

Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire

Concours spécial 2010 – 2011

Bandes végétatives de saule et de graminées en baissières pour réduire les charges polluantes diffuses et produire de la biomasse dédiée

No projet 810083

Rapport final

Décembre 2013

Marc-Olivier Gasser, agr., Ph. D.

Chercheur et responsable scientifique

Stéphane P Lemay, ing., P.eng., Ph.D.

Directeur scientifique et responsable autorisé

irda Institut de recherche
et de développement
en agroenvironnement

Cultivons l'avenir, une initiative fédérale-provinciale-territoriale

Ministère
de l'Agriculture,
des Pêcheries
et de l'Alimentation
Québec 

 Agriculture et
Agroalimentaire Canada Agriculture and
Agri-Food Canada
Canada 

Auteurs :

Marc-Olivier Gasser, agr., Ph.D.	Chercheur, IRDA
Caroline Dufour-L'Arrivée, bio., M.Sc.	Professionnelle de recherche, IRDA
Michèle Grenier, bio, M.Sc.	Biostatisticienne, IRDA
Marie-Hélène Perron, agr., M.Sc.	Professionnelle de recherche, IRDA

Autres chercheurs impliqués :

Stéphane Godbout, ing., agr., P. Eng., Ph.D.	Chercheur, IRDA
Simon P. Guertin, agr., Ph.D.	Chercheur, IRDA
Frédéric Pelletier, ing., M.Sc.	Professionnel de recherche, IRDA

Partenaires de réalisation :

Xavier Desmeules, agr.,	Chargé de projet, Agrinova
Pierre Bélanger, agr.,	Consultant, Bélanger Agro-consultant
Nathalie Côté, agr.,	Agente en agroenvironnement FPBQ

Responsable de l'établissement :

Stéphane P. Lemay, ing., P. Eng., Ph.D.	Directeur scientifique, IRDA
---	------------------------------

Équipe technique:

Michel Lemieux,	Technicien, IRDA
Alain Soucy,	Ouvrier, IRDA
Michel Noël,	Ouvrier, IRDA
Jean-Marie Noël,	Ouvrier, IRDA
Guillaume Létourneau,	Professionnel de recherche, IRDA
Audrey Ouellet,	Étudiante, IRDA
Andréane Samson,	Étudiante, IRDA



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 :

Gasser, M.-O., C. Dufour-L'Arrivée, M. Grenier et M.-H. Perron. 2013. Bandes végétatives de saule et de graminées en baissières pour réduire les charges polluantes diffuses et produire de la biomasse dédiée. Rapport final déposé au MAPAQ - Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire. IRDA, Québec. 54 p. + annexes.

Sommaire exécutif

Les cultures pérennes herbacées (alpiste roseau, panic érigé) ou arbustives (saule) dédiées à la production de biomasse ou d'énergie offrent plusieurs avantages par rapport aux cultures annuelles dédiées. Elles nécessitent beaucoup moins d'intrants et d'énergie et peuvent fournir des services écologiques à l'environnement. Par exemple, si elles sont cultivées au pourtour des aires d'élevage, elles peuvent agir comme bandes végétatives filtrantes en plus de fournir de la biomasse pour des fins énergétiques, bioindustrielles ou de litière, ou encore comme brise-vent, source d'ombre et de protection aux animaux d'élevage.

L'aménagement d'une bande végétative filtrante en baissière vise à maximiser l'infiltration de l'eau et à favoriser l'absorption des éléments nutritifs par la végétation. Ce type d'aménagement comprend une risberme et une légère dépression pour accumuler l'eau en présence d'une couverture végétale pérenne. De telles baissières peuvent être aménagées pour intercepter les polluants contenus dans les eaux provenant de sources concentrées en amont, comme des enclos d'hivernage pour bovins de boucherie. Toutefois, peu de travaux ont tenté de comparer la capacité d'épuration d'une espèce arbustive à croissance rapide comme le saule à celle de graminées pérennes dans des bandes végétatives filtrantes et dans diverses conditions de baissières. Les connaissances sur les volumes d'eau et les charges que de tels aménagements peuvent filtrer sous les conditions québécoises sont également nécessaires pour guider leur conception. Une fois la capacité filtrante déterminée pour une de ces cultures aménagées en baissières, une bande végétative pourrait être conçue avec des aménagements en cascade pour assurer le contrôle efficace d'une source de pollution diffuse située en amont de ces bandes.

Objectifs et Méthodologie

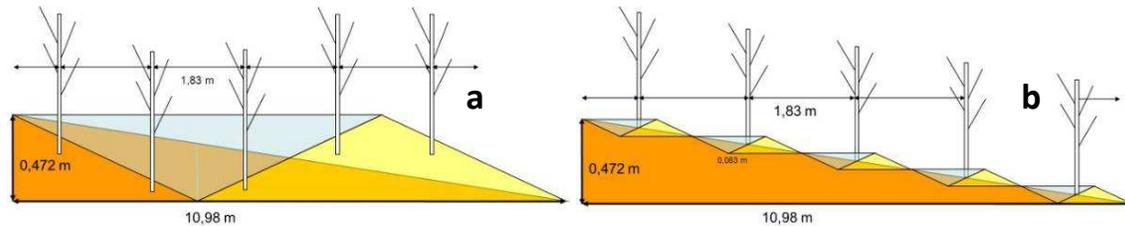
Un projet a donc été réalisé à la ferme expérimentale de l'IRDA à Saint-Lambert-de-Lauzon de 2010 à 2013 avec les objectifs suivants:

- Préciser l'efficacité des baissières végétalisées à réduire le ruissellement et à capter les sédiments et les fertilisants;
- Déterminer le meilleur aménagement des cultures de saule et de graminées dans des baissières pour maximiser la capacité filtrante de ces aménagements;
- Évaluer la biomasse produite et les prélèvements d'éléments nutritifs par les cultures de saule ou de graminées pérennes implantées en baissières.

Le dispositif expérimental comprenait 15 parcelles de 4 x 40 mètres situées sur un sol de type loam à loam sableux avec une pente de 4,5 %. Une prairie maintenue dans le haut des parcelles a reçu des applications répétées et massives de lisier de porc pour simuler des charges concentrées d'effluent d'élevage, soit un apport total de 43 kg N et de 9 kg de P par parcelle sur trois ans, comparable à la charge produite par un élevage de vache-veau en enclos d'hivernage. Dans le bas des parcelles, cinq patrons de bandes végétatives filtrantes de 4 x 11 mètres comprenant soit une couverture pérenne d'alpiste roseau (*Phalaris arundinacea* L.) ou de saule (*Salix miyabeana*) et différents aménagements de baissières ont été comparés:

1. Témoin - prairie d'alpiste roseau sans baissière (Alpiste témoin)
2. Cinq rangées de saule espacées de 1,83 m (6') sans baissière (Saule sb)
3. Prairie d'alpiste roseau aménagée dans une baissière de 7,3 m (24') (Alpiste/1)
4. Cinq rangées de saule de 1,83 m (6') dans une baissière de 7,3 m (24') (Saule/1)
5. Cinq rangées de saule de 1,83 m (6') intercalées dans cinq baissières de 1,83 m (Saule/5)

Les cinq traitements ont été répétés trois fois dans un dispositif en blocs aléatoires. Chaque parcelle était instrumentée pour capter, mesurer et échantillonner les eaux de ruissellement à sa sortie. Les mesures de ruissellement réalisées durant l'année ont permis de déterminer la capacité filtrante de tels aménagements à la fois au moment du dégel printanier ou en pleine période de croissance. Les mesures ont également porté sur la productivité des cultures dans ces aménagements et des exportations en éléments fertilisants, sur l'accumulation de ces éléments dans le sol des baissières et sur les concentrations dans l'eau du sol à la sortie des baissières.



**Aménagement d'une baissière unique pour cinq rangées de saule (Saule/1) (a)
et de cinq baissières pour cinq rangées de saule (Saule/5) (b)**

Résultats significatifs pour l'industrie

Les baissières ont été relativement efficaces pour réduire le ruissellement et les charges ruisselées. La baissière d'alpiste roseau (Alpiste/1) a réduit de 37 % le ruissellement, comparativement à la bande d'alpiste sans baissière (Alpiste témoin). De même, le saule sur cinq baissières (Saule/5) a réduit le ruissellement de 46 % par rapport au saule sans baissière. L'efficacité des différents patrons de baissières semble toutefois varier selon la culture implantée : dans les baissières uniques (Alpiste/1 et Saule/1) comparées aux bandes sans baissière (Alpiste témoin et Saule sb), l'alpiste a été plus efficace que le saule pour réduire le ruissellement et les charges.

Les réductions de ruissellement ont eu un impact important sur la qualité de l'eau en réduisant les charges cumulées de MES, N total dissous, N-NH₄, N-NO₃, P total, K, Ca, Mg, Na, B, Cu et Mn à la sortie des baissières. Sur la durée du projet, les baissières d'Alpiste/1 et de Saule/5 ont réduit de plus de moitié les charges de N total dissous par rapport à l'Alpiste témoin et au Saule/1, respectivement. Les concentrations moyennes pondérées en N-NH₄ dans l'eau ruisselée dépassaient légèrement le critère de qualité de l'eau de 1,5 mg/L, tandis que celles de nitrate étaient acceptables par rapport à son critère de 10 mg/L. Pour le phosphore, la baissière d'Alpiste/1 a considérablement réduit les charges de P total ruisselées par rapport à l'Alpiste témoin. Le saule en baissières (Saule/1 et Saule/5) a aussi réduit les charges en P total par rapport au saule sans baissière, mais dans une moindre mesure. Cependant, malgré ces importantes réductions de charges, les concentrations en P dans l'eau ruisselée à la sortie des baissières demeuraient élevées, excédant de 50 à 150 fois le critère de 30 µg/L de P total. De plus, la majeure partie du P ruisselé était sous forme d'orthophosphates, une forme très biodisponible.

Les rendements en biomasse du saule et de l'alpiste roseau ont été similaires durant ce projet et ils n'ont pas été affectés significativement par les différents patrons de baissières. La récolte d'alpiste roseau a exporté cinq fois plus de K (102 vs 20 kg/ha/an), deux fois plus de P (15,4 vs 8,3 kg/ha/an) et deux fois plus de Mg (9,3 vs 5,4 kg/ha/an) que celle du saule. Par contre, le

saule a exporté près de quatre fois plus de Ca et trois fois plus de Zn que l'alpiste roseau. Quant à l'azote, des quantités similaires d'environ 70 kg N/ha/an ont été exportées par les deux cultures. Il faut noter que les rendements obtenus ont été plutôt modestes, étant donné la durée du projet versus la période d'implantation de ces cultures pérennes, ainsi que la baisse du niveau de fertilité due au remaniement du sous-sol à la surface lors de la création des baissières. On pourrait donc s'attendre à une hausse des rendements et des prélèvements lors des prochaines récoltes, à mesure que les charges provenant de l'amont fertiliseront les bandes végétatives et que le saule et l'alpiste s'établiront à leur plein potentiel.

Une augmentation marquée des teneurs en éléments fertilisants a été observée dans le sol au fil du temps, liée notamment aux apports de lisier en amont. Comparativement au saule, l'alpiste roseau a réduit les teneurs en éléments solubles et mobiles comme N-NO₃ et Na-M₃, ainsi que les teneurs en K-M₃, P-M₃ et Mg-M₃ considérés moins mobiles. Les prélèvements plus importants de ces éléments dans la biomasse d'alpiste sont probablement responsables des plus faibles teneurs mesurées dans le sol.

Applications possibles pour l'industrie

Des baissières végétalisées pourraient être aménagées pour assurer un contrôle efficace des polluants provenant de sources concentrées en amont, comme des enclos d'hivernage pour bovins de boucherie. La biomasse produite par les cultures pérennes de saule ou de graminées implantées dans ces zones pourrait être destinée à la production énergétique ou à d'autres usages. Les connaissances acquises durant ce projet sur les volumes d'eau et les charges que ces aménagements peuvent filtrer aideront à guider leur conception. Il serait pertinent de poursuivre cette recherche sur quelques années afin de bien évaluer le potentiel de production et de prélèvement des plantes dédiées et de mieux comprendre le cheminement de l'eau et des nutriments dans les baissières. La réflexion sur les méthodes d'aménagement et de gestion de telles baissières à la ferme doit aussi être approfondie.

Point de contact pour information

Marc-Olivier Gasser
Téléphone : 418 643-2380 poste 650
Télécopieur : 418 644-6855
Courriel : marc-o.gasser@irda.qc.ca

Remerciements aux partenaires financiers

Ces travaux ont été réalisés grâce à une aide financière du Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire, un programme issu de l'accord du cadre Cultivons l'avenir conclu entre le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec et Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Les activités de diffusion et de transfert aux utilisateurs

Activités réalisées	Description (Thème, titre, endroit, etc.)	Date de réalisation	Nombre de personnes rejointes	Autres
Journée Portes ouvertes pour agriculteurs et conseillers organisée par le MAPAQ	Station expérimentale de Saint-Lambert-de-Lauzon	18 août 2010	150	Description du projet dans une fiche technique
Journées de formation pour les étudiants en agronomie de l'Université Laval	Station expérimentale de Saint-Lambert-de-Lauzon	10 sept. 2010 7 octobre 2011 4 octobre 2013	100 90 110	
Présentation orale devant une assemblée de conseiller	Colloque Agromatériaux et autres matériaux biosourcés, Lévis.	8 novembre 2012	200	
Journée Portes ouvertes pour agriculteurs et conseillers organisée par l'IRDA	Station expérimentale de Saint-Lambert-de-Lauzon	15 août 2013	150	Description du projet et des résultats dans une fiche technique

Les activités de transfert scientifique

Activités réalisées	Description (Thème, titre, endroit, etc.)	Date de réalisation	Nombre de personnes rejointes	Autres
Aucune activité de transfert scientifique complétée pour l'instant				

Table des matières

Sommaire exécutif.....	iii
Les activités de diffusion et de transfert aux utilisateurs	vi
Les activités de transfert scientifique.....	vii
Table des matières	viii
Liste des figures.....	x
Liste des tableaux.....	xii
Introduction.....	13
1 Utilisation de la biomasse.....	15
2 Résultats anticipés.....	16
Hypothèse	16
Objectifs.....	16
Méthodologie	17
1 Site et climat	17
2 Aménagement du dispositif	20
3 Dispositif de mesure des eaux de ruissellement.....	23
4 Lysimètres à succion.....	24
5 Les paramètres mesurés.....	24
6 Traitements statistiques.....	25
Résultats.....	26
1 Charges fertilisantes appliquées.....	26
2 Rendements en biomasse et prélèvements.....	26
2.1 Rendements en biomasse	27
2.2 Concentrations en éléments dans la biomasse récoltée	30
2.3 Prélèvements et exportations en éléments dans la biomasse récoltée	30
3 Évolution de l'analyse de sol dans les bandes végétatives	32
4 Analyse de l'eau dans le sol à la sortie des bandes végétatives.....	36
5 Qualité de l'eau ruisselée à la sortie des bandes végétatives.....	38
5.1 Effet des bandes végétatives sur le ruissellement de l'eau	41
5.2 Effet des bandes végétatives sur le ruissellement de l'azote	41
5.3 Effet des bandes végétatives sur le ruissellement du phosphore	44
5.4 Effet des bandes végétatives sur le ruissellement des autres éléments (K, Ca Na, Al, B, Cu, Fe, Zn).....	46

6	Bilan partiel de l'azote et du phosphore	47
7	Discussion	48
	Conclusion	50
	Remerciements	51
	Bibliographie.....	52
	Annexe 1. Analyses des lisiers épandus en amont des bandes végétatives	55
	Annexe 2. Calcul des charges annuelles d'azote et de phosphore produites par un élevage de vache-veau de faible densité.....	56
	Annexe 3. Analyses de sol dans les bandes végétatives filtrantes.....	57
	Annexe 4. Analyses de l'eau du sol (lysimètres à succion).....	58
	Annexe 5. Analyses de l'eau de ruissellement	59

Liste des figures

Figure 1. Parcelle de saule (<i>Salix miyabeana</i>) (a), parcelle d’alpiste roseau (<i>Phalaris arundinacea</i> L.) (b).....	13
Figure 2. Précipitations totales journalières à la station expérimentale de Saint-Lambert-de-Lauzon pour la durée de l’étude.....	19
Figure 3. Plan du dispositif expérimental à Saint-Lambert-de-Lauzon.	20
Figure 4. Aménagement d’une baissière unique pour cinq rangées de saule (Saule/1) (a) et de cinq baissières pour cinq rangées de saule (Saule/5) (b).	21
Figure 5. Installation des tôles galvanisées pour séparer les bandes végétatives (a) et profilage de 5 baissières pour le traitement 5 (b).	21
Figure 6. Implantation après deux ans du saule dans cinq baissières (a) et de l’alpiste roseau dans une baissière (b) le 7 mai 2012. État de la croissance du saule (c) et de l’alpiste (d) dans les mêmes bandes végétatives le 31 juillet 2012.	22
Figure 7. Risberme aménagée au pourtour de la prairie pour isoler le ruissellement (a) et épandage de lisier dans la prairie en amont des bandes végétatives filtrantes (b).	23
Figure 8. Dalles installées à la sortie des bandes végétatives filtrantes (a) pour canaliser l’eau vers les dispositifs de mesure et d’échantillonnage des volumes d’eau ruisselés (b).....	23
Figure 9. Lysimètres installés à la sortie de la bande végétative de chaque parcelle à 40 cm (a) et 20 cm (b) de profondeur dans le sol.....	24
Figure 10. Rendement de l’alpiste roseau en 2011 et 2012 et somme des rendements d’alpiste et de Saule pour 2011 et 2012. Les barres d’erreur illustrent les écarts types.....	27
Figure 11. Rendement de l’alpiste roseau (2011 et 2012) et de saule (2012) selon sa position amont-aval dans la bande végétative filtrante. Les barres d’erreur illustrent les écarts types.....	30
Figure 12. Exportations en nutriments dans la biomasse récoltée de l’alpiste roseau en 2011 et 2012 et du saule en 2012.....	31
Figure 13. Augmentation dans le temps des teneurs en éléments disponibles dans le sol en fonction de la position amont-aval dans la bande végétative.....	32
Figure 14. Variation des teneurs en éléments disponibles dans le sol en fonction de la culture.....	34
Figure 15. Variation des teneurs en éléments disponibles dans le sol en fonction de la culture.....	34
Figure 16. Évolution des teneurs en éléments disponibles dans le sol en fonction de la culture et de la position amont-aval dans la bande végétative.....	35
Figure 17. Évolution des différentes formes de N (a) et de P (b) dans l’eau du sol à la sortie des bandes végétatives.....	37

Figure 18. Effets des cultures d’alpiste et de saule en baissières ou non sur les concentrations en N (a) et P (b) dans l’eau du sol à la sortie des bandes végétatives.....	37
Figure 19. Ruissellement cumulé (a) et charges cumulées de MES (b) au cours du temps en fonction des cinq bandes végétatives.....	41
Figure 20. Évolution des charges cumulées (a) et des concentrations moyennes pondérées (b) de N total dissous dans l’eau de ruissellement.....	42
Figure 21. Évolution des concentrations moyennes pondérées de N-NH ₄ (a) et de N-NO ₃ (b) dans l’eau de ruissellement.....	43
Figure 22. Évolution de la proportion de N-NH ₄ (a) et de N-NO ₃ (b) par rapport à N total dissous dans l’eau de ruissellement.	44
Figure 23. Relation entre les concentrations de N-NH ₄ , N-NO ₃ , N organique et N total dissous (a), et relation en P ortho, P total dissous et P total (b).	44
Figure 24. Évolution des charges cumulées (a) et des concentrations moyennes pondérées (b) de P total (digestion persulfate acide) dans l’eau de ruissellement.	45

Liste des tableaux

Tableau 1. Propriétés physico-chimiques initiales du sol à l'étude.	17
Tableau 2. Données mensuelles de température et de précipitation à la station expérimentale de Saint-Lambert-de-Lauzon pour la durée de l'étude.	18
Tableau 3. Charges totales moyennes d'azote et de phosphore appliquées par parcelle.	26
Tableau 4. Rendement et exportations d'éléments dans les biomasses récoltées d'alpiste roseau et de saule.	28
Tableau 5. Concentrations en éléments totaux dans les biomasses récoltées d'alpiste roseau et de saule.	28
Tableau 6. Analyse de variance sur les rendements d'alpiste roseau et de saule et effet de la position amont-aval dans la bande végétative en 2012.	29
Tableau 7. Analyse de variance sur les propriétés du sol.	33
Tableau 8. Analyse de variance sur les concentrations en N et P de l'eau du sol à la sortie des bandes végétatives.	36
Tableau 9. Analyse de variance sur les charges mesurées dans l'eau de ruissellement.	39
Tableau 10. Analyse de variance sur les concentrations moyennes pondérées mesurées dans l'eau de ruissellement.	40
Tableau 11. Bilan partiel de l'azote et du phosphore.	47
Tableau 12. Dates et fréquence d'échantillonnage par période d'échantillonnage.	59
Tableau 13. Charges en éléments nutritifs cumulées dans les eaux de ruissellement par traitement et par période d'échantillonnage.	60
Tableau 14. Concentrations moyennes pondérées en éléments nutritifs dans les eaux de ruissellement par traitement et par période d'échantillonnage.	61

Introduction

Parmi les cultures dédiées à la production de bioproduits industriels ou énergétiques, les cultures pérennes herbacées ou arbustives offrent plusieurs avantages écologiques et environnementaux par rapport aux cultures annuelles. Elles réduisent entre autres les opérations de travail du sol et s'inscrivent donc dans des pratiques de conservation des sols et de l'eau. Les cultures pérennes peuvent être utilisées à la ferme pour la production de litière ou pour la production d'énergie, réduisant la dépendance aux énergies fossiles et les émissions de CO₂. Elles peuvent également être utilisées en phytoremédiation (Sanderson et al., 2001). Ces cultures sont notamment souvent utilisées à cette fin dans des aménagements municipaux, routiers et agricoles (Borjesson, 1999).

La phytoremédiation consiste à utiliser les plantes pour leur capacité à prélever les nutriments et les polluants en provenance des eaux contaminées et d'agir comme filtre végétatif. Les plantes à croissance rapide arbustives (ex. : saule (Figure 1a), peuplier) ou herbacées pérennes (ex. : alpiste roseau (Figure 1b), spartine pectinée, barbon de Gérard) sont particulièrement adaptées à ce rôle avec une croissance étendue sur une plus longue période de l'année que les cultures annuelles. De plus, les cultures pérennes, en recouvrant le sol, réduisent considérablement l'érosion des sols, ralentissent le ruissellement et favorisent la déposition des particules en suspension et l'infiltration de l'eau dans le sol (Blanco-Canqui et al., 2004). En passant dans les baissières, la vitesse des eaux de ruissellement est ralentie par la végétation et le volume de ces eaux est réduit grâce à l'infiltration (Yu et al., 2001). Par la suite, la récolte de la biomasse aérienne des plantes pérennes permet d'exporter en dehors du système les nutriments prélevés et de réduire les charges accumulées au sol.

