selinger, D.S. Chanasyk et P. Hasselback. 2003. Bedding and seasonal effects on chemical and bacterial properties of feedlot cattle manure. *Journal of Environmental Quality* 32(5): 1887-1894.
- Munoz-Carpena, R. et J.E. Parsons. 2004. A design procedure for vegetative filter strips using VFSMOD-W. *Transactions of the ASAE* 47(6): 1933-1941.
- Murphy, P., and J.P. Harner. 2001. Open lot runoff management options. Livestock poultry environmental stewardship curriculum. Lesson 22. Consultation Internet: www.LPES.org (5 septembre 2007).
- Olson, E.C.S., D.S. Chanasyk et J.J. Miller. 2006. Effects of bedding type and within-pen location on feedlot runoff. *Transaction of the ASABE* 49(4): 905-914.
- Olson, B.M., J.J. Miller, S.J. Rodvang et L.J. Yanke. 2005. Soil and groundwater quality under a cattle feedlot in southern Alberta. *Water Quality Research Journal of Canada* 40(2): 131-144.
- Paterson, J.J., J.H. Jones, F.J. Olsen et G.C. McCoy. 1980. Dairy liquid waste distribution in an overland flow vegetative-soil filter system. *Transactions of the ASAE* 23(4): 973-978.
- Pelletier, F., R. Joncas et M. Côté. 2004. Étude environnementale des enclos d'hivernage de vaches-veaux. IRDA. Décembre 2004. 102 pages.
- Robitaille, R. 2001. Effets des litières sur la gestion des fumiers de bovin en relation avec le guide de bonnes pratiques. Présentation PowerPoint. Consultation Internet: www.agrireseau.qc.ca (10 janvier 2008).

- Roodsari, R.M., D.R. Shelton, A. Shirmohammadi, Y.A. Pachepsky, A.M. Sadeghi et J.L. Starr. 2005. Fecal coliform transport as affected by surface condition. *Transactions of the ASAE* 48(3): 1055-1061.
- Schellinger, G.R. et J.C. Clausen. 1992. Vegetative filter treatment of dairy barnyard runoff in cold regions. *Journal of Environmental Quality* 21(1): 40-45.
- Schwer, C.B. et J.C. Clausen. 1989. Vegetative filter treatment of dairy milkhouse wastewater. *Journal of Environmental Quality* 18: 446-451.
- Smith, M. et R. Curse. 2000. Vegetative filter strips for improved surface water quality. Iowa State University, University Extension. PM 1507. 4 pages.
- SWA. 2003. Stewardship and economics of cattle wintering sites. Saskatchewan Watershed Authority. ISBN: 1-896793-31-2. 15 pages.
- Tate, K.W., G.A. Nader, D.J. Lewis, E.R. Atwill et J.M. Connor. 2000. Evaluation of buffers to improve the quality of runoff from irrigated pastures. *Journal of Soil and Water Conservation* 55(4): 473-478.
- Uusi-Kamppa, J. 2002. Nitrogen and phosphorus losses from a feedlot for suckler cows. *Agricultural and Food Science in Finland* 11(4): 355-369.
- USDA NRCS. 2006. Vegetative treatment systems for open lot runoff. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service.
- Vanderholm, D.H. et E.C. Dickey. 1980. Design of vegetative filters for feedlot runoff treatment in humid areas. *Transactions of the ASAE* 23: 681-684, 687.
- Williams, J.R., W.L. Harman, M. Magre, U. Kizil, J.A. Lindley, G. Padmanabhan et E. Wang. 2006. APEX Feedlot Water Quality Simulation. *Transactions of the ASABE* 49(1): 61-73.
- Woodbury, B.L., J.A. Nienaber et R.A. Eigenberg. 2005. Effectiveness of a passive feedlot runoff control system using a vegetative treatment area for nitrogen control. *Applied Engineering in Agriculture* 21(4): 581-588.
- Woodbury, B.L., J.A. Nienaber et R.A. Eigenberg. 2003. Performance of a passive feedlot runoff control and treatment system. *Transactions of the ASAE* 46(6): 1525-1530.
- Woodbury, B.L., J.A. Nienaber et R.A. Eigenberg. 2002. Operational evaluation of a passive beef cattle feedlot runoff control and treatment system. *Applied Engineering in Agriculture* 18(5): 541-545.
- Yang, S., J.H. Jones, F.J. Olsen et J.J. Paterson. 1980. Soil as a medium for dairy liquid waste disposal. *Journal of Environmental Quality* 9:370-372.
- Young, R. A., T. Huntrods, and W. Anderson. 1980. Effectiveness of vegetated buffer strips in controlling pollution from feedlot runoff. *Journal of Environmental Quality* 9(3): 483-487.