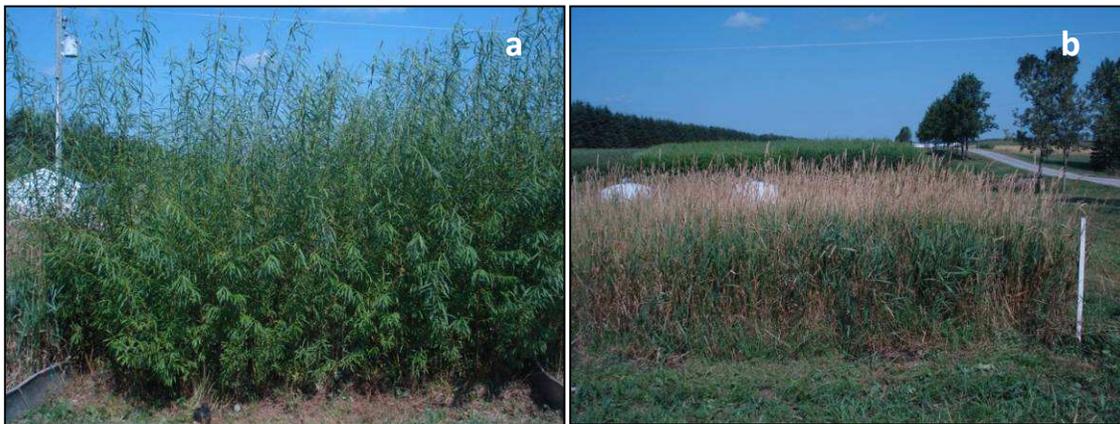


Figure 1. Parcelle de saule (*Salix miyabeana*) (a), parcelle d'alpiste roseau (*Phalaris arundinacea L.*) (b).

La culture du saule semble prometteuse pour la production de biomasse et la phytoremédiation. En effet, la capacité d'absorption des éléments fertilisants (N, P, oligoéléments) par le saule est nettement supérieure à celles des cultures traditionnelles en raison de son système racinaire très développé et de sa croissance exceptionnelle. La forte densité des racines d'une plantation mature forme un filtre végétal très efficace pour limiter le lessivage des éléments vers les eaux souterraines. L'évapotranspiration très élevée de cette culture en pleine saison de croissance offre donc des possibilités de recycler des eaux usées ou chargées en contaminants en provenance d'élevages extérieurs. Guidi Nissim et al. (2014) rapportent les capacités d'une plantation de saule utilisée pour le traitement d'eau souterraine contaminée sur un site

industriel abandonné dans le secteur de Pointe-Saint-Charles à Montréal, Québec. Durant une période de 2 ans, 5200 m³/ha d'eau chargée en N-NH₄ et autres contaminants ont été appliqués en irrigation sur la plantation sans effets adverses sur les concentrations en éléments mesurés dans l'eau du sol.

Les systèmes de traitement des eaux usées basés sur les plantes sont des alternatives peu coûteuses comparativement aux systèmes de traitement des eaux usées conventionnels (Woodbury et al., 2003; Rahman et al., 2012). Ces systèmes offrent aussi un service écologique en augmentant les habitats pour la faune sauvage, particulièrement quand elles sont constituées de plantes pérennes indigènes (Blanco-Canqui et al., 2004). De plus, les systèmes basés sur les plantes offrent une très bonne capacité de sédimentation des particules solides avec un minimum de temps requis pour la maintenance et les opérations (Woodbury et al., 2003). Ces systèmes nécessitent toutefois de grandes surfaces végétalisées pour capter et traiter les eaux usées et sont peu ou pas opérationnels en dehors de la saison de croissance. Une plus grande efficacité de la part des systèmes de traitement végétatif est souvent souhaitée en vue de réduire les besoins en superficie et les coûts associés. D'ailleurs, l'aménagement de la bande végétative filtrante en terrasse (« swale ») comprenant une risberme et une légère dépression pour accumuler l'eau, permet de ralentir la vitesse de l'eau, d'augmenter son infiltration dans la bande végétative et ainsi favoriser le prélèvement des éléments nutritifs contenus dans l'eau de ruissellement par la végétation (Deletic, 2006). L'installation de déversoir en « V » (restricteur de débit) à l'intérieur des « swales » est aussi encouragée dans certains cas afin d'augmenter les temps de résidence et de créer des zones d'accumulation (Yu et al., 2001).

Au Québec, les bandes végétatives filtrantes font déjà partie des mesures de protection à mettre en place en aval des enclos d'hivernage dans les élevages vaches-veaux. Or en période de fonte des neiges, lors des plus gros événements de ruissellement annuel, la bande herbacée n'est pas suffisante pour contenir la lame d'eau ruisselée ou protéger le sol de l'érosion dans les enclos (Pelletier et al., 2008). Un bassin de décantation entre l'enclos et la bande végétative filtrante a d'ailleurs été recommandé et des risbermes sont aussi utilisées chez certains producteurs bovins pour contenir l'eau et la redistribuer dans la bande végétative filtrante (FPBQ, 1999). Selon les observations de son dernier rapport, la FPBQ (Côté et St-Cyr, 2012) recommande l'ajout d'aménagements supplémentaires (risbermes, andain filtrant, etc.) pour assurer une bonne distribution des écoulements lorsqu'on est en présence d'enclos superposés ou d'écoulement sur un seul côté et une largeur d'écoulement de moins d'un mètre par vache-veau. La risberme ou l'andain filtrant, qu'il soit permanent ou ponctuel, permet de mieux diffuser ou de ralentir les écoulements. Cette même étude recommande de prêter une attention particulière aux premiers 40 mètres des bandes végétatives filtrantes dès leur conception et, par la suite, dans la régie. Celles-ci doivent avoir une hauteur minimale de 15 cm à l'automne : le pâturage des bandes doit donc être évité ou contrôlé.

D'autre part, l'efficacité de ces systèmes extensifs est très fortement reliée aux caractéristiques locales tels le climat, la pluviométrie, le type de sol, la topographie, la végétation, etc. (Deng et al., 2011). D'autres paramètres vont aussi influencer les performances : le type de sol, le type et le patron de végétation, le contenu initial en eau du sol, le débit de l'affluent et sa concentration en polluants, le type d'écoulement, la distribution des particules de sols, la longueur de la bande filtrante et sa pente, etc. (Deng et al., 2011; Rahman et al., 2012). Bref, il n'existe pas de systèmes passe-partout. Le design d'un système doit tenir compte des conditions propres à chaque scénario et les performances doivent aussi être évaluées en fonction des exigences

réglementaires qui prévalent. Le temps de rétention hydraulique, le taux de chargement de la surface ou de l'aire spécifique sont aussi des paramètres qui influencent le design des baissières (Bäckström, 2003).

À l'heure actuelle, il n'existe pas de travaux qui permettent d'établir le volume d'eau et la charge contaminante que de tels aménagements pourraient emmagasiner et prélever sous nos conditions climatiques ni sur les cultures à prioriser. Connaissant ces capacités, il serait possible de concevoir des aménagements avec le nombre requis de terrasses et d'allées de végétaux en contour qui permettraient de contrôler efficacement les charges contaminantes provenant d'une source en amont. Par ailleurs, l'évaluation de la performance et de la capacité de ces aménagements pourra être transférée à d'autres élevages, notamment celles des élevages biologiques qui doivent permettre aux animaux d'accéder à des enclos extérieurs. Les élevages d'animaux fouisseurs comme le porc ou le sanglier bénéficieraient de tels aménagements non seulement pour s'assurer d'un contrôle du ruissellement hors de l'enclos, mais aussi pour le confort des animaux que pourrait procurer l'ombrage du saule et l'approvisionnement d'une source de litière ou d'une biomasse pour la production d'énergie.

Ce projet devrait donc permettre à ces élevages de dimensionner les baissières nécessaires pour capter le ruissellement en combinaison avec des plantes efficaces pour produire de la biomasse et assainir les eaux chargées.

1 Utilisation de la biomasse

Le faible prix de l'énergie au Québec actuellement freine inévitablement le développement d'une filière pour les biocarburants ou les biocombustibles. Toutefois, cette situation pourrait changer selon les régions et plusieurs avenues sont déjà disponibles pour les producteurs de biomasse agricole. À titre d'exemple, en Ontario, le gouvernement s'est engagé à éliminer progressivement le charbon dans les centrales électriques de l'Ontario Power Generation (OPG) d'ici la fin de 2014. L'OPG et le ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales (MAAARO), avec le soutien du ministère de l'Énergie et de l'Infrastructure (MEI), coordonnent une analyse de faisabilité relative à l'exploitation commerciale de biomasse agricole destinée à produire de l'énergie par combustion en Ontario (MAAARO, 2013).

Dans le même ordre d'idée au Québec, en 2012, la Coop fédérée et le Centre de développement bioalimentaire du Québec ont signé une entente de partenariat afin d'installer et tester une technologie de production de chaleur à partir de biomasse agricole (Novae, 2013). Cette initiative s'est basée sur les perspectives à la hausse du prix des énergies fossiles à moyen et long terme et sur le potentiel immense de la valorisation de la biomasse d'origine forestière et agricole pour combler les besoins en énergie des particuliers, des installations publiques et des commerces.

Par ailleurs au Canada, le potentiel de la biomasse agricole est beaucoup plus limité que celui de la biomasse forestière par rapport aux superficies, aux saisons de culture et au potentiel énergétique (1 m³ de bois fournit autant d'énergie que 5 à 10 m³ de résidus agricoles compactés) (Cruickshank et al., 2013).

Étant donné cette compétition avec la biomasse forestière, la biomasse agricole sera mieux valorisée à l'intérieur des exploitations agricoles ou localement. En effet, la plupart des résidus agricoles peuvent servir de fourrage, de conditionneurs de sol, de paillis ou de litière. La combustion de la paille dans un four spécialement conçu peut servir à assécher le grain et à chauffer les bâtiments de ferme, dont les poulaillers et les serres.

Les cendres obtenues lors de la combustion de la biomasse agricole peuvent également être valorisées. Selon Godbout et al. (2012), les cendres peuvent être utilisées comme fertilisant ou amendement agricole ou forestier, comme molluscides dans les cultures maraîchères ou comme agent structurant en construction. Dans ce dernier domaine, les cendres sont utilisées pour la fabrication du béton, pour la construction des routes et dans les matériaux de terrassement.

Au niveau des marchés, on trouvera des débouchés auprès des institutions (écoles, hôpitaux) pour le chauffage ou cogénération et dans le secteur industriel pour la fabrication de différents matériaux. La fabrication de panneaux agglomérés, de granules, de papier et de carton en est un exemple.

2 Résultats anticipés

Cette recherche comporte plusieurs éléments novateurs. L'optimisation de la production de plantes pérennes dédiées aux bioproduits industriels a rarement été étudiée dans des aménagements hydroagricoles en baissières et son emploi en bordure des élevages pourrait être doublement avantageux :

En fournissant une source de biomasse peu dispendieuse qui pourra servir à la production d'énergie ou à assurer un approvisionnement plus constant de matériel pour les litières à la ferme.

En procurant des bénéfices environnementaux additionnels en captant et filtrant les eaux contaminées des élevages situés en amont de la bande végétative filtrante.

Peu de travaux ont été réalisés à ce jour pour optimiser la capacité de captage et de filtration de la bande végétative filtrante avec l'utilisation de baissières. Contrairement aux prairies de graminées, peu de travaux permettent de caractériser l'efficacité du saule cultivé en contour pour capter le ruissellement et filtrer les eaux chargées. Ces travaux devraient apporter des connaissances nouvelles sur l'efficacité de ces cultures dans les aménagements hydroagricoles proposés.

Les solutions proposées à la suite de ces essais pourront permettre de concevoir de nouvelles bandes végétatives filtrantes. Ces concepts seront évalués et révisés par divers intervenants (Godbout, Côté, Bélanger) déjà impliqués dans la filière des enclos d'hivernage de vaches-veaux, afin de s'assurer du plein potentiel de transfert de ces résultats.

Hypothèse

La combinaison d'une baissière et d'une culture pérenne permet de capter et de filtrer le ruissellement d'eaux contaminées provenant de charges concentrées en amont et de produire davantage de biomasse que la culture seule sans risberme.

Objectifs

Combiner la production de biomasse à partir de cultures pérennes de saule ou de graminées pérennes pour capter et filtrer le ruissellement des eaux contaminées.

Déterminer comment aménager des cultures de saule et de graminées dans des baissières (risberme ou *swale*) pour maximiser la capacité filtrante de ces aménagements.

Préciser l'efficacité d'une baissière végétalisée à réduire le ruissellement et à capter les sédiments et les fertilisants en milieu agricole.

Méthodologie

1 Site et climat

Un dispositif expérimental comprenant 15 parcelles (4 m x 40 m) instrumentées pour mesurer le ruissellement et l'érosion a été mis à la disposition du projet à la station expérimentale de Saint-Lambert-de-Lauzon près de Québec (Lat. : 46°36'20"; Long. : 71°10'17"; Élev. : 115 m). Le dispositif a été implanté sur un sol de la série Lebras classifié comme gleysol humique. La texture de surface varie de loam à loam sableux. Le Tableau 1 rapporte les propriétés initiales du sol à l'étude. Le sol de surface présentait une fertilité relativement basse avec une teneur en matière organique (MOS) de 2,4 % de 0 à 10 cm de profondeur dans le sol et de 1,2 % de 10 à 20 cm, un indice de saturation en phosphore (ISP) de 5,1 % et de 2,0 % et une teneur en potassium extrait au Mehlich-3 (K M3) de 180 et 129 kg/ha pour les mêmes profondeurs. La pente moyenne du site était de 4,5 %.

Tableau 1. Propriétés physico-chimiques initiales du sol à l'étude.

Unité	Profondeur dans le sol						
	0-10		10-20		20-40		
	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type	Moyenne	Écart type	
Sable	mg/g	501	77	515	75		
Limon	mg/g	403	61	384	63		
Argile	mg/g	96	25	101	19		
MOS	mg/g	24.4	2.4	12.3	1.2		
pH eau		6.4	0.3	6.3	0.2	6.6	0.2
P M3	mg/kg	48	39	19	12	9	3
K M3	mg/kg	80	27	58	17	44	9
Ca M3	mg/kg	923	171	849	115	725	129
Mg M3	mg/kg	113	24	92	15	147	67
Al M3	mg/kg	949	130	965	130	981	213
Fe M3	mg/kg	204	28	203	30	172	19
Mn M3	mg/kg	34	13	31	14	48	29
Na M3	mg/kg	6.9	1.5	7.8	1.6	14.2	4.5
B M3	mg/kg	0.2	0.04	0.2	0.02		
Cu M3	mg/kg	1.11	0.20	1.13	0.22	1.00	0.21
Zn M3	mg/kg	1.62	0.85	1.49	0.84	1.14	0.42
ISP (P/Al)	%	5,1		2,0			

Le climat est tempéré froid avec une saison de croissance variant de 111 à 144 jours. Le Tableau 2 présente les valeurs mensuelles de température et de précipitation pour la durée de l'étude. Les données de températures et de précipitations sans gel proviennent de la station météorologique de l'IRDA installée à moins de 500 m du dispositif et de la station de Scott d'Environnement Canada pour les précipitations hivernales sous forme de neige et de pluie. Le site reçoit en moyenne des précipitations totales supérieures à 1100 mm par année.

Comme ailleurs au Québec, l'année 2012 a été caractérisée par des températures plus élevées et des périodes de sécheresse plus importantes durant la saison de croissance par rapport aux normales saisonnières. L'année 2011 est quant à elle caractérisée par des précipitations importantes durant les mois d'août et septembre, durant lesquels a été enregistré un

évènement de près 80 mm de précipitations en une journée. La Figure 2 présente les précipitations totales journalières.

Tableau 2. Données mensuelles de température et de précipitation à la station expérimentale de Saint-Lambert-de-Lauzon pour la durée de l'étude.

	Température minimale			Température moyenne.			Température maximale			Précipitations totales		
	°C									mm		
	2011	2012	2013	2011	2012	2013	2011	2012	2013	2011	2012	2013
Janvier	-29	-26	-33	-10	-10	-10	6	3	9	32	105	67
Février	-22	-21	-26	-9	-7	-8	7	4	6	114	52	67
Mars	-27	-17	-17	-4	0	-1	9	23	12	148	74	61
Avril	-10	-6	-9	3	5	4	16	28	24	100	66	71
Mai	-1	-1	-1	10	13	13	25	31	30	165	140	184
Juin	3	3	5	17	17	15	31	31	30	106	215	137
Juillet	10	8	8	20	20	20	31	33	32	131	40	129
Août	9	10	7	18	20	18	30	33	36	221	109	122
Septembre	4	0	2	14	14	13	25	30	25	170	122	158
Octobre	-4	-3		8	8		24	22		88	136	
Novembre	-12	-8		3	1		17	14		48	16	
Décembre	-26	-23		-5	-6		8	10		109	144	
Somme										1434	1218	995

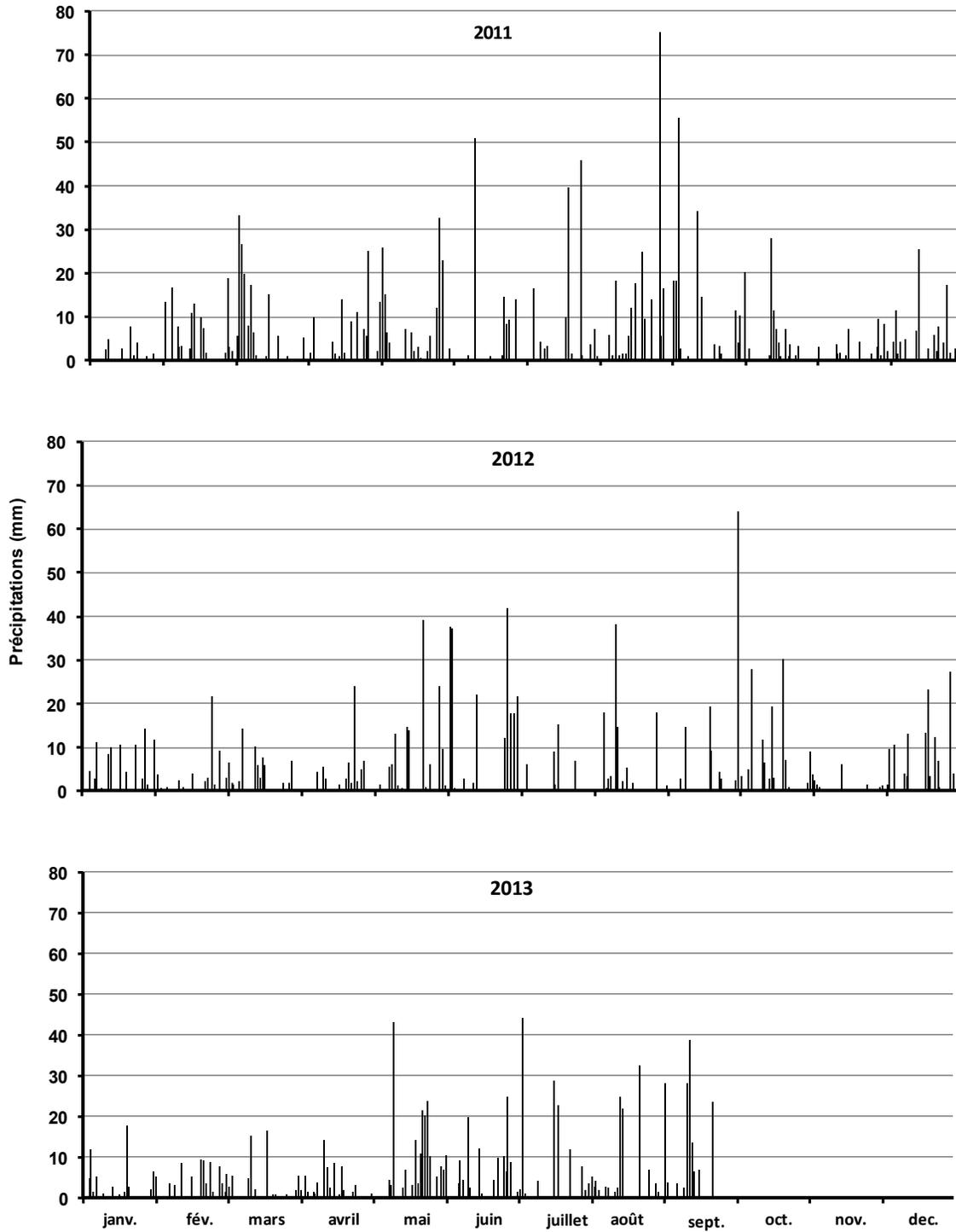


Figure 2. Précipitations totales journalières à la station expérimentale de Saint-Lambert-de-Lauzon pour la durée de l'étude.

2 Aménagement du dispositif

Le dispositif et les parcelles ont été aménagés dès l'initiation du projet au printemps 2010. Le dispositif est constitué de 15 parcelles séparées en deux sections (Figure 3). La partie en amont des parcelles était sous prairie sur 29 m de long pour recevoir des apports répétés de lisier et simuler des charges contaminantes, tandis que la section en aval était aménagée en bandes végétatives filtrantes de 11 m de long avec ou sans baissière (Figure 4). Cinq traitements de bandes végétatives ont été comparés et distribués de façon aléatoire, dans un dispositif en bloc complet répété trois fois (Figure 3). Les bandes végétatives filtrantes étaient constituées soit d'alpiste roseau (*Phalaris arundinacea* L.) ou de saule (*Salix miyabeana*). L'alpiste roseau a été implanté sans baissières ou dans une grande baissière de 7,3 m de large, tandis que le saule a été implanté sans baissière ou soit dans une grande baissière de 7,3 m de large ou dans cinq petites baissières de 1,83 m de large :

1. Témoin - prairie d'alpiste roseau sans baissière (Alpiste témoin)
2. Cinq rangées de saule de 1,83 m (6') sans baissière (Saule sb)
3. Prairie d'alpiste roseau aménagée dans une baissière de 7,3 m (24') (Alpiste/1)
4. Cinq rangées de saule de 1,83 m (6') dans une baissière de 7,3 m (24') (Saule/1)
5. Cinq rangées de saule de 1,83 m (6') intercalées dans cinq baissières de 1,83 m (Saule/5)

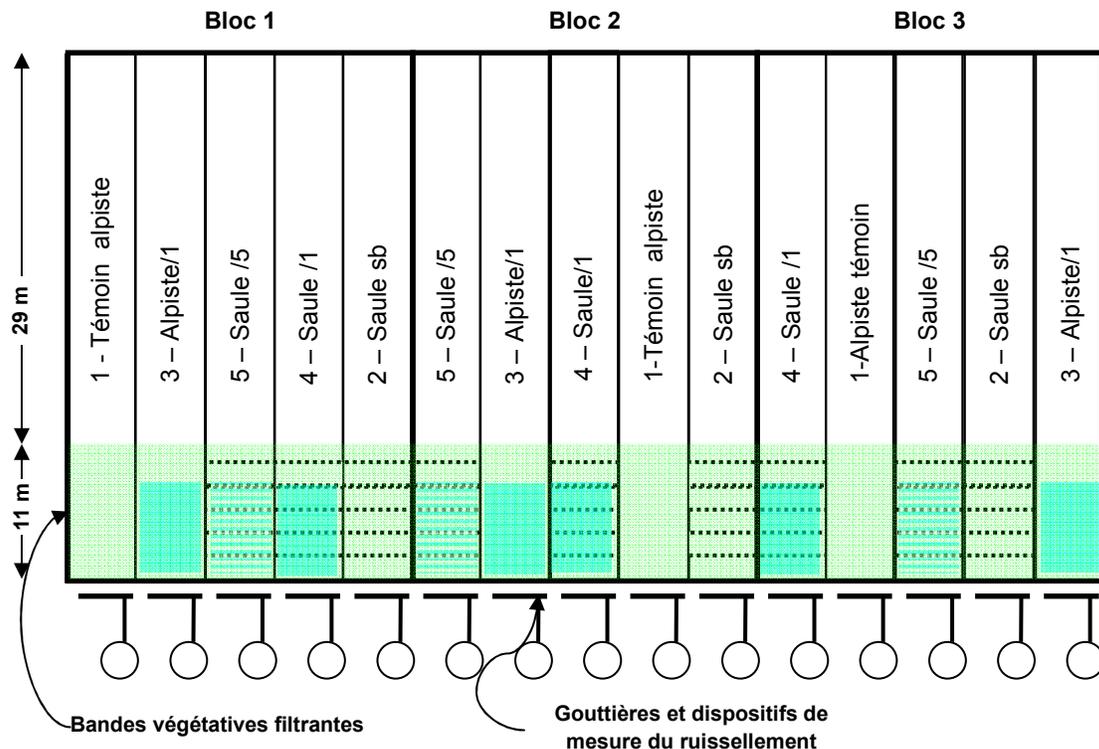


Figure 3. Plan du dispositif expérimental à Saint-Lambert-de-Lauzon.

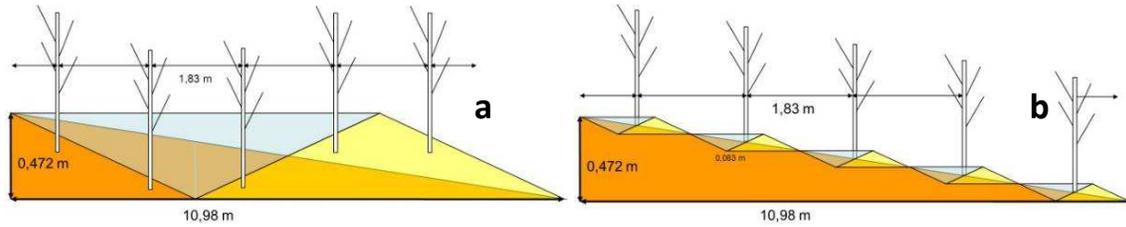


Figure 4. Aménagement d'une baissière unique pour cinq rangées de saule (Saule/1) (a) et de cinq baissières pour cinq rangées de saule (Saule/5) (b).

Avant l'aménagement des baissières et l'installation des bandes végétatives, un drain agricole installé en biais sous les parcelles a d'abord été retiré au mois de mai 2010 et le terrain a été nivelé pour fournir une pente de 4,5 % égale et uniforme entre les différentes parcelles. Pour contenir le ruissellement de surface à l'intérieur des bandes végétatives filtrantes, des tôles galvanisées ont été installées dans des tranchées creusées à 30 cm de profondeur sur 12 m de long (Figure 5a). Les deux patrons de baissières (1,83 ou 7,3 m) ont été creusés à la pelle mécanique perpendiculairement à la pente. La finition a été réalisée à la pelle et au râteau (Figure 5b).



Figure 5. Installation des tôles galvanisées pour séparer les bandes végétatives (a) et profilage de 5 baissières pour le traitement 5 (b).

Le 23 juin 2010, cinq rangées de saule (*Salix miyabeana*, Clone SX64) ont été plantées avec un espacement de 0,30 m sur le rang et de 1,83 m entre les rangs, pour une densité de plantation d'environ 18 200 plants/ha reflétant le modèle de culture intensive de saule en courte rotation promu par l'IRBV (Labrecque et Teodorescu, 2005). Du ray-grass annuel (*Lolium multiflorum*) a été semé à la volée à la main entre les rangées de saule afin de stabiliser les buttes et baissières.

À la fin de la première saison de croissance, les nouvelles pousses de saule ont été taillées à 15 cm du sol le 5 novembre 2010 pour favoriser la repousse de nouvelles tiges l'année suivante. La très grande majorité des boutures a produit des plants vigoureux qui ont survécu jusqu'à la fin de l'essai. Quelques boutures (moins de 10) ont toutefois été replantées en 2011 pour assurer des bandes végétatives uniformes. La compétition engendrée par les adventices dans les bandes de saule a été contrôlée en première année par le semis du ray-grass entre les rangées, mais des travaux de désherbage manuel ont été réalisés en 2^e année pour contrôler la compétition des adventices. En 3^e année, le saule était suffisamment bien implanté et productif pour permettre la récolte en fin de saison (Figure 6a et Figure 6c).

Dans les autres bandes végétatives, l'alpiste roseau (*Phalaris arundinacea*, cv. Marathon) a été semé à la volée à un taux de semis de 16 kg/ha et incorporé au râteau. La pression exercée par les adventices en première année semblait réduire les chances de survie et la densité de l'alpiste, malgré le taux de semis relativement élevé. À la fin de l'été 2010, des traitements d'herbicide localisés et un nouveau semis d'alpiste ont été tentés afin d'améliorer le couvert de l'alpiste. Finalement, de 2011 à 2012, l'alpiste roseau s'est suffisamment développé pour recouvrir à plus de 95 % la surface de la bande végétative et permettre deux récoltes annuelles de biomasse aérienne (Figure 6b et Figure 6d).

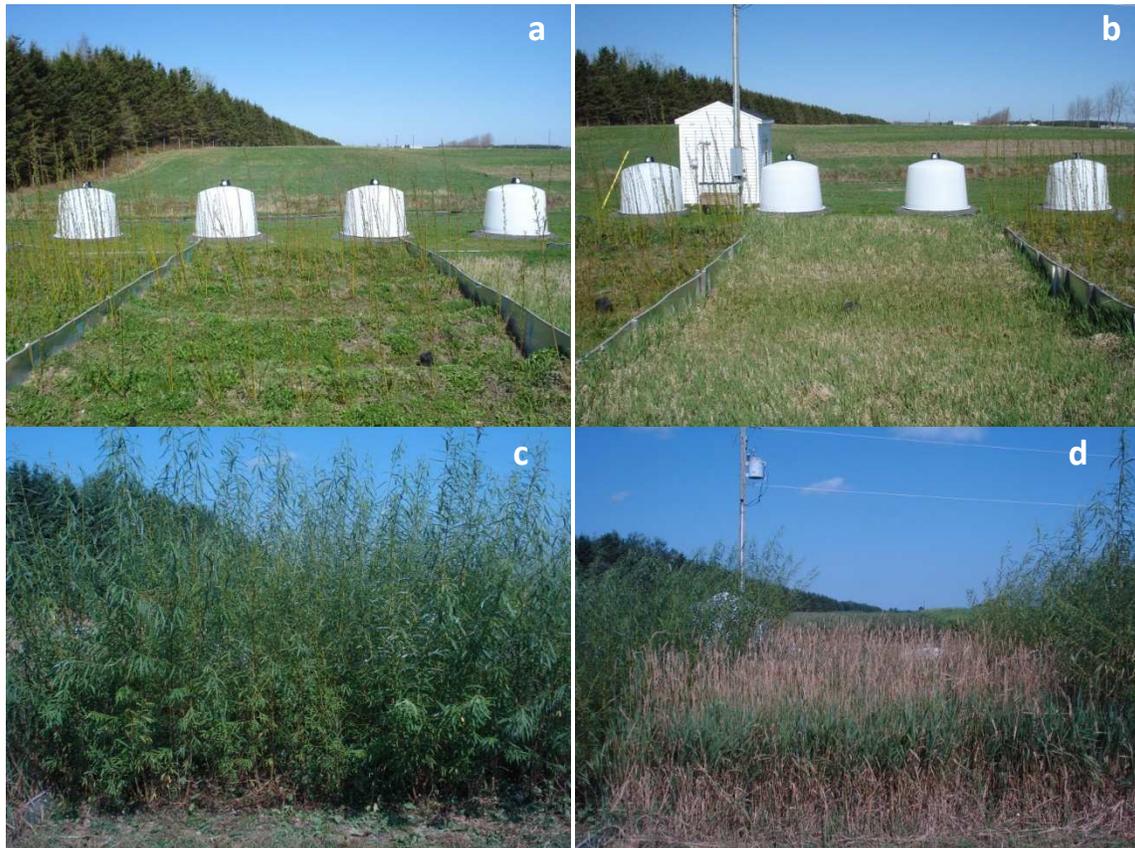


Figure 6. Implantation après deux ans du saule dans cinq baissières (a) et de l'alpiste roseau dans une baissière (b) le 7 mai 2012. État de la croissance du saule (c) et de l'alpiste (d) dans les mêmes bandes végétatives le 31 juillet 2012.

De l'orge (taux de semis de 120 kg/ha) sous-ensemencée de fléole (*Phleum pratense*) (taux de semis de 10 kg/ha) a été semée avec un semoir le 8 juillet 2010 pour implanter une prairie en amont des bandes végétatives filtrantes. Le semis a été effectué dans le sens de la pente et les parties moins accessibles entre la prairie et la bande végétative ont été semées à la volée. Une risberme a été aménagée en amont et sur les côtés de la prairie afin de limiter le ruissellement en provenance de la prairie (Figure 7a). Cette prairie a été entretenue au début du projet par des coupes successives le 9 août 2011, le 11 juin 2012 et le 27 juillet 2012. Les rendements de ces coupes ont été mesurés avec des échantillons répartis sur la surface de la prairie et la biomasse a été analysée pour estimer l'exportation des éléments fertilisants N, P et K associée à ces coupes de foin.

Durant le projet, la prairie située en amont des bandes végétatives a reçu des applications répétées et massives de lisier de porc pour simuler des charges concentrées d'effluent d'élevage à traiter (Figure 7b). Une première application avait été réalisée avant le semis de la prairie le 26 mai 2010, et suivie d'un passage de vibroculteur dans le sens de la pente pour l'incorporer. Les applications subséquentes de lisiers ont débuté le 28 juin 2011, après la première coupe de la prairie. Chaque chantier d'épandage a été suivi pour préciser les doses de lisier appliquées et relever des échantillons de lisier représentatifs afin de calculer les charges appliquées en amont des bandes végétatives filtrantes.

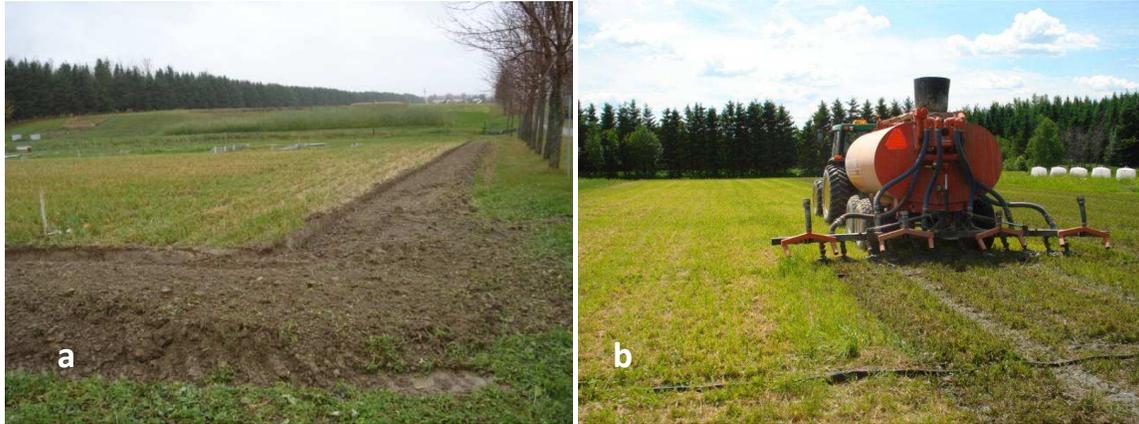


Figure 7. Risberme aménagée au pourtour de la prairie pour isoler le ruissellement (a) et épandage de lisier dans la prairie en amont des bandes végétatives filtrantes (b).

3 Dispositif de mesure des eaux de ruissellement

Une dalle installée à la sortie de chaque bande végétative filtrante a été utilisée pour canaliser l'eau ruisselée vers un dispositif pour mesurer et échantillonner les volumes d'eau ruisselés (Figure 8a). Ce dispositif était constitué de deux barils jumelés fonctionnant sur le principe des augets basculants (Figure 8b). Chaque baril est rempli et vidé à tour de rôle par le biais d'un canal pivotant et de trappes de vidange actionnés par des flottes et des contrepoids. Chaque vidange de baril représentait un volume connu d'environ 60 litres et ce système permettait d'enregistrer avec précision des débits atteignant jusqu'à 120 litres à la minute (Gasser et al., 2001; Vallières, 2005). Chaque bascule est enregistrée et compilée aux 10 minutes et aux 24 heures dans un enregistreur de données automatisé (21X de Campbell Scientific).



Figure 8. Dalles installées à la sortie des bandes végétatives filtrantes (a) pour canaliser l'eau vers les dispositifs de mesure et d'échantillonnage des volumes d'eau ruisselés (b).

En 2011, les regards dans lesquels sont installés les dispositifs de mesure et d'échantillonnage des volumes d'eau ruisselées ont été isolés et électrifiés afin d'assurer un suivi de la qualité de l'eau durant l'hiver lors de redoux hivernaux et à la fonte des neiges. Des abris isolés ont aussi été installés sur ces regards pour faciliter leur accès durant l'hiver.

4 Lysimètres à succion

Étant donné le sol relativement plus imperméable en profondeur, une partie de l'eau pouvait s'écouler en aval des bandes végétatives sous la surface du sol par écoulement hypodermique horizontal. Cette eau a été échantillonnée dans le sol avec des lysimètres à succion installés à la sortie de la bande végétative à 20 cm et 40 cm de profondeur dans le sol. Vu la présence ou non de risbermes de différentes hauteurs, les profondeurs d'installation des lysimètres ont été ajustées par rapport à la référence des bandes végétatives sans baissières.

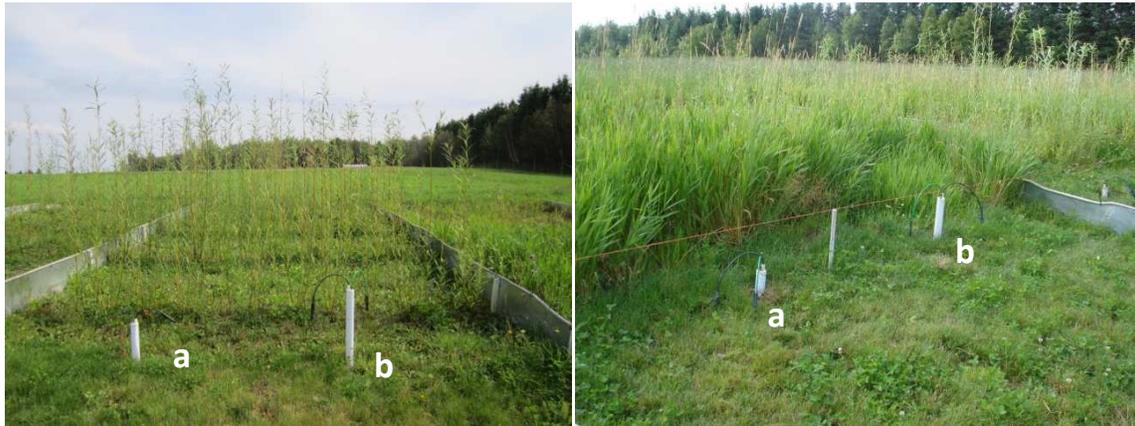


Figure 9. Lysimètres installés à la sortie de la bande végétative de chaque parcelle à 40 cm (a) et 20 cm (b) de profondeur dans le sol.

5 Les paramètres mesurés

Pour simuler des charges importantes de nutriments en amont des bandes végétatives comparables à celles produites dans les enclos d'hivernage, du lisier de porc a été épandu à doses massives et à répétition dès la fin de l'installation des baissières et des bandes végétatives, soit à partir de juin 2011 jusqu'à l'été 2013. De deux à trois échantillons de lisier ont été prélevés à chaque épandage pour fins d'analyse. Au laboratoire, les échantillons ont été homogénéisés au Polytron (Model PT 3100, Kinematica AG, Littau-Lucerne, Switzerland) avant leur analyse par des méthodes standards reconnues (Agdex 533, 1988; Peters et al., 2003). La teneur en azote ammoniacale a été déterminée sur un extrait de 5 g de lisier brassé dans 50 ml d'une solution de KCl 2M (ratio 1 :10) et filtré. Les teneurs en matières sèches et en cendres ont été déterminées respectivement à l'étuve à 105 °C et après incinération à 350 °C. La teneur en azote total a été dosée avec une méthode Kjeldahl modifiée et les teneurs en éléments totaux P, K, Ca, Mg Na, B, Al Cu, Fe, Mn ont été dosées par spectrophotométrie dans le plasma (ICP), après digestion de l'échantillon par voie humide à l'acide sulfurique et sélénieux (Isaac et Johnson, 1976).

Les biomasses produites dans les bandes végétatives ont été récoltées annuellement à l'automne à partir de la deuxième année d'implantation (2011 et 2012) dans le cas de l'alpiste roseau et après trois ans (2012) dans le cas du saule. Les rendements en biomasse sèche ainsi

que les concentrations et les exportations en N_{total} , P, K, Ca, Mg, Na, B, Al, Cu, Fe, Mn des biomasses récoltées ont été déterminés à partir d'échantillons prélevés sur les cinq rangées de saule (cinq par bande végétative) et sur deux sections en amont et en aval des bandes végétatives d'alpistes roseau. Les biomasses ont été séchées à l'étuve à 60 °C, jusqu'à l'obtention d'un poids constant, broyées et tamisées à 0,5 mm. La teneur en azote total a été dosée avec une méthode Kjeldahl modifiée et les teneurs en éléments totaux P, K, Ca, Mg, Na, B, Al, Cu, Fe, Mn ont été dosées par spectrophotométrie dans le plasma (ICP), après digestion de l'échantillon par voie humide à l'acide sulfurique et sélénieux (Isaac et Johnson, 1976).

L'évolution des concentrations de nutriments dans le sol sous les bandes végétatives a été suivie par un échantillonnage de sol à 0 - 20 cm de profondeur en amont (0 - 4 m) et en aval (4 - 10 m) de chaque bande végétative. Les sols ont été analysés au laboratoire de l'IRDA selon des méthodes standards reconnues (Carter et Gregorich, 2006; Agdex 533, 1988). Le pH eau et le pH tampon SMP ont été déterminés dans une solution 1:1. La teneur en C organique a été déterminée par la méthode Walkley-Black, la teneur en N total par la méthode Kjeldahl modifiée. Les teneurs en éléments P, K, Ca, Mg, Na, B, Al, Cu et Mn extraits à la solution Mehlich 3 ont été dosées par spectrophotométrie dans le plasma (ICP).

Les mesures de ruissellement et l'échantillonnage des eaux ruisselées ont débuté au printemps 2011 à la fonte des neiges et se sont poursuivies jusqu'à la fin du projet en juillet 2013. Après chaque événement conduisant à un ruissellement moyen supérieur à au moins 15 mm de hauteur d'eau, correspondant à une parcelle de 40 m de long (11,5 m de bande végétative + 28,5 m de prairie), l'eau était échantillonnée et le ruissellement totalisé. Les paramètres analysés dans les eaux ruisselées étaient les concentrations en sédiments, ou matière en suspension (MES), N total dissous, N minéral ($N-NH_4$, $N-NO_3$), P total, P total dissous, P ortho dissous, K, Ca, Mg, Na, B, Al, Cu, Fe, Mn. Les concentrations d'éléments suivies dans l'eau du sol avec les lysimètres à succion étaient N total dissous, N minéral ($N-NH_4$, $N-NO_3$), P total dissous, P ortho dissous, K, Ca, Mg, Na, B, Al, Cu, Fe, Mn. Les eaux ont été analysées au laboratoire de l'IRDA avec des méthodes standards reconnues (EPA, Agdex 533, 1988). La matière en suspension (MES) est déterminée par masse suite à une filtration de l'eau brute sur un papier millipore de 0,45 μm . Le P total est dosé en colorimétrie automatisée après digestion acide de l'eau brute au persulfate (K_2SO_4) acide. Tous les autres éléments dissous ont été déterminés dans l'eau filtrée à 0,45 μm . Le N total dissous a été dosé en colorimétrie automatisée suite à une digestion aux UV, tandis que $N-NH_4$, $N-NO_3$ et P ortho ont été dosés directement en colorimétrie automatisée. Les autres éléments : P total dissous, K, Ca, Mg, Na, B, Al, Cu, Fe, Mn ont été dosés par spectrophotométrie dans le plasma (ICP).

6 Traitements statistiques

Les analyses de variance pour comparer les traitements ont été réalisées avec la procédure Proc Mixed dans le logiciel SAS (SAS Institute, 2003). Des modèles linéaires mixtes normaux ont été utilisés. Les termes d'erreur aléatoire ou fixe ont été précisés selon les sources de variation et la structure de covariance basée sur des critères calculés avec SAS.

Résultats

Les résultats sont présentés d'abord pour chaque poste du bilan, soit les charges appliquées en amont avec l'épandage des lisiers, les prélèvements réalisés par la bande végétative filtrante et les charges retrouvées dans l'eau de ruissellement à la sortie de la bande végétative. Les concentrations d'éléments mesurées dans le sol en amont et aval dans la bande végétative et dans l'eau du sol à la sortie de la bande sont également présentées pour qualifier l'évolution de la bande au cours de l'essai, en termes d'accumulations ou de pertes en éléments fertilisants.

1 Charges fertilisantes appliquées

Les prairies en amont des bandes végétatives filtrantes ont reçu des doses répétées et massives de lisier de porc pour simuler des charges concentrées d'effluents d'élevage. Le lisier provenait d'une préfosse située à l'intérieur d'un bâtiment d'élevage de porc à l'engraissement. Les concentrations en éléments fertilisants étaient plus élevées que les concentrations normales pour ce type de lisier. Voir l'Annexe 1 et les valeurs de référence publiées dans CRAAQ (2007). Au total, les parcelles ont reçu du 22 juin 2011 au 15 juin 2013, 4230 kg N/ha et 846 kg P/ha, soit 48,2 kg de N et 9,6 kg de P par parcelle de 114 m² (4 m x 29,5 m) (Tableau 3). Ces quantités sont quelque peu plus élevées, mais comparables à des charges typiques provenant d'un élevage de vache-veau en enclos d'hivernage de faible densité, selon les valeurs références publiées par le CRAAQ (2003). L'Annexe 2 présente le calcul des charges typiques produites dans un enclos d'hivernage de vache-veau de faible densité sur une aire équivalente à la parcelle de 114 m². Ainsi, un enclos d'hivernage à faible densité aurait produit sur deux ans des charges de 27,4 kg N/parcelle et 6 kg P/parcelle.

Tableau 3. Charges totales moyennes d'azote et de phosphore appliquées par parcelle.

Date épandage	Dose	N Total	P	N Total	P
	tm/ha	kg/ha		kg/parcelle	
22-juin-2011	50	375	89	4,3	1,0
17-août-2011	50	243	31	2,8	0,3
20-sept-2011	50	208	37	2,4	0,4
14-mai-2012	50	424	91	4,8	1,0
14-juin-2012	50	325	64	3,7	0,7
02-août-2012	50	213	23	2,4	0,3
09-août-2012	50	205	18	2,3	0,2
07-sept-2012	100	436	77	5,0	0,9
27-sept-2012	100	585	113	6,7	1,3
24-oct-2012	100	754	225	8,6	2,6
15-juin-2013	50	462	78	5,3	0,9
Total 2011	150	826	157	9,4	1,8
Total 2012	500	2942	612	33,5	7,0
Total 2013	50	462	78	5,3	0,9
Total	700	4230	846	48,2	9,6

2 Rendements en biomasse et prélèvements

Le bilan de production de biomasse dans les bandes végétatives a été évalué à l'automne 2012. L'alpiste a été récolté annuellement en 2011 et 2012, tandis que le saule a été récolté après un premier cycle de production de 2 ans en 2012.

2.1 Rendements en biomasse

L'analyse de variance ne révèle pas d'effet significatif important du type de culture ou de l'effet des baissières sur la productivité du saule et de l'alpiste roseau, mais en revanche elle présente quelques différences au niveau des exportations en éléments en raison des concentrations en éléments différentes entre les deux plantes (Tableau 4 et Tableau 5).

Cependant la courte période de temps entre l'installation de ces plantes pérennes en juin 2010 et le bilan de la production en automne 2012, n'aura pas permis à ces cultures d'exprimer leur plein potentiel de production. Certaines tendances sont tout de même présentées même si elles ne sont pas significatives. La Figure 10 présente les rendements totaux des parcelles d'alpiste roseau sur deux ans (2011 et 2012) et ceux du saule en 2012 en fin de rotation après sa 3^e année d'implantation.

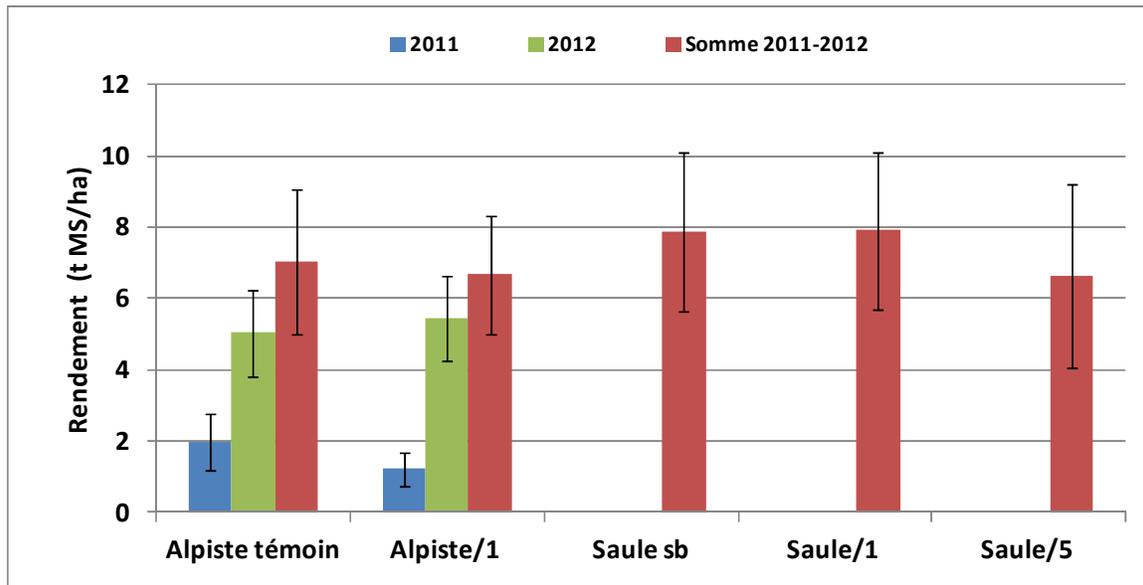


Figure 10. Rendement de l'alpiste roseau en 2011 et 2012 et somme des rendements d'alpiste et de Saule pour 2011 et 2012. Les barres d'erreur illustrent les écarts types.

Après deux ans de production, les deux cultures ont produit en moyenne des rendements en matière sèche (MS) de l'ordre de 7,2 t MS/ha, ce qui se traduit par un rendement annuel de 3,6 t MS/ha/an pour fins de comparaison avec d'autres études. Les bandes végétatives de saule sans baissière et dans une seule baissière semblent avoir produit des rendements quelque peu plus élevés (3,9 t MS/ha/an), mais ces différences sont non significatives tel que mentionné précédemment. Les rendements de saule étaient toutefois inférieurs à ceux rapportés dans la littérature pour le Québec, car en conditions de production idéales, les rendements annuels pourraient atteindre 7 à 16 t MS/ha/an (Labrecque et Teodorescu; 1998; Cavanagh et al., 2011).

Tableau 4. Rendement et exportations d'éléments dans les biomasses récoltées d'alpiste roseau et de saule.

	Rend MS	N	P	K	Ca	Mg	Al	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Na
Traitement	tm/ha	kg/ha											
Alpiste témoin	7,0	69,4	16,0	104,0	17,6	9,46	0,36	0,15	0,04	0,77	0,61	0,30	0,18
Alpiste/1	6,7	70,4	14,7	99,0	16,7	9,15	0,28	0,15	0,04	0,58	0,67	0,45	0,22
Saule sb	7,9	74,8	9,1	21,1	80,5	5,91	0,24	0,26	0,04	0,25	0,55	1,43	0,25
Saule/1	7,9	73,5	8,8	21,4	76,5	5,61	0,23	0,24	0,04	0,27	0,54	1,37	0,24
Saule/5	6,6	60,3	6,9	17,5	65,1	4,64	0,20	0,19	0,03	0,24	0,43	1,13	0,20
Valeur de F	0,65	0,37	8,13	16,15	31,75	6,34	1,830	4,390	0,420	35,440	0,920	14,010	0,730
Prob. de F	0,64	0,82	0,006	0,012	<0,0001	0,03	0,281	0,06	0,791	0,001	0,517	0,002	0,6067
Contrastes (Prob. de t)													
Alpiste vs Saule	0,41	0,96	0,001	0,001	<0,0001	0,01	0,09	0,01	0,96	<0,0001	0,23	<0,0001	0,49
Alpiste témoin vs Alpiste/1	0,77	0,94	0,54	0,82	0,56	0,85	0,41	0,89	0,84	0,06	0,76	0,30	0,57
Saule sb vs Saule/1 et 5	0,54	0,51	0,48	0,58	0,40	0,24	0,34	0,19	0,47	0,94	0,49	0,47	0,44
Saule/1 vs Saule/5	0,28	0,34	0,38	0,31	0,39	0,21	0,43	0,18	0,36	0,41	0,31	0,42	0,30

Tableau 5. Concentrations en éléments totaux dans les biomasses récoltées d'alpiste roseau et de saule.

	Matière sèche	N	P	K	Ca	Mg	Al	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Na
Traitement	g/g MH	mg/kg MS											
Alpiste témoin	0,404	9938	2358	14467	2907	1444	64	20,3	6,0	141	95	46	30
Alpiste/1	0,388	10779	2391	14772	3306	1521	57	19,7	6,9	109	107	98	42
Saule sb	0,481	9460	1160	2683	10244	756	31	33,8	5,4	32	71	181	32
Saule/1	0,478	9273	1106	2694	9693	709	29	30,9	5,2	34	68	173	31
Saule/5	0,476	9130	1060	2638	9914	716	32	29,6	5,0	36	64	168	30
Valeur de F	33,0	0,96	30,82	76,62	118,51	66,33	5,21	29,35	11,27	7,82	8,81	78,86	0,56
Prob. de F	<0,0001	0,47	0,007	0,001	<0,0001	<0,0001	0,05	<0,0001	0,002	0,03	0,005	0,0009	0,7157
Contrastes (Prob. de t)													
Alpiste vs Saule	<0,0001	0,12	0,0004	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,01	<0,0001	0,0003	0,01	0,0004	0,003	0,39
Alpiste témoin vs Alpiste/1	0,27	0,40	0,89	0,83	0,13	0,32	0,60	0,73	0,03	0,39	0,21	0,11	0,31
Saule sb vs Saule/1 et 5	0,87	0,77	0,18	0,90	0,51	0,51	0,81	0,04	0,28	0,41	0,55	0,06	0,61
Saule/1 vs Saule/5	0,77	0,86	0,43	0,73	0,77	0,93	0,52	0,47	0,59	0,63	0,67	0,60	0,92

Par ailleurs, sur une parcelle située à moins de 500 m de l'essai, des rendements moyens de 7,5 t MS/ha/an ont été mesurés en 2011 après deux ans de croissance du même clone SX64 de *Salix miyabeana*. Le potentiel de rendement de ce clone de saule est donc plus élevé que ce que nous avons mesuré dans les bandes végétatives lors de ce premier cycle de production.

Le potentiel de rendement de l'alpiste roseau serait aussi plus élevé que ce nous avons mesuré. Selon Bagg (2003), l'alpiste roseau (cv. Palathon) pourrait atteindre des rendements de l'ordre de 9,5 t MS/ha dans le sud de l'Ontario et de 8,0 dans le nord. Kukk et al. (2011) rapportent toutefois un potentiel de rendement de l'ordre de 6 à 7 t MS/ha dans des conditions de fertilité du sol plus limitantes en Europe. Les plus faibles rendements mesurés dans nos essais s'expliqueraient en partie par le faible niveau de fertilité initial du sol. Les plus faibles rendements de saule dans les cinq baissières (Saule/5) seraient entre autres liés aux conditions de fertilité du sol réduites par la création des baissières et du remaniement du sous-sol à la surface. Il s'agissait aussi de la première récolte de saule, sur un potentiel d'environ sept récoltes (durée de vie de 20 à 25 ans) et la deuxième pour l'alpiste pour une durée de vie d'environ 10 ans. On pourrait alors s'attendre à de meilleurs rendements lors des prochaines récoltes à mesure que les charges ruisselées de l'amont fertilisent la bande végétative et que le saule et l'alpiste s'établissent à leur plein potentiel.

Par ailleurs, des différences de rendement ont été observées au sein même des parcelles entre les différentes rangées de saules et entre l'amont et l'aval de la bande enherbée d'alpiste roseau (Tableau 6). Ces différences ont été documentées en 2012 seulement. L'effet seul de la position n'est pas significatif, mais l'interaction significative (Prob. F < 0,02) de la position avec les traitements indique que dans certains traitements, les rendements sont affectés par leur position amont-aval dans la bande végétative. Pour les traitements sans baissière de saule et d'alpiste, on remarque une diminution de rendement de l'amont vers l'aval (dans le sens de l'écoulement des eaux chargées) (Figure 11). Pour le traitement à cinq baissières de saule (Saule/5), les rendements sont plutôt constants de l'amont vers l'aval. À l'inverse, les traitements à une seule baissière de saule (Saule/1) ou d'alpiste (Alpiste/1) présentent des rendements supérieurs en aval de la bande végétative par rapport à l'amont. La configuration de la baissière pourrait expliquer ces résultats. L'eau ruisselée favorise une accumulation d'eau et d'éléments nutritifs dans le fond de la baissière qui alimente la risberme sur laquelle sont installées les rangées 3-4-5 de saule et l'alpiste en partie aval de la bande végétative (Figure 4a). Par ailleurs, la risberme constitue un sol plus profond et plus fertile pour l'établissement des plantes, dans laquelle l'eau chargée en éléments fertilisants s'est infiltrée.

Tableau 6. Analyse de variance sur les rendements d'alpiste roseau et de saule et effet de la position amont-aval dans la bande végétative en 2012.

Effet	Valeur de F	Pr > F
Traitement (plantes - baissières)	3,43	0,06
Position (amont-aval)	0,00	0,95
Traitement x position	4,79	0,02

La même tendance est remarquée dans les parcelles d'alpiste roseau (Figure 11). Effectivement, dans le traitement sans baissière (Alpiste témoin), la partie amont de la bande végétative profite en premier lieu du ruissellement et des apports en éléments fertilisants, et démontre des rendements supérieurs à la partie aval. À l'inverse, dans le traitement avec une baissière (Alpiste/1), c'est la partie aval de la bande végétative qui démontre une meilleure productivité en raison de la risberme qui est alimentée par les eaux chargées du ruissellement.

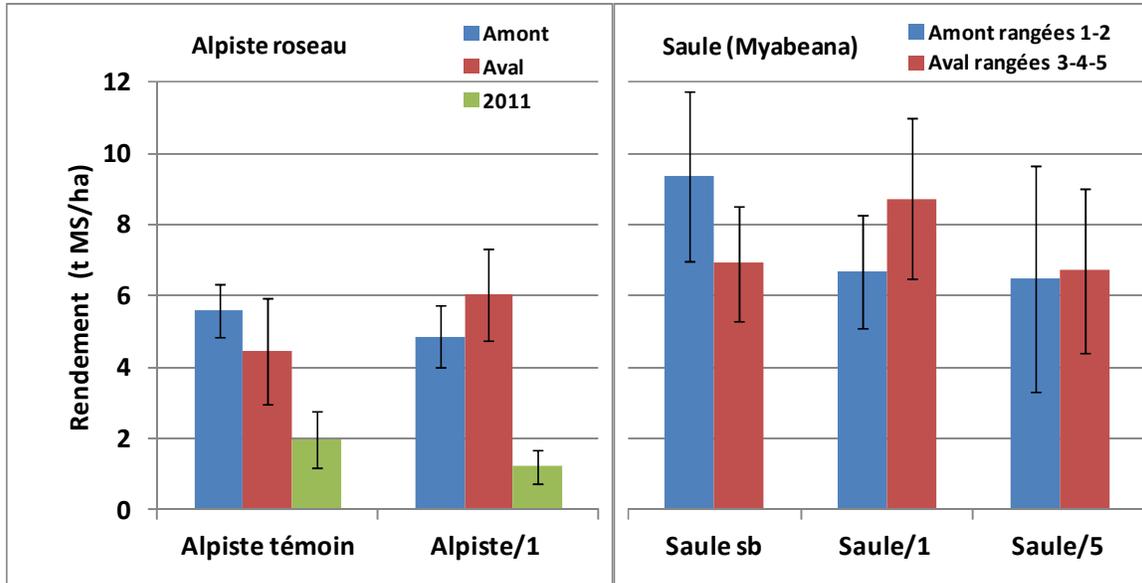


Figure 11. Rendement de l'alpiste roseau (2011 et 2012) et de saule (2012) selon sa position amont-aval dans la bande végétative filtrante. Les barres d'erreur illustrent les écarts types.

2.2 Concentrations en éléments dans la biomasse récoltée

Les concentrations en éléments dans les biomasses récoltées sont présentées au Tableau 5. Tous les éléments (P, K, Ca, Mg, Al, B, Cu, Fe, Mn, Zn, Na) sauf l'azote (N) semblent démontrer des concentrations différentes entre les parties récoltées de saule et d'alpiste. Les concentrations en N dans le saule étaient toutefois relativement élevées (>9 g N/kg) par rapport aux concentrations rapportées dans d'autres études québécoises : Labrecque et Teodorescu (2003) rapportent des concentrations de 5,3 à 7,3 g N/kg. Cavanagh et al. (2010) rapportent des concentrations de 3,7 à 5,0 g N/kg, tandis qu'une parcelle située à moins de 500 m de l'essai présent a produit des concentrations de 5,7 g N/kg avec le même clone. Cependant, les concentrations en N relativement plus élevées dans le matériel de notre essai révèlent un matériel plus jeune et moins ligneux en lien avec les plus faibles rendements mesurés dans les premières années de production.

En moyenne, les concentrations en K, Fe, P, Mg et Al étaient plus de deux fois plus élevées dans les tiges récoltées d'alpiste par rapport au saule, tandis que les concentrations en Zn et Ca étaient deux à trois fois plus élevées dans le saule par rapport à l'alpiste. Ces concentrations ont eu une incidence sur les prélèvements et les exportations en éléments associées à ces deux plantes, tel que présenté plus bas.

2.3 Prélèvements et exportations en éléments dans la biomasse récoltée

Les prélèvements et exportations en éléments dans les biomasses récoltées sont présentés au Tableau 4. Des exportations d'environ 70 kg N/ha sur deux ans ont été réalisées avec la récolte des deux cultures dédiées, soit des exportations relativement modestes par rapport à ce qui est rapporté dans la littérature pour des cultures similaires. Pour le saule par exemple, Labrecque et Teodorescu (2003) rapportent un prélèvement potentiel de 150 kg N/ha/an pour une production de *Salix viminalis* en sol argileux.

La Figure 12 résume les principales différences observées entre les exportations de nutriments reliées aux cultures de saule et d’alpiste roseau après la troisième année d’implantation. L’alpiste roseau a exporté par ordre d’importance plus de K, de P et de Mg que le saule, tandis que le saule a exporté plus de Ca et de Zn que l’alpiste.

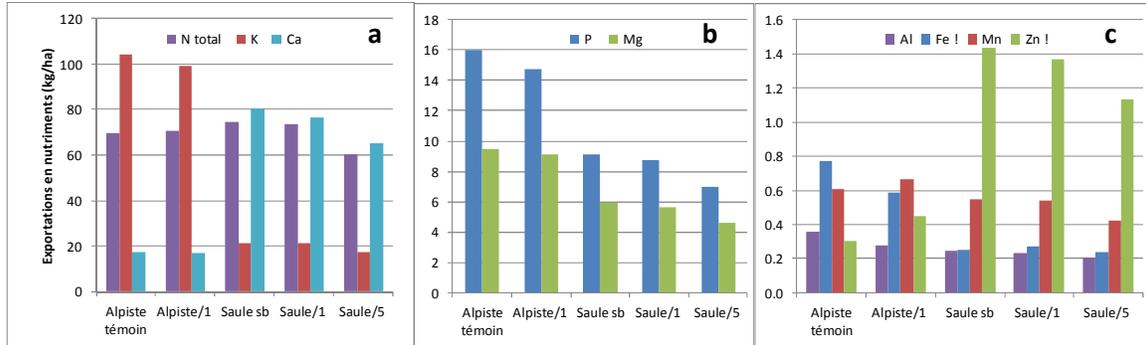


Figure 12. Exportations en nutriments dans la biomasse récoltée de l’alpiste roseau en 2011 et 2012 et du saule en 2012.

Ainsi, l’alpiste roseau a exporté en moyenne cinq fois plus de K (102 kg/ha) par rapport au saule (20 kg/ha), deux fois plus de P (15,4 vs 8,3 kg P/ha) et près de deux fois plus de Mg (9,3 vs 5,4 kg Mg/ha). Le saule en revanche a exporté près de quatre fois plus de Ca que l’alpiste en moyenne (74 vs 17 kg Ca/ha) et trois fois plus de Zn (1,3 vs 0,4 kg Zn/ha).

3 Évolution de l'analyse de sol dans les bandes végétatives

Les sols ont été échantillonnés à l'amont et à l'aval des bandes végétatives le 11 août 2011 et le 19 novembre 2012. En plus de l'effet des traitements (culture/baissière), les effets de la position amont-aval et de l'année ont été inclus dans l'analyse de variance (Tableau 7). L'effet de l'année est le principal effet observé, suivi de son interaction avec la position amont-aval dans la bande végétative. L'effet de l'année s'est traduit par une augmentation importante de la plupart des teneurs en éléments dans le sol, liés entre autres aux apports massifs de lisier et d'éléments fertilisants en amont des bandes végétatives. Les valeurs moyennes des analyses de sol sont présentées par année, par position et par traitement à l'Annexe 3. Par ordre croissant en importance, les teneurs en Fe, K, P, Zn et Na extraits à la solution Mehlich-3 (M3) et en azote minéral (N-NO₃ et N-NH₄) ont augmenté de plus de 60 % jusqu'à 150 % au cours du temps. Les teneurs en C organique et en N total ont aussi augmenté de 4 et 15 % respectivement, soulignant l'effet de la remise en état du sol suite à la création des baissières et à l'installation des bandes végétatives. À l'inverse, le pH à l'eau du sol s'est abaissé de 5 %. Plusieurs propriétés présentent toutefois une interaction importante entre l'année d'échantillonnage et la position dans la bande dont les teneurs en C org., N total, N-NO₃, P-M3, K-M3 et Na-M3. Toutefois, cette interaction est différente selon les propriétés. La Figure 13a révèle une augmentation importante en deuxième année des teneurs en N minéral (N-NO₃, N-NH₄) et Na-M3 dans la bande végétative en amont par rapport à l'année précédente, une indication d'un mouvement d'ions solubles seulement dans la partie amont. Les Figure 13b et Figure 13c révèlent une augmentation des teneurs en C org., N total, P-M3, et K-M3 en deuxième année et plus particulièrement des teneurs inférieures en première année dans la partie aval des bandes végétatives. Un abaissement rapide des teneurs en C org. et en éléments fertilisants comme le P-M3 résulte probablement de la création des baissières et de l'appauvrissement du sol dans le bas (aval) de certaines bandes végétatives. Les teneurs plus élevées en N-NO₃, N-NH₄ et Na-M3 en amont en deuxième année reflètent l'effet des apports répétés de lisier en amont qui s'infiltrent dans la bande végétative en amont. Par contre, l'augmentation rapide en deuxième année des teneurs en N total, P-M3, et K-M3 dans l'ensemble de la bande végétative soulève tout de même quelques interrogations quant à l'efficacité de ces bandes végétatives à retenir les éléments fertilisants.

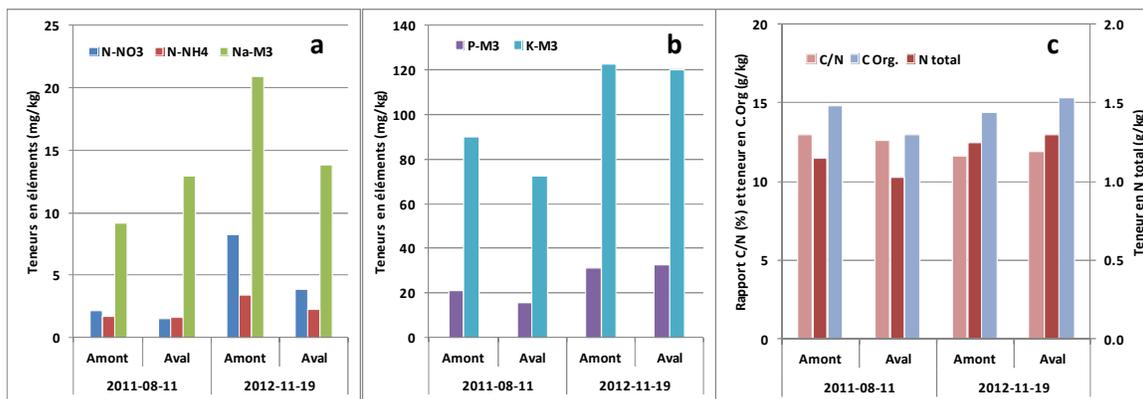


Figure 13. Augmentation dans le temps des teneurs en éléments disponibles dans le sol en fonction de la position amont-aval dans la bande végétative.

Tableau 7. Analyse de variance sur les propriétés du sol.

	pH	C/N	C org.	N total	N-NH ₄	N-NO ₃	P	K	Ca	Mg	Na	Cu	Zn	Fe	Al	Mn	P/Al
	eau				Extrait KCl 2M			Extrait Mehlich-3									
Effets	Valeur de F																
Traitement	1,16	2,1	2,85	3,2	0,18	1,99	0,4	2,18	1,51	1,68	3,28	0,25	1,48	0,27	2,68	4	1,13
Position	3,38	1,98	1,42	3,52	4,65	22,6	0,77	4,72	0,08	0,22	7,81	0,02	0,8	0,27	0,16	1,81	0,96
Traitement*Position	0,61	1,84	1,32	0,78	0,81	1,55	1,37	2,6	0,7	0,39	1,05	0,74	1,27	0,35	0,11	0,21	1,1
Année	133,2	12,07	12,07	92,01	15,64	59,85	69,44	94,36	14,8	1,2	109,4	20,66	11,17	108,8	3,07	8,03	86,37
Traitement*année	2,52	1,36	1,36	1,98	0,34	3,35	1,67	3,89	0,4	1,1	7,08	0,42	3,7	0,53	0,53	0,04	2,31
Position*année	4,97	25,63	25,63	18,27	3,46	11,71	4,91	3,32	0,02	8,19	80,69	13,14	0	0,68	2,06	5,11	3,97
Traitement*Position*année	1,86	2,24	2,24	4,2	0,77	1,67	3,11	6,74	1,07	2,02	8,03	2,85	1,88	0,63	0,95	1,34	3,06
Effets	Prob. de F																
Traitement	0,36	0,17	0,05	0,08	0,95	0,17	0,81	0,16	0,24	0,20	0,07	0,91	0,25	0,89	0,07	0,02	0,37
Position	0,08	0,19	0,25	0,07	0,04	0,0001	0,39	0,06	0,78	0,65	0,01	0,88	0,38	0,61	0,70	0,19	0,34
Traitement*Position	0,66	0,20	0,30	0,54	0,54	0,21	0,28	0,10	0,60	0,81	0,40	0,57	0,32	0,84	0,98	0,93	0,39
Année	<0,0001	0,002	0,002	<0,0001	0,0008	<0,0001	<0,0001	<0,0001	0,001	0,29	<0,0001	0,0002	0,003	<0,0001	0,09	0,01	<0,0001
Traitement*année	0,07	0,28	0,28	0,12	0,85	0,02	0,20	0,02	0,81	0,38	0,0004	0,79	0,02	0,71	0,71	1,00	0,09
Position*année	0,04	<0,0001	<0,0001	0,0002	0,08	0,002	0,04	0,08	0,89	0,01	<0,0001	0,00	0,95	0,42	0,17	0,04	0,06
Traitement*Position*année	0,16	0,10	0,10	0,01	0,56	0,18	0,04	0,001	0,40	0,13	0,0002	0,05	0,15	0,65	0,45	0,29	0,04
Contrastes	Prob. de t																
Alpiste vs Saule	0,44	0,41	0,32	0,06	0,99	0,02	0,34	0,03	0,07	0,04	0,03	0,81	0,48	0,96	0,11	0,02	0,17
Alpiste témoin vs Alpiste/1	0,24	0,05	0,02	0,12	0,89	0,41	0,55	0,27	0,18	0,23	0,08	0,66	0,62	0,84	0,04	0,10	0,19
Saule sb vs Saule/1 et Saule/5	0,13	0,17	0,10	0,06	0,94	0,76	0,97	0,55	0,60	0,90	0,84	0,43	0,17	0,95	0,44	0,24	0,52
Saule/1 vs Saule/5	0,96	0,66	0,61	0,68	0,42	0,76	0,60	0,76	0,95	0,94	0,23	0,76	0,10	0,32	0,14	0,04	0,65
Alpiste témoin vs Saule sb	0,42	0,77	0,73	0,10	0,99	0,04	0,73	0,09	0,39	0,06	0,03	0,69	0,91	0,92	0,66	0,08	0,55

Même si la variance (valeur de F) associée aux effets des traitements (culture/baïssière) seuls ou en interaction avec la position ou l'année est relativement modeste par rapport aux effets de l'année ou de la position dans la bande, certains effets des cultures et des baïssières sur l'analyse de sol méritent d'être soulignés (Tableau 7).

Premièrement, l'aménagement de baïssières a eu un léger impact négatif sur les teneurs en P-M3, K-M3 et en matière organique dans le sol (C org.) en première année (2011); ces teneurs étaient plus faibles dans les bandes végétatives avec une ou cinq baïssières par rapport aux bandes d'alpiste et de saule sans baïssières (Figure 14a et Figure 14b). La teneur en N total était aussi significativement plus basse (Prob. $t = 0,02$) dans le saule en une ou cinq baïssières, par rapport à la bande de saule sans baïssières (Saule sb). Ainsi, la création de baïssières a réduit le niveau de fertilité de ces bandes la première année (Figure 14).

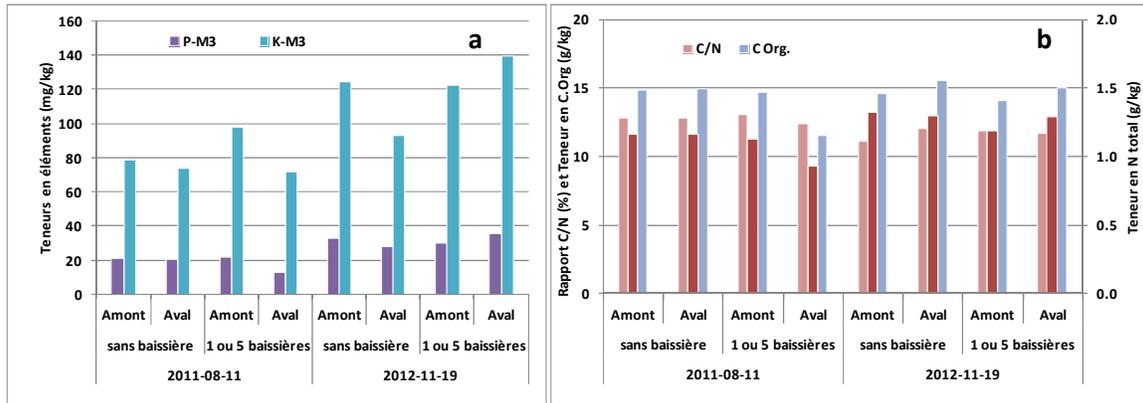


Figure 14. Variation des teneurs en éléments disponibles dans le sol en fonction de la culture.

Deuxièmement, les teneurs en N-NO₃, Na-M3, K-M3, Ca-M3, Mg-M3, Mn-M3 et N total étaient quelque peu plus élevées en moyenne, dans les parcelles de saule par rapport à l'alpiste (Figure 15a, Figure 15b et Figure 15c). L'alpiste semblerait plus efficace que le saule pour prélever l'azote et certains cations du sol.

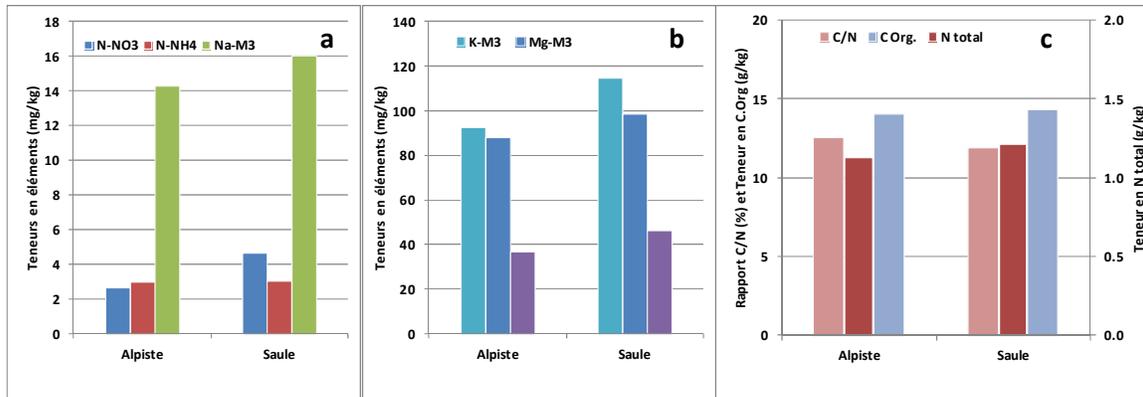


Figure 15. Variation des teneurs en éléments disponibles dans le sol en fonction de la culture.

L'apport massif d'éléments fertilisants ruisselant à l'amont des bandes végétatives a cependant enrichi plus particulièrement en deuxième année les bandes cultivées en saule à l'amont (avec ou sans baïssières), en éléments solubles et mobiles tels que N-NO₃ et Na-M3 (Figure 16a) et moins mobiles comme K-M3 et Mg-M3 (Figure 16b). D'autres éléments considérés moins mobiles comme le phosphore ne se sont pas particulièrement accumulés sous le saule ou en

amont, même si la teneur en P-M3 a augmenté quelque peu en deuxième année en amont comme en aval (Figure 16b). Toutefois, ces éléments supposés moins mobiles comme P-M3 et K-M3 se sont retrouvés à des teneurs relativement plus élevées dans le sol en aval dans les bandes végétatives de saule et d’alpiste en baissières (Figure 15a).

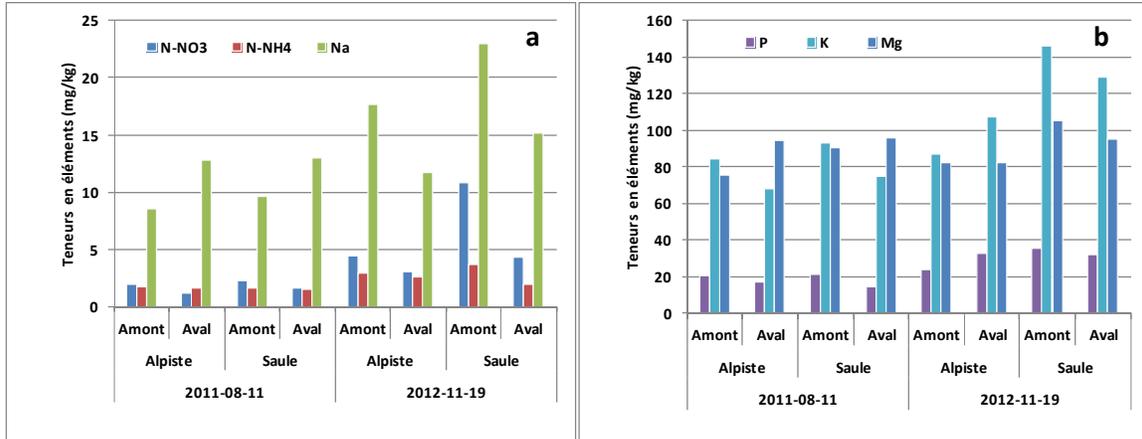


Figure 16. Évolution des teneurs en éléments disponibles dans le sol en fonction de la culture et de la position amont-aval dans la bande végétative.

En résumé, l’alpiste démontrerait ainsi une capacité plus élevée que le saule à réduire les teneurs en éléments solubles et mobiles comme N-NO₃ et Na-M3 et même en K-M3, P-M3 et Mg-M3 considérés moins mobiles. Les prélèvements et exportations plus importants de ces éléments dans la biomasse de l’alpiste par rapport au saule sont probablement responsables de ces plus faibles teneurs mesurées dans le sol.

4 Analyse de l'eau dans le sol à la sortie des bandes végétatives

Le suivi de l'eau dans le sol s'est fait à la sortie des bandes végétatives avec des lysimètres à succion installés à 20 et 40 cm de profondeur dans le sol. Ce suivi ne permet pas d'estimer les charges d'éléments drainés, mais permet d'avoir un aperçu de l'évolution des concentrations d'éléments dans l'eau du sol à la sortie des bandes végétatives. Le sol à l'essai est relativement peu perméable en profondeur. En conditions de sol saturé, l'eau s'écoule à la surface du sol et dans la couche de sol de surface par écoulement hypodermique ou de façon latérale le long de la pente. Les lysimètres installés à 20 cm de profondeur servaient à échantillonner cette eau migrant sous la surface du sol, tandis que les lysimètres installés à 40 cm de profondeur visaient à échantillonner une eau plus stagnante en profondeur. Après l'installation des lysimètres en juillet 2011, l'eau du sol a été échantillonnée les 31 août, 9 septembre et 20 octobre. En 2012, l'eau a été échantillonnée les 6 juin et 5 juillet. Aucune eau n'a été échantillonnée par la suite en 2012 en raison du manque de précipitations et d'eau dans le sol. L'analyse de variance sur les concentrations de N et de P de ces eaux est rapportée au Tableau 8. Les concentrations moyennes des autres éléments pour les cinq dates d'échantillonnage sont rapportées à l'Annexe 4.

Tableau 8. Analyse de variance sur les concentrations en N et P de l'eau du sol à la sortie des bandes végétatives.

	N total dissous	N-NH ₄	N-NO ₃	P total dissous	P ortho
Effets					
Valeur de F					
Traitement	2,8	1,3	0,4	2,8	5,8
Profondeur	0,2	8,4	0,8	5,2	9,2
Traitement x profondeur	0,9	0,6	1,1	2,1	5,7
Date	9,1	10,7	5,9	5,9	3,4
Date x traitement	0,9	0,3	1,3	0,9	1,2
Date x profondeur	1,0	4,1	4,0	2,1	2,4
Date x traitement x profondeur	0,6	0,7	0,7	0,7	1,2
Effets					
Prob. de F					
Traitement	0,10	0,32	0,79	0,06	0,02
Profondeur	0,65	0,01	0,39	0,03	0,01
Traitement x profondeur	0,52	0,66	0,39	0,12	0,02
Date	<,0001	<,0001	0,0003	0,0003	0,02
Date x traitement	0,58	0,99	0,22	0,59	0,33
Date x profondeur	0,45	0,005	0,01	0,09	0,06
Date x traitement x profondeur	0,83	0,80	0,74	0,82	0,30
Contrastes					
Prob. de t					
Alpiste vs Saule	0,05	0,10	0,96	0,03	0,003
Alpiste témoin vs Alpiste/1	0,45	0,25	0,30	0,04	0,13
Saule sb vs Saule/1 et Saule/5	0,24	0,56	0,73	0,80	0,86
Saule/1 vs Saule/5	0,99	0,69	0,53	0,50	0,79
Alpiste témoin vs Saule sb	0,45	0,25	0,30	0,04	0,13

La date d'échantillonnage est le principal effet qui a affecté la qualité de ces eaux. Toutefois, les concentrations en N et en P sous formes totales dissoutes ou minérales étaient relativement faibles par rapport aux critères retenus pour la qualité des eaux de surface ou souterraine, soit

de 30 µg/L de P total pour la protection de la vie aquatique dans les eaux de surface et de 10 mg/L de N-NO₃ pour la prévention de la contamination de l'eau et des organismes aquatiques (MDDEFP, 2013). Seule la teneur en P total dissous a atteint une valeur proche du critère de qualité de l'eau pour le P total la dernière date d'échantillonnage, le 5 juillet 2012.

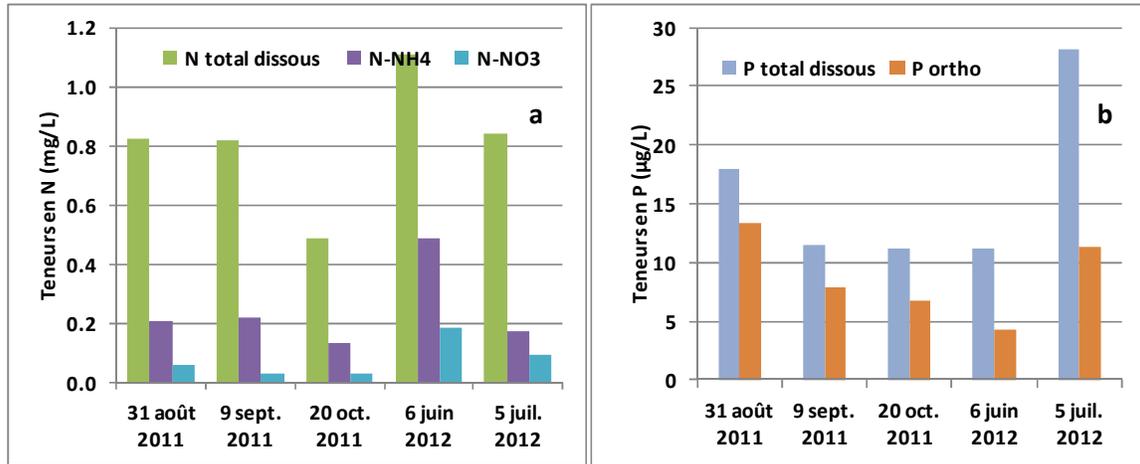


Figure 17. Évolution des différentes formes de N (a) et de P (b) dans l'eau du sol à la sortie des bandes végétatives.

L'effet profondeur seul ou en interaction avec la date d'échantillonnage est significatif pour les teneurs en P ortho, P total dissous et N-NH₄. Les teneurs en P ortho étaient plus élevées en surface dans le sol à 20 cm de profondeur par rapport à 40 cm et le 31 août 2011 et le 5 juillet 2012, tandis que les teneurs en N-NH₄ étaient plus élevées en profondeur dans le sol et plus spécifiquement le 20 octobre 2011 et le 6 juin 2012. Finalement, l'effet des cultures et des baissières (traitement) est significatif pour le N total dissous et les deux formes de P (Tableau 8). Les concentrations en N total dissous, P total dissous et P ortho sont quelque peu réduites sous l'alpiste par rapport au saule, et la concentration en P total dissous est plus particulièrement réduite sous l'alpiste cultivé dans une baissière (Figure 18).

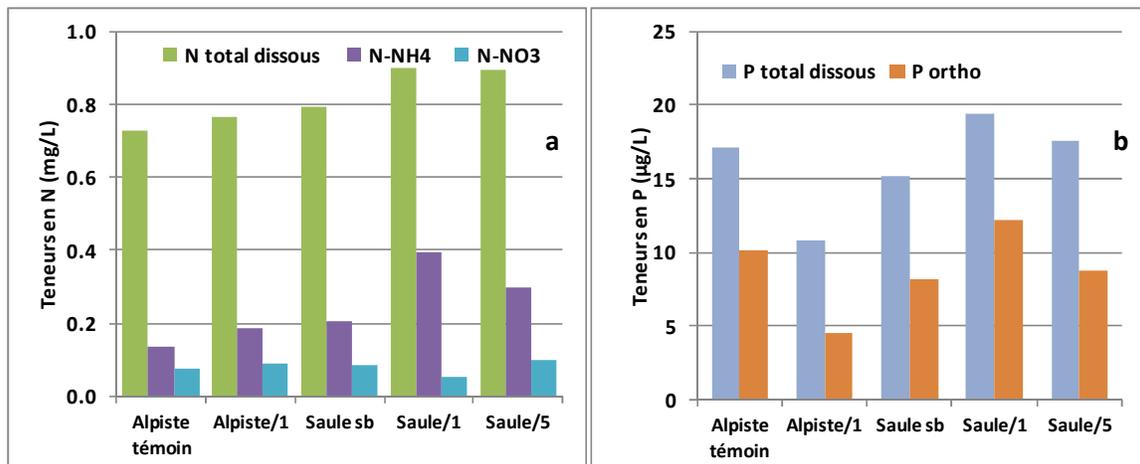


Figure 18. Effets des cultures d'alpiste et de saule en baissières ou non sur les concentrations en N (a) et P (b) dans l'eau du sol à la sortie des bandes végétatives.

5 Qualité de l'eau ruisselée à la sortie des bandes végétatives

L'eau de ruissellement captée à la sortie des bandes végétatives a été échantillonnée à 28 reprises du 19 août 2011 au 3 juillet 2013 (Annexe 5). La qualité de cette eau a évolué en fonction des charges d'effluents apportées en amont des bandes végétatives. Afin de faciliter l'analyse et l'interprétation des résultats, l'échantillonnage de la qualité de l'eau a été divisé et rapporté sur trois périodes annuelles, soit juste après le début des épandages de la fin de l'été 2011 au printemps 2012, du printemps 2012 au printemps 2013, et du printemps 2013 à juillet 2013 (Tableau 12 à l'Annexe 5). Pour chacune de ces périodes, les charges liées aux différents éléments analysés ont été calculées en termes de masses par parcelle (l'unité expérimentale) en effectuant la somme des produits des volumes d'eau ruisselée sur la parcelle par les concentrations mesurées à chaque date :

$$M_E = \sum_{d=1}^n V_d \times [E]_d \quad (\text{Éq. 1})$$

où M_E est la charge ruisselée par parcelle d'un élément E , V_n est le volume ruisselé par parcelle à une date d et $[E]$ est la concentration de l'élément E mesurée dans l'eau.

La concentration moyenne pondérée a ensuite été calculée pour chaque période en divisant la charge en éléments ruisselés par parcelle M_E par le volume total de la période :

$$[E]_p = M_E / V_t \quad (\text{Éq. 2})$$

où $[E]_p$ est la concentration moyenne pondérée d'un élément E , M_E est la charge ruisselée par parcelle d'un élément E et V_t est le volume total ruisselé par parcelle durant la période.

Les analyses de variance (ANOVA) ont été réalisées sur les volumes d'eau ruisselés, ainsi que sur les charges et les concentrations d'éléments par parcelle ($n = 15$), par période d'échantillonnage et sur le total des trois périodes d'échantillonnage. Les résultats de ces ANOVA sont présentés au Tableau 9 pour le ruissellement et les charges, et au Tableau 10 pour les concentrations moyennes pondérées.

L'effet le plus hautement significatif sur la plupart des éléments analysés est celui de la période. Rien d'étonnant, puisque les applications massives de lisier en amont des bandes végétatives ont eu pour effet de modifier au cours du temps la qualité de l'eau ruisselée. Par ailleurs, au cours de ces trois périodes, les volumes d'eau ruisselés ne sont pas nécessairement comparables, puisque les périodes de temps ne sont pas identiques et sont tributaires des conditions climatiques qui ont prévalu. Les charges mesurées entre les périodes de temps sont aussi tributaires des volumes d'eau ruisselés, mais leur évolution au cours du temps témoigne de l'effet des apports massifs de lisier réalisés en amont des bandes végétatives. Les concentrations moyennes pondérées sont davantage comparables entre périodes et leur évolution au cours du temps témoigne de l'effet des divers aménagements de bandes végétatives (Effet traitement). L'effet de ces aménagements sur les volumes d'eau ruisselés et les charges totales mesurées à chaque période et au total ont également été analysés.

L'effet des traitements est significatif pour la plupart des éléments analysés, soit au niveau des charges ou des concentrations moyennes pondérées, sauf pour Al et Fe qui semblent relativement invariables (Tableau 9 et Tableau 10). L'effet des traitements a toutefois été beaucoup plus marqué en 2^e et 3^e période, à mesure que l'effet des épandages répétés de lisier durant l'été 2012 s'est fait ressentir sur les bandes végétatives et que celles-ci ont opéré.

Tableau 9. Analyse de variance sur les charges mesurées dans l'eau de ruissellement.

	Ruiss.	MES	N tot. diss.	N- NH ₄	N- NO ₃	P total	P tot. diss.	P ortho	K	Ca	Mg	Na	Al	B	Cu	Fe	Zn	Mn	
	mm	g/parcelle			mg/parcelle			g/parcelle											
Effets									Valeur de F										
Traitement	7,20	4,85	5,57	3,50	5,80	5,31	5,24	5,31	4,08	4,23	3,21	4,11	1,67	4,63	4,46	2,24	3,69	3,29	
Période	46,32	9,24	16,01	11,74	29,96	8,91	8,79	9,01	2,06	5,04	1,46	2,92	3,11	0,68	3,56	4,18	12,98	5,06	
Période*Traitement	1,39	2,18	1,16	2,36	0,44	2,56	2,53	2,62	1,06	0,81	0,87	0,80	0,32	0,82	1,58	0,82	1,59	0,99	
Effets									Probabilité de F										
Traitement	0,01	0,02	0,01	0,05	0,02	0,01	0,02	0,01	0,04	0,04	0,08	0,04	0,25	0,03	0,03	0,15	0,06	0,07	
Période	<,0001	0,001	<,0001	0,0004	<,0001	0,002	0,002	0,002	0,15	0,02	0,26	0,08	0,07	0,52	0,05	0,03	0,0002	0,02	
Période*Traitement	0,26	0,08	0,37	0,06	0,88	0,04	0,04	0,04	0,43	0,60	0,56	0,61	0,95	0,60	0,19	0,60	0,19	0,47	
Contrastes	Période	Probabilité de t																	
Alpiste vs Saule	1	0,58	0,52	0,68	0,70	0,91	0,70	0,70	0,69	0,47	0,24	0,41	0,35	0,73	0,48	0,59	0,49	0,60	0,23
Alpiste témoin vs Alpiste/1		0,01	0,06	0,35	0,81	0,16	0,43	0,44	0,45	0,15	0,38	0,57	0,34	0,56	0,09	0,29	0,76	0,32	0,88
Saule sb vs Saule/1 et Saule/5		0,84	0,87	0,66	0,53	0,93	0,80	0,81	0,81	0,63	0,20	0,45	0,18	0,89	0,70	0,78	0,40	0,06	0,19
Saule/1 vs Saule/5		0,0002	0,004	0,26	0,64	0,24	0,34	0,36	0,36	0,06	0,01	0,04	0,02	0,49	0,02	0,03	0,07	0,001	0,45
Alpiste témoin vs Saule sb	2	0,41	0,52	0,65	0,82	0,55	0,77	0,78	0,79	0,59	0,67	0,85	0,51	0,99	0,54	0,72	0,84	0,21	0,93
Alpiste vs Saule		0,25	0,23	0,42	0,63	0,43	0,35	0,38	0,37	0,99	0,42	0,59	0,54	0,20	0,34	0,53	0,48	0,07	0,69
Alpiste témoin vs Alpiste/1		0,22	0,01	0,02	0,01	0,83	0,002	0,002	0,002	0,03	0,39	0,16	0,22	0,49	0,09	0,02	0,18	0,46	0,04
Saule sb vs Saule/1 et Saule/5		0,07	0,004	0,03	0,02	0,64	0,002	0,003	0,003	0,02	0,40	0,14	0,21	0,20	0,04	0,003	0,15	0,41	0,52
Saule/1 vs Saule/5	3	0,09	0,26	0,01	0,08	0,003	0,18	0,19	0,20	0,03	0,02	0,07	0,02	0,29	0,08	0,04	0,05	0,04	0,01
Alpiste témoin vs Saule sb		0,75	0,90	0,64	0,69	0,73	0,69	0,71	0,71	0,77	0,64	0,85	0,77	0,66	0,83	0,84	0,78	0,19	0,33
Alpiste vs Saule		0,39	0,93	0,21	0,05	0,88	0,11	0,10	0,09	0,80	0,57	0,58	0,64	0,60	0,78	0,92	0,69	0,51	0,77
Alpiste témoin vs Alpiste/1		0,09	0,11	0,01	0,004	0,12	0,001	0,001	0,001	0,07	0,14	0,03	0,11	0,24	0,03	0,05	0,18	0,61	0,35
Saule sb vs Saule/1 et Saule/5	Total	0,46	0,37	0,68	0,47	0,74	0,14	0,14	0,13	0,72	0,81	0,38	0,72	0,59	0,41	0,26	0,59	0,65	0,88
Saule/1 vs Saule/5		0,39	0,35	0,11	0,33	0,06	0,27	0,27	0,27	0,16	0,25	0,21	0,23	0,24	0,18	0,20	0,28	0,52	0,50
Alpiste témoin vs Saule sb		0,33	0,81	0,06	0,02	0,28	0,05	0,04	0,04	0,37	0,33	0,33	0,37	0,53	0,41	0,66	0,53	0,35	0,46
Alpiste vs Saule		0,43	0,82	0,39	0,34	0,59	0,33	0,33	0,33	0,82	0,91	0,89	0,93	0,43	0,80	0,93	0,84	0,33	0,73
Alpiste témoin vs Alpiste/1		0,01	0,01	0,01	0,01	0,06	0,005	0,005	0,004	0,03	0,09	0,06	0,06	0,20	0,02	0,02	0,17	0,71	0,07
Saule sb vs Saule/1 et Saule/5		0,15	0,07	0,27	0,26	0,89	0,06	0,06	0,06	0,28	0,90	0,43	0,88	0,30	0,21	0,08	0,58	0,14	0,57
Saule/1 vs Saule/5		0,004	0,03	0,01	0,15	0,003	0,14	0,15	0,16	0,03	0,01	0,03	0,01	0,13	0,02	0,02	0,04	0,01	0,02
Alpiste témoin vs Saule sb		0,26	0,64	0,15	0,17	0,21	0,24	0,23	0,24	0,60	0,30	0,50	0,32	0,57	0,42	0,79	0,59	0,11	0,29

Tableau 10. Analyse de variance sur les concentrations moyennes pondérées mesurées dans l'eau de ruissellement.

	MES	N tot. diss.	N- NH ₄	N- NO ₃	P total	P tot. diss.	P ortho	K	Ca	Mg	Na	Al	B	Cu	Fe	Zn	Mn	
	mg/L				µg/L			mg/L										
Effets	Valeur de F																	
Traitement	3,19	3,22	2,81	2,37	4,32	4,22	4,32	3,51	8,41	2,52	6,07	0,64	2,63	2,63	0,78	3,35	4,44	
Période	4,96	27,64	21,31	18,28	41,46	41,03	40,71	23,09	15,65	22,35	13,93	6,51	32,39	30,72	16,65	7,27	6,17	
Période*Traitement	1,90	0,44	1,12	0,64	1,78	1,79	1,87	0,68	0,27	0,37	0,18	0,67	0,85	1,42	0,48	0,46	0,23	
Effets	Probabilité de F																	
Traitement	0,08	0,07	0,10	0,14	0,03	0,03	0,03	0,05	0,003	0,11	0,02	0,65	0,10	0,10	0,56	0,06	0,03	
Période	0,02	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,001	0,01	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	0,004	0,01	
Période*Traitement	0,12	0,88	0,39	0,74	0,14	0,14	0,12	0,71	0,97	0,93	0,99	0,71	0,57	0,25	0,86	0,87	0,98	
Contrastes	Période	Probabilité de t																
Alpiste vs Saule	1	0,72	0,87	0,85	0,99	0,86	0,85	0,85	0,71	0,59	0,77	0,73	0,77	0,73	0,92	0,76	0,96	0,61
Alpiste témoin vs Alpiste/1		0,47	0,76	0,96	0,74	0,74	0,74	0,75	0,59	0,72	0,78	0,89	0,50	0,53	0,96	0,41	0,78	0,80
Saule sb vs Saule/1 et Saule/5		0,93	0,82	0,75	0,99	0,89	0,90	0,90	0,76	0,31	0,60	0,38	0,58	0,80	0,82	0,36	0,33	0,52
Saule/1 vs Saule/5		0,37	0,91	0,99	0,95	0,79	0,80	0,80	0,71	0,98	0,82	0,97	0,12	0,66	0,56	0,78	0,52	0,93
Alpiste témoin vs Saule sb	2	0,85	0,86	0,93	0,87	0,90	0,90	0,91	0,83	0,95	0,98	0,83	0,83	0,81	0,93	0,94	0,65	0,93
Alpiste vs Saule		0,67	0,27	0,70	0,12	0,59	0,62	0,60	0,21	0,23	0,26	0,19	0,69	0,81	0,76	0,71	0,90	0,23
Alpiste témoin vs Alpiste/1		0,03	0,30	0,05	0,57	0,02	0,02	0,02	0,11	0,74	0,67	0,83	0,85	0,36	0,06	0,87	0,14	0,38
Saule sb vs Saule/1 et Saule/5		0,002	0,66	0,27	0,04	0,02	0,02	0,02	0,45	0,04	0,43	0,17	0,70	0,37	0,02	0,83	0,01	0,29
Saule/1 vs Saule/5	0,64	0,14	0,06	0,99	0,16	0,17	0,17	0,04	0,55	0,64	0,38	0,57	0,18	0,06	0,71	0,83	0,19	
Alpiste témoin vs Saule sb	3	0,56	0,95	0,91	0,97	0,88	0,88	0,89	0,66	0,76	0,96	0,97	0,70	0,92	0,56	0,78	0,30	0,78
Alpiste vs Saule		0,06	0,45	0,05	0,74	0,18	0,16	0,15	0,46	0,73	0,64	0,68	0,69	0,14	0,15	0,57	0,40	0,73
Alpiste témoin vs Alpiste/1		0,13	0,27	0,03	0,79	0,001	0,001	0,001	0,40	0,98	0,22	0,88	0,90	0,18	0,27	0,55	0,44	0,60
Saule sb vs Saule/1 et Saule/5		0,83	0,34	0,90	0,28	0,38	0,37	0,33	0,18	0,31	0,84	0,31	0,69	0,42	0,60	0,36	0,18	0,21
Saule/1 vs Saule/5	0,06	0,06	0,35	0,11	0,07	0,08	0,08	0,03	0,10	0,05	0,14	0,07	0,01	0,03	0,09	0,69	0,50	
Alpiste témoin vs Saule sb	Total	0,71	0,12	0,02	0,78	0,04	0,03	0,03	0,46	0,70	0,67	0,69	0,97	0,84	0,93	0,65	0,35	0,44
Alpiste vs Saule		0,34	0,69	0,40	0,20	0,41	0,40	0,39	0,18	0,04	0,15	0,05	0,78	0,39	0,35	0,76	0,55	0,08
Alpiste témoin vs Alpiste/1		0,04	0,09	0,03	0,73	0,01	0,01	0,01	0,10	0,49	0,29	0,81	0,48	0,13	0,13	0,81	0,15	0,29
Saule sb vs Saule/1 et Saule/5		0,13	0,24	0,69	0,04	0,13	0,14	0,12	0,59	0,001	0,24	0,01	0,22	0,93	0,42	0,23	0,01	0,02
Saule/1 vs Saule/5	0,11	0,03	0,11	0,24	0,10	0,11	0,11	0,02	0,03	0,05	0,03	0,76	0,02	0,03	0,28	0,62	0,10	
Alpiste témoin vs Saule sb		0,69	0,19	0,13	0,78	0,25	0,24	0,25	0,76	0,43	0,78	0,50	0,84	0,77	0,69	0,17	0,37	

5.1 Effet des bandes végétatives sur le ruissellement de l'eau

Un des effets majeurs observés au niveau du ruissellement est celui relié à la création des baissières pour retenir l'eau et favoriser son infiltration dans le sol. Le Tableau 13 et le Tableau 14 à l'Annexe 5 rapportent les valeurs moyennes de ruissellement, charges et concentrations moyennes d'éléments pour les différents traitements et combinaison de traitements à l'étude. La Figure 19a illustre par ailleurs les volumes d'eau ruisselés et cumulés au cours du temps sous l'effet des différents aménagements de bandes végétatives. L'alpiste roseau en baissière a réduit les volumes d'eau ruisselés de façon marquée dès la première période d'échantillonnage (Prob. $t = 0,04$), soit de 986 à 624 mm durant les trois périodes. La culture de saule en cinq baissière (Saule/5) a également réduit de façon substantielle les volumes d'eau ruisselés par rapport au saule en une baissière (Saule/1) (Prob. $t = 0,001$). Le volume d'eau ruisselé durant les trois périodes est passé de 917 à 465 mm et l'effet a été plus particulièrement marqué durant la première période (Prob. $t = 0,0002$), passant de 549 à 267 mm. Toutefois, en 2^e période, la production de saule en une ou cinq baissières semble avoir réduit quelque peu le ruissellement par rapport au saule cultivé sans baissière (Saule sb) (Prob. $t = 0,07$), avec des ruissellements respectifs de 177 et 280 mm. Sur la durée des trois périodes, le ruissellement est passé de 847 à 691 mm du saule sans baissière au saule avec baissières (1 ou 5), mais l'effet n'était pas très significatif (Prob. $t = 0,15$), en raison de la moins bonne performance du saule en une baissière à la première période. Le chaume de l'alpiste et la densité plus élevée de plantes sembleraient offrir une meilleure résistance au ruissellement par rapport au saule arbustif planté en rangée; ce qui pourrait expliquer la faible performance du saule par rapport à l'alpiste dans une baissière à réduire le ruissellement. Par contre, l'aménagement de cinq petites baissières pour autant de rangées de saule semble avoir été particulièrement efficace pour réduire les volumes d'eau ruisselés, ainsi que les charges et concentrations en éléments, comme il en sera discuté plus loin.

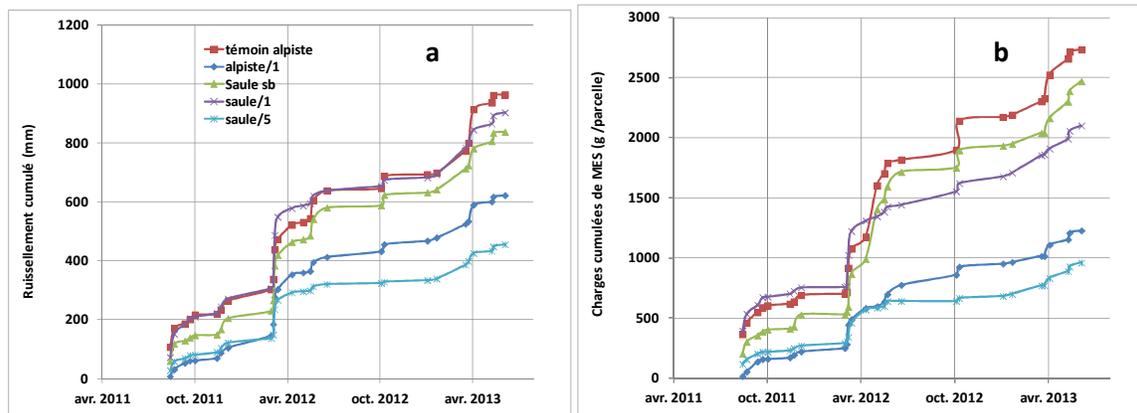


Figure 19. Ruissellement cumulé (a) et charges cumulées de MES (b) au cours du temps en fonction des cinq bandes végétatives.

5.2 Effet des bandes végétatives sur le ruissellement de l'azote

L'évolution de la plupart des charges en éléments ruisselés est liée en grande partie aux volumes d'eau ruisselés et à l'effet de l'aménagement des bandes végétatives sur ce ruissellement, puisque les charges sont calculées à partir du produit du ruissellement et des concentrations analysées (Éq. 1). En revanche, l'aménagement des baissières et le type de culture peuvent avoir joué un certain rôle additionnel sur les flux de concentrations. Par exemple, l'évolution des charges en MES a été légèrement réduite par l'aménagement d'une

baissière sous le saule (Saule/1) par rapport au saule sans baissière (Saule sb) (Figure 19b), alors que le ruissellement n'a pas été autant affecté (Figure 19a). De fait, à la deuxième période, d'avril 2012 à avril 2013, les charges en MES ont diminué de manière importante (Prob. $t = 0,004$) dans les bandes de saule avec baissières (1 ou 5) par rapport aux bandes de saule sans baissière, de 1133 à 364 g/parcelle, alors que le ruissellement n'a diminué que de 280 à 177 mm. Le développement du saule à l'intérieur des baissières au cours du temps semble avoir eu pour effet de consolider les baissières et de capter les charges en MES à l'intérieur de ces bandes végétaives, plus que le ruissellement.

La Figure 20 illustre l'évolution des charges cumulées et des concentrations moyennes pondérées (concentrations) de N total dissous. La bande végétative d'alpiste sans baissière (Alpiste témoin) a produit les plus grandes charges de N total dissous, alors que l'alpiste en baissière (Alpiste/1) a produit les plus petites charges. Ces charges étaient significativement différentes à la 2^e période (Prob $t = 0,01$) et sur la durée de l'essai les charges ont diminué de plus de la moitié, soit de 1077 à 477 g N total dissous/parcelle (Prob $t = 0,01$). Sur la durée de l'essai, les concentrations de N total dissous ont aussi diminué de 6,8 à 4,8 mg/L, lorsque l'alpiste a été cultivé en baissière (Figure 20b). Le saule produit en baissières (Saule/1 et Saule/5) a également réduit les charges de N total dissous en 2^e période par rapport au Saule sans baissière (Saule sb) de 454 à 268 g/parcelle (Prob $t = 0,004$). Par contre, les charges de N total dissous produites en 1^e et 3^e périodes dans Saule/1 étaient relativement plus élevées que dans Saule sb et Saule/5. Finalement, pour la durée de l'essai, les charges dans Saule/1 étaient similaires sinon plus élevées que celles dans Saule sb. En revanche, le saule en cinq baissières (Saule/5) a réduit de plus de la moitié les charges en N total dissous par rapport au Saule/1, soit de 882 à 343 kg/parcelle sur la durée de l'essai (Prob $t = 0,01$). Les concentrations en N total dissous ont suivi les mêmes tendances. Elles étaient de 6,0 et 4,6 mg/L de N total dissous dans Saule/1 et Saule/5, respectivement à la fin de l'essai (Prob $t = 0,03$).

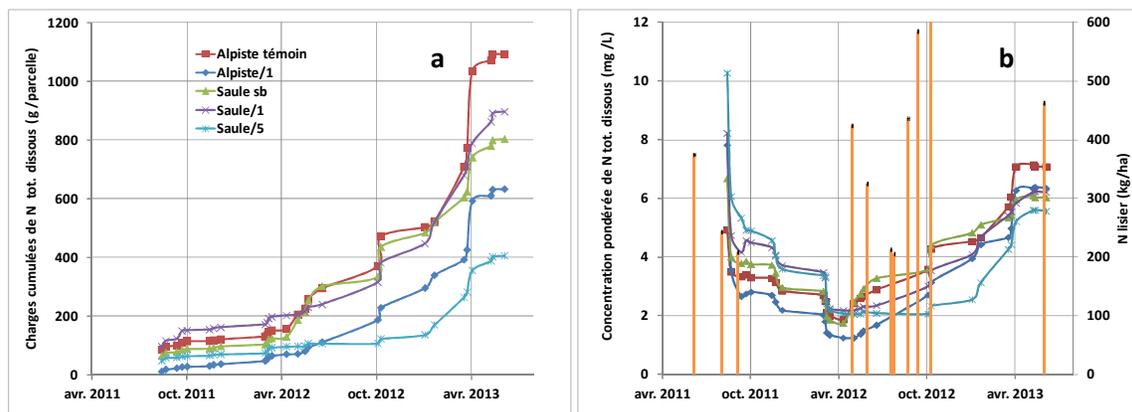


Figure 20. Évolution des charges cumulées (a) et des concentrations moyennes pondérées (b) de N total dissous dans l'eau de ruissellement.

La Figure 20b illustre également les apports de N liés aux épandages de lisier qui étaient relativement importants durant l'été et l'automne 2012. Suite à ces épandages massifs, les concentrations en N total dissous ont augmenté de façon constante au cours du temps, soit de 9,4 à 11,6 mg/L en moyenne de la 2^e à la 3^e période, mais les concentrations en N-NH₄ ont augmenté de façon encore plus marquée de 3,2 à 5,9 mg/L (données moyennes non présentées au Tableau 14 de l'Annexe 5). L'évolution des concentrations de N-NH₄ illustrées à la Figure 21a indique une augmentation très importante après la fonte des neiges au début du mois d'avril 2013. À l'inverse, les concentrations de N-NO₃ ont diminué de 4,6 à 3,6 mg/L en moyenne entre

la 2^e et 3^e période, indiquant soit une réduction du processus de nitrification ou des pertes de nitrates liées à la dénitrification ou au lessivage en profondeur dans le sol. Alors que les concentrations moyennes en N-NH₄ durant l'essai étaient les plus importantes sous l'Alpiste témoin (3,2 mg/L) et ont diminué de façon significative (Prob t = 0,03), lorsque cultivé en baissière (1,4 mg/L), les concentrations en N-NO₃ semblaient suivre une tendance inverse, c'est-à-dire que les concentrations avaient tendance à diminuer davantage en 3^e période sous l'Alpiste témoin ou le saule sans baissière (Figure 21b).

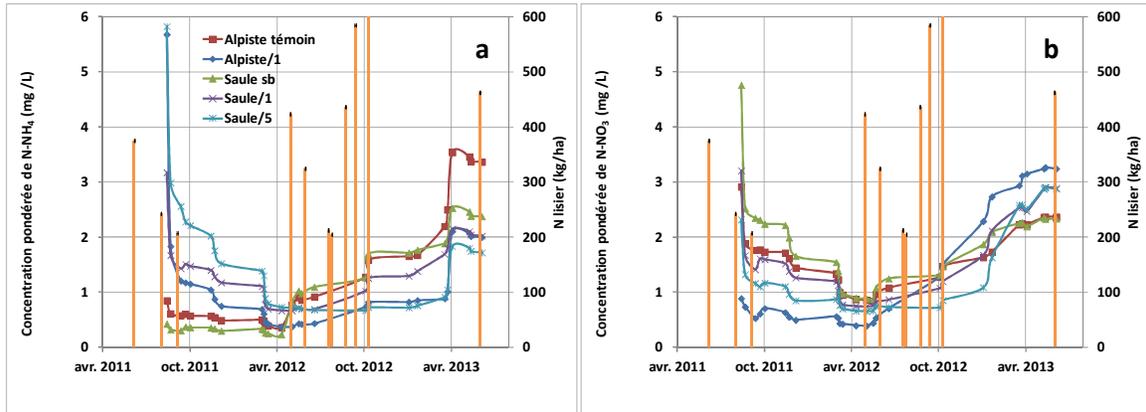


Figure 21. Évolution des concentrations moyennes pondérées de N-NH₄ (a) et de N-NO₃ (b) dans l'eau de ruissellement.

De fait, le seul effet significatif obtenu sur les concentrations de N-NO₃ est celui lié à la présence de baissières dans le saule. La présence de baissières (Saule/1 ou Saule/5) aurait augmenté les concentrations de N-NO₃ dans l'eau ruisselée par rapport au Saule sb en 2^e période et sur la durée de l'essai. Dans ce dernier cas, la présence de baissières dans le saule aurait augmenté de 2,1 à 2,6 mg/L les concentrations en N-NO₃ dans les eaux ruisselées (Prob de t. = 0,04). En termes de charges, la diminution importante du ruissellement occasionnée par les cinq baissières sous Saule/5 a réduit de façon significative (Prob de t. = 0,003) les charges de N-NO₃ par rapport à Saule/1, soit de 396 à 172 g/parcelle sur l'ensemble de l'essai. De la même façon, la présence d'une baissière d'alpiste a réduit les charges de N-NO₃ de 363 à 247 g/parcelle (Prob de t. = 0,06). Donc, même si les baissières ont tendance à réduire les charges de N-NO₃, les concentrations pondérées demeurent plus élevées en présence de baissières. De fait, les concentrations sont plus élevées parce que les volumes d'eau ruisselés sont réduits.

Les proportions de N-NH₄ et N-NO₃ par rapport à N total dissous dans l'eau de ruissellement sont illustrées la Figure 22. Il apparaît durant la 2^e période (avril 2012 à avril 2013) que la proportion de N-NH₄/N total dissous est plus importante dans les bandes végétatives sans baissière, tandis que la proportion N-NO₃/N total dissous est plus élevée dans Alpiste 1 et Saule 5.

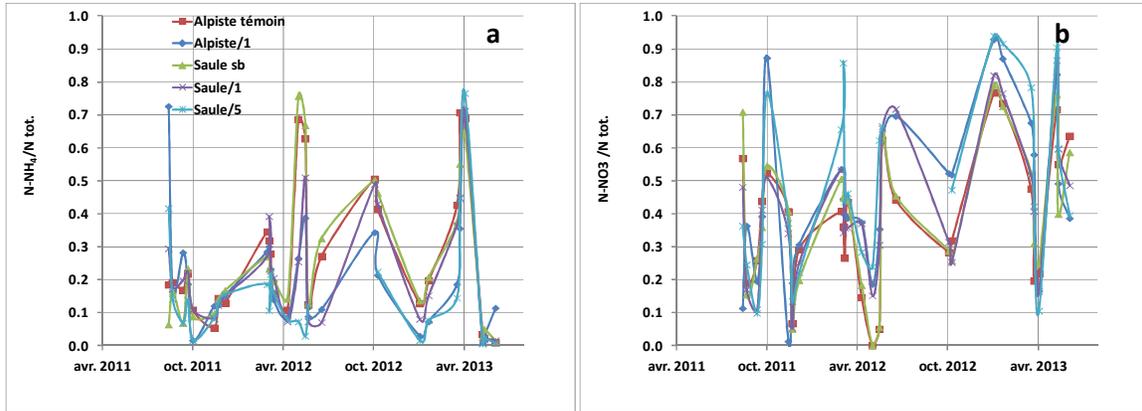


Figure 22. Évolution de la proportion de N-NH₄ (a) et de N-NO₃ (b) par rapport à N total dissous dans l'eau de ruissellement.

5.3 Effet des bandes végétatives sur le ruissellement du phosphore

Les diverses bandes végétatives ont influencé le phosphore de la même façon que pour les MES et l'azote. Cependant, parmi les diverses formes de phosphore analysées dans l'eau de ruissellement (P total, P total dissous ou P ortho), le P associé aux orthophosphates ou réactif à la solution colorimétrique de Murphy et Riley (1960) semble être la principale forme ruisselée au-delà des bandes végétatives. La Figure 23a illustre la relation entre les diverses formes de N mesurées dans l'eau de ruissellement et la Figure 23a illustre la relation entre les diverses formes de N.

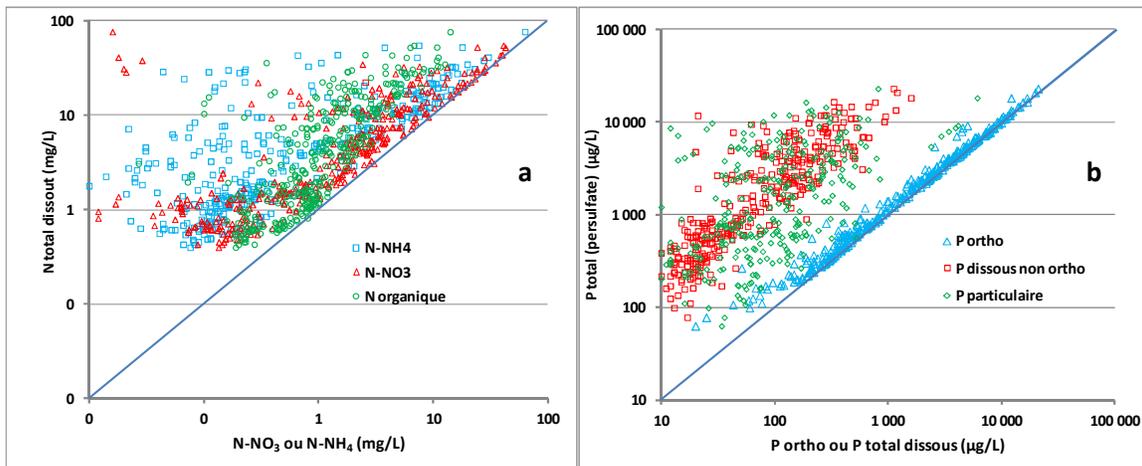


Figure 23. Relation entre les concentrations de N-NH₄, N-NO₃, N organique et N total dissous (a), et relation en P ortho, P total dissous et P total (b).

Contrairement à l'azote total dissous qui ne semble pas dominé par une forme précise de N, soit N-NH₄ et N-NO₃ ou N organique, le P total dans l'eau ruisselée semble en majeure partie dominé par les formes d'orthophosphate. Le P particulaire ou lié aux particules de sol était très peu présent, de même que les autres formes de P dissous non réactives. Il n'est donc pas étonnant que les effets soulevés au niveau de l'analyse de variance soient essentiellement les mêmes entre P total, P total dissous ou P ortho.

En termes de charge, l'implantation de l'alpiste dans une baissière (Alpiste/1) a réduit de façon significative (Prob. de t = 0,005) les charges de P total (ou P ortho) par rapport à l'alpiste sans

baissière (Alpiste témoin), de 675 à 161 mg/parcelle sur la durée de l'essai (Tableau 9 et Tableau 13 à l'Annexe 5). Ces réductions ont été particulièrement significatives en 2^e (Prob. de t = 0,002) et 3^e période (Prob. de t = 0,001), à mesure que l'alpiste s'est installé dans la baissière. Le saule en baissière (Saule/1 et Saule/5) semble aussi avoir réduit les charges en P total par rapport au saule sans baissière (Saule sb), mais dans une moindre mesure. Sur la durée de l'essai, les charges de P total ont diminué de 497 à 240 mg/parcelle (Prob. de t = 0,06). Ces effets étaient très significatifs en 2^e période (Prob. de t = 0,002), mais peu significatifs en 3^e (Prob. de t = 0,14). En 3^e période, les trois types de bandes de saule (Saule sb, Saule/1, Saule/5) ont produit en moyenne des charges de P total plus faibles par rapport aux deux bandes d'alpiste (Alpiste témoin, Alpiste/1) soit de 123 par rapport à 193 mg/parcelles (Prob. de t = 0,11). De fait, le saule sans baissière a produit en 3^e période de plus faibles charges (Prob. de t = 0,03) que l'Alpiste témoin sans baissière, soit de 180 au lieu de 313 mg/parcelle.

Certains résultats obtenus sur les charges de P total (P total, dissous ou P ortho) s'appliquent également aux concentrations moyennes pondérées de P (Tableau 10 et Tableau 14 à l'Annexe 5). Les bandes végétatives d'alpiste sans baissière ont produit des concentrations moyennes pondérées plus élevées (4280 µg/L) que l'alpiste en baissière (1611 µg/L) (Prob t. = 0,01) et les effets ont été plus particulièrement marqués en 2^e (5905 vs 1734 µg/L) (Prob t. = 0,02) et 3^e période (9251 vs 4554 µg/L) (Prob t. = 0,001). On note cependant une augmentation importante de ces concentrations au cours du temps dans les deux cas et des concentrations qui dépassent jusqu'à plus de 300 fois le critère de qualité de l'eau reconnu pour la protection de la vie aquatique, soit de 30 µg/L de P total. Au niveau du saule sur la durée de l'essai, la diminution des concentrations de P total était plus importante dans le saule en cinq baissières par rapport au Saule en une baissière (Prob t. = 0,10). Les concentrations moyennes pondérées de P total sont demeurées à 1721 µg/L en cinq baissières (saule/5), tandis qu'elles étaient de 2394 sous Saule/1. En 2^e période par contre, le saule sans baissière a produit des concentrations deux fois plus élevées (Prob. t = 0,02) que les deux autres bandes de saule en baissières (Saule/1 et Saule/5) soit de 5588 µg/L par rapport à 2486 µg/L.

La Figure 24a illustre l'évolution des charges cumulées de P total ruisselé à la sortie des cinq bandes végétatives, tandis que la Figure 24b illustre celle des concentrations moyennes pondérées. Dès le début des apports massifs de lisier en mai 2012, les concentrations et les charges de P total ont augmenté de façon marquée et plus particulièrement dans les bandes végétatives sans baissière (Alpiste témoin et Saule sb).

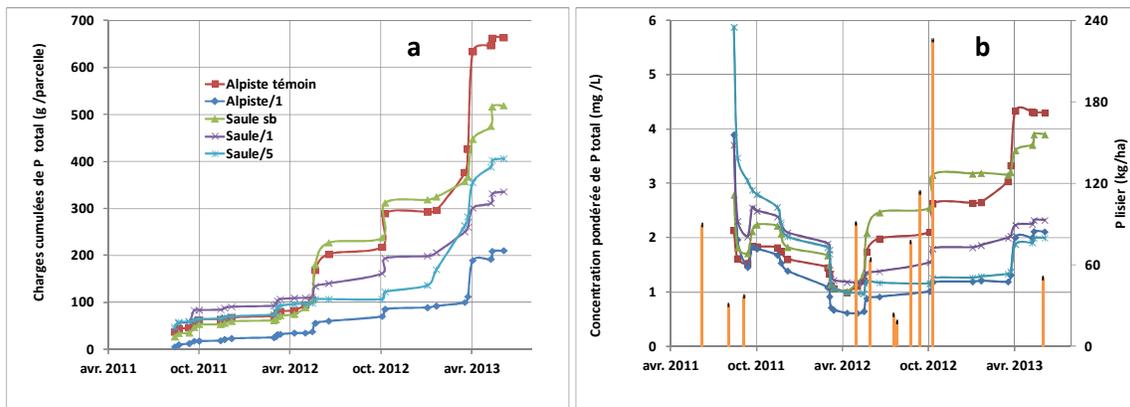


Figure 24. Évolution des charges cumulées (a) et des concentrations moyennes pondérées (b) de P total (digestion persulfate acide) dans l'eau de ruissellement.

Même si les baissières ont eu un effet marqué pour réduire les charges, les concentrations demeurent excessivement élevées par rapport au critère reconnu pour la protection de la vie aquatique, soit de 30 µg/L de P total. De plus, ce P total est en majeure partie sous forme d'orthophosphates, donc une forme de phosphore très biodisponible et qui favorise l'activité biologique et la croissance des algues en milieu aquatique. Le lisier de porc appliqué à dose massive sur une prairie en amont des bandes végétatives aurait donc conduit à une désorption et un ruissellement massif du phosphore contenu dans le lisier laissé à la surface du sol. Ce phosphore aura ruisselé à travers les bandes végétatives sans être capté par les cultures de saule ou d'alpiste. Seules les baissières auront eu un effet marqué pour réduire le ruissellement et les charges de P.

5.4 Effet des bandes végétatives sur le ruissellement des autres éléments (K, Ca Na, Al, B, Cu, Fe, Zn)

La plupart des charges produites par les autres éléments analysés dans les eaux de ruissellement (K, Ca Na, B, Cu, Zn, sauf Al et Fe) ont été influencées par les bandes végétatives, de la même manière que celle des MES, N et P, c'est à dire principalement par la quantité de ruissellement interceptée par les bandes végétatives et les baissières. Rappelons que le ruissellement a évolué au cours des périodes d'échantillonnage et principalement en fonction de la présence de baissières dans les bandes végétatives (Tableau 9). Les principaux contrastes significatifs au niveau des charges sur la durée de l'essai sont celui de Alpiste/1 vs Alpiste témoin et celui de Saule/5 vs Saule/1. Au niveau de l'alpiste, l'aménagement d'une baissière a réduit le ruissellement et les charges de la plupart des éléments ruisselés. Par contre, au niveau du saule, l'aménagement d'une seule baissière n'a pas eu autant d'effet que l'aménagement de cinq baissières pour réduire le ruissellement et les charges de la plupart des éléments mesurés. Le saule en cinq baissières (Saule/5) a cependant produit la meilleure réduction de charges en éléments de toutes les bandes végétatives.

Pour ce qui est des effets sur les concentrations moyennes pondérées des autres éléments, les effets ont été plus variables selon les éléments. Par exemple, les concentrations de K semblent avoir été influencées par l'aménagement de baissières dans les bandes végétatives comme l'ont été N total, N-NH₄ et les MES. Saule/5 a réduit les concentrations de K par rapport à Saule/1, tandis qu'Alpiste/1 les a réduites par rapport à Alpiste témoin. Les plantes utilisées dans les bandes végétatives ont affecté les concentrations de Ca et Na dans l'eau de ruissellement comme pour N-NO₃, c'est-à-dire que les concentrations de Ca et Na étaient plus élevées dans le saule en baissières (Saule/1 et Saule/5) par rapport à Saule sb et elles étaient plus élevées dans les bandes en saule que celles en alpiste. Ces effets des plantes sur les concentrations en Ca et Na dans l'eau de ruissellement semblent reliés aux effets des plantes sur les teneurs en N-NO₃, Ca et Na dans le sol dans la bande végétative (Tableau 7 et Figure 15). En effet, l'alpiste aurait été plus performant que le saule pour prélever Na et Ca dans le sol et réduire leur concentration dans l'eau de ruissellement, du moins durant les trois premières années d'implantation de ces bandes végétatives. En revanche, l'alpiste aurait réduit les teneurs en N-NO₃ dans le sol, mais les quantités de N exportées dans les parties récoltées de l'alpiste et du saule n'étaient pas statistiquement différentes et les concentrations moyennes pondérées de N-NO₃ dans les eaux ruisselées non plus.

Tel que pour les charges, les concentrations moyennes pondérées d'Al et Fe n'ont pas été influencées ni par les plantes ni par les baissières aménagées dans les bandes végétatives. En revanche, celles de Cu, Mn, Zn et B l'ont été quelque peu. L'aménagement de cinq baissières dans le saule (Saule/5) a réduit les concentrations de B, Cu et Mn par rapport à l'aménagement

d'une seule baissière (Saule/1), comme pour plusieurs éléments comme N total dissous, P total, K, Ca, Mg, et Na en plus du ruissellement et des MES. La présence d'un chaume plus abondant et d'une densité plus élevée de plantes a été suggérée pour expliquer la meilleure performance de l'alpiste par rapport au saule aménagé dans une baissière pour réduire le ruissellement et les pertes en éléments de ces bandes végétatives.

6 Bilan partiel de l'azote et du phosphore

Le Tableau 11 permet de comparer sur la durée de l'essai, les quantités d'éléments fertilisants N, P et K appliquées dans la prairie en amont des bandes végétatives à celles exportées avec la biomasse de la prairie récoltée en amont et des bandes végétatives d'alpiste et de saule (sans baissière ou avec une baissière), et finalement des quantités ruisselées à la sortie des bandes végétatives. Les quantités exportées avec les biomasses de saule ou d'alpiste sont relativement modestes par rapport aux apports de lisier et aux charges appliquées, de même que les charges de N, P et K retrouvées dans les eaux de ruissellement sont relativement faibles, mais plus élevées que les quantités exportées avec la biomasse dédiée de saule ou d'alpiste.

Tableau 11. Bilan partiel de l'azote et du phosphore.

	N	P	K	N	P	K
	kg/parcelle			kg/ha†		
Charge appliquée	48,2	9,6	22,5	4230	846	1977
Prairie récoltée en amont	2,72	0,33	3,36	239	29	295
Biomasse dédiée (alpiste)	0,26	0,06	0,37	70	15	101
Biomasse dédiée (saule)	0,27	0,03	0,08	70	8	20
Eaux de ruissellement (alpiste)	0,78	0,42	1,22	49	26	77
Eaux de ruissellement (saule)	0,84	0,42	1,60	52	27	100
Déficit du bilan (alpiste)	44,5	8,8	17,6			
Déficit du bilan (saule)	46,9	9,1	20,5			

† Les quantités d'éléments fertilisants rapportées à l'hectare sont calculées en fonction des surfaces occupées par les cultures. La prairie sur laquelle était épandu le lisier occupait 114 m², les bandes végétatives occupaient 36,6 m², tandis que le ruissellement opérait sur 160 m². Une surface résiduelle de 7,4 m² correspond à la bande engazonnée sur laquelle est installée la dalle pour l'interception du ruissellement.

Cependant, cette analyse des bilans d'éléments est partielle et ne tient pas compte de ce qui est accumulé dans le sol en amont des bandes végétatives dans la prairie, et dans les bandes végétatives elles-mêmes, même si nous avons suivi l'évolution des concentrations en éléments disponibles dans le sol des bandes végétatives. Ce déficit en éléments fertilisants semble néanmoins quelque peu plus élevé dans le saule, mais un calcul d'erreur serait nécessaire pour statuer sur cette différence. Une différence significative en N indiquerait par exemple des accumulations plus importantes de N dans le sol sous les bandes végétatives de saule ou des pertes de N plus importantes par voies atmosphériques (dénitrification) ou par lessivage en profondeur dans le sol.

Par ailleurs, malgré les faibles charges retrouvées dans les eaux de ruissellement, certaines concentrations moyennes pondérées excèdent les critères de qualité de l'eau généralement reconnus pour maintenir la qualité de l'eau, soit de 1,5 mg/L pour N-NH₄, de 10 mg N/L pour N-NO₃ et de 30 µg/L pour P total (MDDEFP, 2013). Or, les concentrations moyennes pondérées atteintes en fin d'étude dans les eaux de ruissellement sont légèrement supérieures à ces critères pour l'azote, mais largement supérieures pour le phosphore. En effet, les concentrations

moyennes pondérées de N-NH₄ ont varié de 1,4 à 3,2 mg/L entre les bandes végétatives, alors que le critère est de 1,5 mg N/L (Tableau 14 à l'Annexe 5). Pour le P total, les concentrations moyennes pondérées ont varié de 1,5 à 4,5 mg/L, soit des concentrations près de 50 à 150 fois plus élevées que le critère de 30 µg/L retenu pour la protection de la vie aquatique dans les eaux de surface (Tableau 14 à l'Annexe 5). Les concentrations moyennes pondérées des nitrates sont toutefois demeurées inférieures au critère retenu par le MDDEFP. Elles ont varié de 2,0 à 2,7 mg/L. Cependant ces pertes de N ne considèrent pas les pertes dans les eaux de drainage ou par lessivage de même que les pertes par voie atmosphérique liées à la dénitrification par exemple. En effet, les nitrates solubles atteignent plus facilement les eaux de drainage dans les systèmes qui favorisent l'infiltration (Rahman et al., 2012; Duchemin et Hogue, 2009). En revanche, les bandes végétatives n'étaient pas drainées et les baissières étaient creusées dans un sol en profondeur plus imperméable. Par ailleurs, l'azote prélevé par les bandes végétatives et accumulé sous forme organique se minéralise à la longue et entraîne une augmentation des formes solubles et des pertes en azote (Rahman et al., 2012). De telles bandes végétatives mériteraient d'être suivies sur un plus long terme afin de vérifier si les charges d'azote augmentent dans les eaux de ruissellement ou migrent en profondeur dans le sol. Ceci permettrait un meilleur bilan des éléments et de s'assurer que les critères environnementaux soient respectés.

7 Discussion

Les résultats sur le ruissellement indiquent que la présence d'au moins une baissière réduit le ruissellement et améliore les capacités de rétention, de filtration et de traitement des bandes enherbées de graminées comme l'alpiste. Plusieurs éléments ont été affectés à la baisse par la présence de cette baissière dans l'alpiste, dont les concentrations moyennes pondérées de MES, N total dissous, N-NH₄, P total et K. En revanche, cette baissière n'a pas eu d'influence sur les concentrations moyennes pondérées de N-NO₃, ni d'autres éléments plus solubles comme Na et B ou moins solubles comme Ca, Mg, Cu, Fe et Mn, même si les charges de ces éléments ont toutes diminué sous l'effet de la baissière. Ces derniers résultats indiqueraient que l'effet de la baissière sur la réduction de charges serait principalement lié à la réduction du ruissellement. Celle-ci a réduit le ruissellement de 986 à 624 mm sur les 23 mois de suivi du ruissellement soit de 37 %. Une telle réduction est relativement importante et nécessite de comprendre où l'eau accumulée dans la baissière a transité. Une partie de l'eau a été évapotranspirée en période de croissance des plantes, mais la majorité de l'eau a dû se drainer en profondeur ou s'écouler le long de la pente sous la surface du sol, car le sol en profondeur (> 30 cm) est relativement imperméable. Éventuellement, le dispositif de mesure du ruissellement devrait inclure des mesures de ces eaux d'écoulement subsurface ou hypodermique. L'installation d'un drain peu profond connecté à la dalle recueillant le ruissellement pourrait pallier à ce problème. Toutefois, les mesures sur la qualité de l'eau du sol avec les lysimètres à succion installés à la sortie des bandes végétatives n'indiquaient pas d'évolution des concentrations de N en lien avec la présence de baissières (Tableau 8).

Les baissières enherbées ont plus souvent été étudiées dans le domaine des transports en bordure des autoroutes. Plusieurs études ont démontré que les baissières enherbées sont efficaces pour réduire les MES avec des réductions de charges de l'ordre de 48 à 98 % (Yu et al., 2001; Bäckström, 2003; Stagge et al., 2012). Les études réalisées en laboratoire et au champ ont démontré que les baissières enherbées réduisent les MES par les mécanismes de sédimentation et que la filtration joue un rôle secondaire (Deletic, 2006; Stagge et al., 2012). La sédimentation des particules est en fait gouvernée par la loi de Stokes et liée au temps de résidence

hydraulique et à la grosseur des particules (Bäckström, 2003). La réduction des charges en N par les baissières enherbées est relativement plus variable (Stagge et al., 2012). Une étude sur des baissières installées à la sortie d'un stationnement avait démontré des réductions de charges en nitrate par des mécanismes de prélèvement et d'infiltration, mais que les concentrations avaient été peu affectées par les baissières enherbées (Rushton, 2001). Les études sur le phosphore rapportent également des résultats très variables. Certaines études rapportent des réductions de charge de P total, tandis que d'autres rapportent des augmentations de charges, qu'on a reliées à la décomposition et au lessivage de la matière organique accumulée dans les baissières enherbées (Stagge et al., 2012).

Yu et al. (2001) ont mesuré sur des baissières de 30 m de long avec des pentes de 1 % en bordure d'autoroute, des réductions de charges de N total, P total et MES allant de 14 à 20 %, 29 à 50 % et 48 à 67 %, respectivement. L'installation de restricteurs de débit le long de ces baissières a permis de réduire davantage les charges de N total de 21 à 23 %, les charges de P total de 58 à 77 % et les charges de MES de 70 à 86 %. Les temps de rétention étaient presque doublés avec l'installation de ces restricteurs de débit. De toute évidence, le rôle des baissières et des restricteurs de débit est d'augmenter le temps de résidence hydraulique de la solution chargée afin de favoriser la sédimentation des particules et l'infiltration de l'eau.

Afin d'avoir un meilleur contrôle sur les éléments solubles (N-NH_4^+ , N-NO_3^- et P-PO_4^-), certaines études suggèrent d'augmenter les longueurs des bandes filtrantes puisque les meilleurs moyens de réduire leurs charges dans les eaux de ruissellement sont la dilution, l'infiltration et l'adsorption sur la matière organique et les argiles (Rahman et al., 2012; Blanco-Canqui et al., 2004). L'immobilisation et les transformations biologiques ou chimiques sont d'autres moyens qui peuvent aussi intervenir (Blanco-Canqui et al., 2004). Ceci dit, les designs qui favorisent une augmentation des temps de résidence hydraulique vont également influencer l'efficacité de traitement des formes solubles. Les baissières, les restricteurs de débit, la hauteur et la densité végétale en sont des exemples. D'ailleurs, ces caractéristiques permettent autant de réduire les sédiments et les nutriments liés à ceux-ci, dont l'azote total et le phosphore total. Selon Rahman et al. (2012) et Deng et al. (2011), l'azote total Kjeldahl est fortement corrélé aux solides totaux ($R^2=0,70$). Selon Blanco-Canqui et al. (2004), la réduction de l'azote organique et du P particulaire est attribuée à la déposition des sédiments dans le système. Les barrières végétales et les pentes ascendantes permettent de réduire la vitesse de l'eau, de promouvoir la déposition des sédiments et ainsi réduire leur transport en dehors du système.

Finalement, peu d'études rapportent l'effet de petites risbermes plantées en saule sur les capacités filtrantes de ces bandes végétatives. Dans notre essai, l'aménagement de cinq baissières plantées en saule a eu un impact important sur la qualité de l'eau en réduisant à la fois le ruissellement et les charges en éléments fertilisants, et dans certains cas les concentrations moyennes pondérées de ces éléments. Par rapport à la bande sans baissière de saule, l'aménagement de cinq petites baissières de saule a réduit le ruissellement de 847 à 465 mm de hauteur d'eau soit de 46 %, mais aussi de 49 % par rapport au saule dans une baissière qui a produit un ruissellement de 917 mm, plus important durant la première période en début d'implantation. Une diminution des concentrations moyennes pondérées a également été enregistrée dans cet aménagement pour la plupart des éléments totaux ruisselés en lien avec les MES, mais les différences étaient davantage marquées par rapport à la bande de saule aménagée avec une seule baissière, car cette dernière a semblé beaucoup moins performante que celle en alpiste et semblable à la bande en saule sans baissière. Le sol demeure à nu sous une plus longue période sous le saule que sous alpiste, même si des précautions ont été prises

en semant un raygrass annuel entre les rangées de saule pour limiter ces effets adverses. Par ailleurs, l'alpiste aurait réduit quelque peu les concentrations de N-NO₃, et de Ca dans le sol et aurait aussi réduit les concentrations de Ca et Na dans les eaux de ruissellement par rapport au saule. Le type de plante utilisée dans les baissières aurait donc un impact sur la qualité des eaux ruisselées. La présence de baissières semblait aussi augmenter la proportion de N-NO₃/N total dissous dans les eaux de ruissellement, quel que soit le type de plante, au détriment de la proportion de N-NH₄/N total dissous, indiquant des conditions plus favorables à la nitrification et au ruissellement des nitrates en présence de baissières : un phénomène qui mériterait d'être suivi et expliqué.

Conclusion

Même si les bandes végétatives n'en étaient qu'à leurs premières années d'implantation et que le mouvement des contaminants dans les eaux de ruissellement n'était pas totalement contrôlé, les résultats obtenus sont à la fois instructifs et prometteurs. Les charges en azote dans l'eau de ruissellement ont été relativement bien contrôlées. Les concentrations moyennes pondérées en N total dissous dépassaient légèrement le critère de qualité de l'eau de 1,5 mg/L, mais celles de N-NO₃ étaient acceptables par rapport à son critère de 10 mg/L. Par contre, les charges en phosphore étaient relativement mal contrôlées, car les concentrations moyennes pondérées en P total (largement sous forme d'orthophosphates) ont excédé de 50 à 150 fois le critère généralement reconnu pour la protection de la vie aquatique dans les eaux de surface. De fait, la biomasse dédiée produite dans les bandes végétatives a peu contribué à l'exportation de phosphore, même si les prélèvements au niveau des parties racinaires et des collets non récoltés n'ont pas été comptabilisés. Toutefois, sur deux ans, l'alpiste roseau a exporté en moyenne deux fois plus de P (15,4 vs 8,3 kg P/ha) que le saule. Des exportations relativement modestes d'environ 70 kg N/ha ont aussi été réalisées avec la récolte des deux cultures dédiées. L'alpiste roseau a exporté en moyenne cinq fois plus de K par rapport au saule (102 vs 20 kg/ha), deux fois plus de P (15,4 vs 8,3 kg P/ha) et près de deux fois plus de Mg (9,3 vs 5,4 kg Mg/ha). Le saule en revanche a exporté près de quatre fois plus de Ca que l'alpiste en moyenne (74 vs 17 kg Ca/ha) et trois fois plus de Zn (1,3 vs 0,4 kg Zn/ha).

Au niveau du sol, l'alpiste a également réduit par rapport au saule, les teneurs en éléments solubles et mobiles comme N-NO₃ et Na-M3 et même en K-M3, P-M3 et Mg-M3 considérés moins mobiles. Les prélèvements et exportations plus importants de ces éléments dans la biomasse de l'alpiste par rapport au saule sont probablement responsables de ces plus faibles teneurs mesurées dans le sol. En revanche, l'implantation de ces cultures dédiées dans l'essai est relativement récente et des cycles additionnels de culture seraient souhaitables pour mieux comptabiliser leur contribution à la réduction des charges en phosphore, même si cette réduction était relativement négligeable pour ce premier cycle.

L'aménagement de baissières a été relativement efficace pour réduire le ruissellement et les charges, mais le type de baissières idéales semble dépendre de la culture dédiée. Ainsi, l'implantation d'une prairie d'alpiste dans une seule grande baissière semblait plus efficace pour réduire le ruissellement et les charges que l'implantation de saule en rangées dans la même baissière. Le sol est demeuré à nu plus longtemps sous le saule au début de l'implantation, et le couvert végétal ainsi que la couverture de résidus étaient différents de l'automne au printemps suivant, soit un chaume dense sous l'alpiste ou un paillis généré par la chute des feuilles de saule. Néanmoins, l'aménagement d'une baissière dans l'alpiste roseau a permis de réduire de 37 % le ruissellement. L'aménagement de cinq petites baissières de saule a quant à lui réduit le

ruissellement de 46 % par rapport à la bande sans baissière. Ces réductions de ruissellement ont eu un impact important sur la qualité de l'eau en réduisant les charges cumulées de MES, N total dissous, N-NH₄, N-NO₃, P total, K, Ca, Mg, Na, B, Cu et Mn. L'aménagement de baissières a également réduit les concentrations moyennes pondérées des MES, N total dissous, N-NH₄, N-NO₃, P total, K, Mg, B, Cu et Mn, mais a également augmenté celles de N-NO₃, Ca et Na sous l'effet des baissières. L'effet des plantes en combinaison avec les baissières pourrait être à l'origine de ces effets. L'alpiste aurait réduit quelque peu les concentrations de N-NO₃ et de Ca dans le sol, et aurait aussi réduit les concentrations de Ca et Na dans les eaux de ruissellement par rapport au saule. La présence de baissières semblait aussi augmenter la proportion de N-NO₃/N total dissous dans les eaux de ruissellement, quel que soit le type de plante, au détriment de la proportion de N-NH₄/N total dissous.

Vu l'installation relativement récente des bandes végétatives et la courte durée de l'essai, il serait pertinent de poursuivre cette recherche sur plusieurs années afin, d'une part, de bien évaluer le potentiel de production et de prélèvement des plantes dédiées et, d'autre part, de mieux comprendre le comportement et le cheminement de l'eau et des nutriments dans les bandes végétatives aménagées avec des baissières et risbermes. Des essais subséquents devraient être réalisés avec des charges additionnelles de contaminants apportées en amont des bandes végétatives filtrantes.

Remerciements

L'équipe tient à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'avancement et à l'accomplissement du projet : Alain Soucy, Michel Lemieux, Michel Noël, Jean-Marie Noël, Alain Gonthier, Guillaume Létourneau, Audrey Ouellet, Andréane Samson, Laetitia Roy. Merci à Xavier Desmeules d'AgriNova et Huguette Martel du MAPAQ pour l'établissement et la régie de la bande enherbée d'alpiste roseau. Cette recherche a été réalisée grâce au soutien financier du Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire dans le cadre d'un concours spécial administré et financé par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, conjointement avec Agriculture et agroalimentaire Canada via son programme Cultivons l'Avenir – Une initiative Fédérale-Provinciale-Territoriale.

Bibliographie

- Agdex 533. 1988. Conseil des Productions végétales du Québec, Méthodes d'Analyses des Sols, des Fumiers et des Végétaux, Détermination du pH à l'eau, Méthode : PH-1.
- Allard F., 2008. Les cultures intensives sur courtes rotations pour la production d'énergie. Agro Énergie. 9 pages.
- Bäckström M., 2003. Grassed swales for stormwater pollution control during rain and snowmelt. *Wat. Sci. And Technology*. 48 (9) : 123-134.
- Bagg, J. 2003. Reed Canary grass. Ontario ministry of agriculture and food. Page internet. http://www.omafra.gov.on.ca/english/crops/facts/info_reed_canarygrass.htm
- Bélanger, P., 2010. Nouvelles cultures, nouvelles sources de litière. Bélanger Agro-consultant inc., CRÉDÉTAO.
- Blanco-Canqui H., Gantzer C.J., Anderson S.H., Alberts E.E. et Thompson A.L., 2004. Grass barrier and vegetative filter strip effectiveness in reducing runoff, sediment, nitrogen and phosphorus loss. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68 : 1670-1678.
- Carter M.R. et Gregorich E.G., 2006. Soil sampling and methods of analysis. 2^e ed. CRC Press, Boca Raton, FL. 898 p.
- Cavanagh, A., M.O. Gasser et M., Labrecque. 2011. Pig slurry as fertilizer on willow plantation. *Biomass Bioenergy*. 35, 4165–4173.
- Côté N. et St-Cyr R., 2012. Évaluation et amélioration de la gestion agroenvironnementale des enclos d'hivernage et des bandes végétatives filtrantes. FPBQ. 54 pages.
- CRAAQ. 2003. Charges fertilisantes des effluents d'élevage. Période transitoire. Valeurs référence. Production bovine. Consultation en ligne : http://www.craaq.qc.ca/documents/files/Effluents_elevage/5-Bovine.pdf
- CRAAQ. 2007a. Caractéristiques des effluents d'élevage. Volumes et concentrations des fertilisants pour les effluents d'élevage en production porcine. 7 p.
- Cruickshank W. H., Robert J.E., Silversides C.R., 2013. L'énergie de la biomasse. L'encyclopédie canadienne. Consultation en ligne: <http://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/biomass-energy/>
- Deletic A., 2006. Performance of grass filters used for stormwater treatment e A field and modelling study. *J. Hydrology*. 317, 261-275.
- Duchemin M. et Hogue R., 2009. Reduction in agricultural non-point source pollution in the first year following establishment of an integrated grass/tree filter strip system in southern Quebec (Canada). *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 131 : 85-97.
- Deng N., Li H. et Shi D., 2011. Preliminary experimental study on effectiveness of vegetative filter strip to pollutants in surface runoff. *Jour. Wat. Res. and Protection*. 3 :222-227.
- FPBQ, 1999. Guide des bonnes pratiques agroenvironnementales pour la gestion des fumiers des bovins de boucherie. Fédération des producteurs de bovins du Québec. MAPAQ, MENVQ. 45 pages.
- Gasser M.O., Laverdière M.R., Lagacé R., Barnett G. et Caron J. 2002. Valorisation du Lisier de Porc dans les Cultures d'Orge et de Canola et Impact sur la Qualité des Eaux de Surface et

- de Drainage. Rapport de recherche présenté à la Fédération des producteurs de porc du Québec et au Conseil canadien du porc. 63 p.
- Godbout, S., Palacios, J. et Brassard, P., 2012. Avenue pour la valorisation des cendres de combustion de la biomasse agricole. Institut de recherche et de Développement en Agroenvironnement. Consultation en ligne : http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Fiche_valo_cendres_biomasseAgr.pdf
- Guidi, W., Voicu, A., H., et Labrecque, M., 2014. Willow short-rotation coppice for treatment of polluted groundwater. *Ecological Engineering* 62: 102– 114
- Isaac, R.A., et Johnson W.C., 1976. Determination of total nitrogen on plant tissues using a block digester. *J. Assoc. Off. Anal. Chem.* 59: 98-100.
- Labrecque M. et Théodorescu T.I., 2005. Field performance and biomass production of 12 willow and poplar clones in short-rotation coppice in southern Québec (Canada). *Biomass and Bioenergy.* 29 : 1-9.
- Labrecque M. et Théodorescu T.I., 2003. High biomass yield achieved by Salix clones in SRIC following two 3-year coppice rotations on abandoned farmland in southern Quebec, Canada. *Biomass and Bioenergy.* 25 : 135-146.
- MDDEP, 2013. Critère de la qualité de l'eau de surface. 3e Édition. Québec. Direction du suivi de l'état de l'environnement. 510 p. et 16 annexes. Consultation en ligne : http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/criteres_eau/criteres.pdf
- Novae, 2013. Vers des entreprises chauffées à la biomasse agricole. Le média du développement durable au Québec. Consultation en ligne : <http://novae.ca/actualites/2012-03/vers-des-entreprises-chauffees-la-biomasse-agricole>
- MAAARO, 2013. Biomasse agricole. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario. Consultation en ligne : <http://www.omafra.gov.on.ca/french/engineer/biomass/>
- Pelletier F., Godbout S. et Joncas R., 2008. Étude environnementale des enclos d'hivernage de vaches-veaux. Analyses complémentaires. Rapport Final. IRDA. 79 pages.
- Peters, J. 2003. Recommended methods of manure analysis, John Peters, Éd. University of Wisconsin, Madison, Wisconsin.
- Rahman A., Rahman S. et Cihacek L., 2012. Efficacy of vegetative filter strip (VFS) installed at the edge of feedlot to minimize solids and nutrients from runoff. *Agric. Eng. Int. : CIGR Journal.* 14 (4) :P 9-21.
- Rushton B.T. 2001. Low-impact parking Lot design reduces runoff and pollutants loads. *J. Wat. Res. Plan. Mgmt. ASCE* 127 (3), 172-179.
- Sanderson M.A., Jones R.M., McFarland M.J., Stroup J., Reed R.L. et Muir J.P., 2001. Nutrient movement and removal in a switchgrass biomass-filter strip system treated with dairy manure. *J. Environ. Qual.* 30 : 210-216.
- SAS Institute Inc (2003). SAS/STAT® User's guide, Version 9.1. Cary, NC.
- Stagge J.H., Davis A.P., Jamil E. et Kim H., 2012. Performance of grass swales for improving water quality from highway runoff. *Water res.* 46 : 6731-6742.

- Vallières D. 2004. Efficacité du mode de travail de sol et des bandes enherbées sur la diminution de la pollution diffuse. Mémoire de Maîtrise (M.Sc.) présenté à la Faculté des études supérieures de l'Université Laval. 100 p.
- Vallières D. 2005. Bande enherbée étroite et travail réduit de sol pour contrôler la pollution diffuse en milieu agricole. Conférence présentée dans le cadre du Colloque en agroenvironnement, le 24 février 2005. CRAAQ.
- Woodbury B.L., Nienaber J.A. et Eigenberg R.A., 2003. Performance of a passive feedlot runoff control and treatments system. ASAE. 46 (6) : 1525-1530.
- Yu S.L., Kuo J.-T., Fassman E.A. et Pan H., 2001. Field test of grassed-swale performance in removing runoff pollution. J. Wat. Res. Planning and Management. 127 (3) : 168-171.

Annexe 1. Analyses des lisiers épandus en amont des bandes végétatives

Date épandage	pH eau	Matière sèche	Cendres	C/N	N Total	N-NH ₄	P	K	Ca	Mg	Al	B	Cu	Fe	Mn	Zn
		%	%		mg/kg											
22-juin-2011	6.5	9.1	18.0	5.0	7506	4311	1787	3323	1761	1002	29.1	5.6	48.7	131.3	34.4	76.2
17-août-2011	7.6	2.8	38.2	1.8	4859	3558	612	2707	539	317	8.6	5.3	22.0	54.5	10.5	25.0
20-sept-2011	7.1	3.2	28.6	2.8	4155	2772	738	2150	672	436	11.4	3.9	27.8	66.2	13.3	32.1
14-juin-2012	n.d.	5.2	28.3	2.8	6498	4387	1279	3050	1171	780	15.0	4.1	50.8	76.7	22.6	53.7
02-août-2012	7.2	2.3	46.7	1.4	4264	3045	465	2545	416	281	4.4	4.6	16.4	25.2	7.9	14.7
09-août-2012	7.4	2.0	52.8	1.1	4102	2979	359	2564	331	201	3.5	4.3	12.7	27.7	5.8	10.6
07-sept-2012	7.2	3.1	29.8	2.5	4363	2762	770	2019	717	484	9.0	6.5	29.0	56.6	14.3	26.6
27-sept-2012	6.8	6.0	23.7	3.8	5846	3728	1133	2681	1192	709	13.8	6.1	43.3	79.5	21.1	41.8
24-oct-2012	6.8	11.9	18.7	6.4	7539	4149	2254	3323	2702	1371	30.4	6.2	78.3	169.0	43.3	86.1
15-juin-2013	7.1	9.3	20.9	4.0	9249	6045	1551	3795	2001	1007	28.7	7.5	46.1	93.7	27.2	67.9

Annexe 2. Calcul des charges annuelles d'azote et de phosphore produites par un élevage de vache-veau de faible densité

Densité d'élevage dans un enclos typique à faible densité : une vache et son veau /150 m² (FPBQ, 1999; Pelletier et al., 2008)

Surface de la parcelle expérimentale en amont de la bande végétative : 4 m x 28,5 m = 114 m²

Nombre d'unités animales par parcelle : $\frac{114 \text{ m}^2/\text{parcelle}}{150 \text{ m}^2/\text{v-v}} = 0,76 \text{ v-v/ parcelle}$

Données du CRAAQ (2003) pour 1 unité animale vache-veau (v-v):

Fumier : 11,4 t fumier/an/v-v

Azote : 4,8 kg N/t fumier

Phosphore : 2,4 kg P₂O₅/t fumier

Durée de l'élevage en enclos du 1^e décembre au 1^e avril = 120 jours (Pelletier et al., 2008);

Charge annuelle en azote par parcelle :

$$0,76 \text{ v-v/parcelle} \times 11,4 \text{ t/an/v-v} \times 4,8 \text{ kg N/t} \times 120 \text{ j}/365 \text{ j} = 13,7 \text{ kg N/an/parcelle}$$

Charge annuelle en phosphore par parcelle :

$$0,76 \text{ v-v/parcelle} \times 11,4 \text{ t/an/v-v} \times 2,4 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{t} \times 120 \text{ j}/365 \text{ j} \div 2,29 \text{ P}_2\text{O}_5/\text{P} = 3,0 \text{ kg P/an/parcelle}$$

Annexe 3. Analyses de sol dans les bandes végétatives filtrantes

Date	Traitement	Position	pH		C/N	C Org.	N Total	N-NH ₄	N-NO ₃	P	K	Ca	Mg	Al	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Na	P/Al	
			pH	SMP																		g/kg
8 août 2011	Alpiste témoin	Amont	6,2	6,9	13,1	14,7	1120	1,8	1,8	20	71	707	77	939	0,22	1,5	205	24,5	1,5	11	2,1	
		Aval	6,3	6,8	13,1	15,0	1147	1,8	1,8	23	72	756	79	916	0,23	1,7	213	24,8	2,4	10	2,5	
		moyenne	6,3	6,9	13,1	14,8	1133	1,8	1,8	21	72	731	78	928	0,23	1,6	209	24,7	2,0	10	2,3	
	Saule sb	Amont	6,2	6,9	12,5	15,1	1210	1,7	2,8	22	86	767	93	952	0,25	1,7	206	33,0	1,6	12	2,3	
		Aval	6,4	7,0	12,6	14,8	1177	1,8	2,5	18	76	765	92	915	0,23	1,6	207	34,4	2,5	12	2,0	
		moyenne	6,3	7,0	12,5	14,9	1193	1,8	2,6	20	81	766	93	934	0,24	1,7	207	33,7	2,1	12	2,1	
	Alpiste/1	Amont	6,3	6,8	13,3	14,2	1080	1,7	2,3	22	97	680	75	1153	0,21	1,7	196	23,4	1,8	6	1,9	
		Aval	6,6	6,8	12,5	10,9	870	1,5	0,7	12	65	690	110	1048	0,20	1,4	178	45,8	1,9	16	1,1	
		moyenne	6,5	6,8	12,9	12,5	975	1,6	1,5	17	81	685	92	1100	0,20	1,5	187	34,6	1,9	11	1,5	
	Saule/1	Amont	6,4	6,8	13,0	15,0	1150	1,6	2,2	20	98	743	86	936	0,22	1,7	211	37,9	2,1	7	2,2	
		Aval	6,5	7,0	12,3	11,8	950	1,5	1,0	15	80	727	96	928	0,21	1,4	215	55,6	1,9	14	1,6	
		moyenne	6,4	6,9	12,7	13,4	1050	1,5	1,6	18	89	735	91	932	0,22	1,6	213	46,8	2,0	10	1,9	
	Saule/5	Amont	6,4	6,7	12,9	14,8	1150	1,7	2,1	22	97	759	93	1029	0,23	1,8	211	29,3	2,0	10	2,2	
		Aval	6,5	6,9	12,3	12,0	977	1,5	1,6	12	70	737	100	973	0,21	1,2	202	40,4	1,6	13	1,2	
		moyenne	6,4	6,8	12,6	13,4	1063	1,6	1,8	17	83	748	96	1001	0,22	1,5	206	34,9	1,8	12	1,7	
	19 nov. 2012	Alpiste témoin	Amont	6,1	6,8	11,6	13,9	1203	2,5	2,9	27	92	656	75	1046	0,23	1,7	339	31,0	2,1	13	2,6
			Aval	6,2	6,8	12,9	15,9	1233	2,9	2,1	30	79	728	82	975	0,26	2,0	327	31,7	2,3	11	3,1
			moyenne	6,1	6,8	12,3	14,9	1218	2,7	2,5	29	85	692	78	1011	0,24	1,9	333	31,4	2,2	12	2,8
Saule sb		Amont	5,9	6,8	10,6	15,3	1447	3,6	11,6	38	155	705	103	953	0,26	2,1	330	41,7	2,0	22	4,0	
		Aval	6,0	6,8	11,2	15,2	1357	1,9	3,4	26	106	716	96	943	0,22	1,8	331	44,2	1,9	14	2,8	
		moyenne	6,0	6,8	10,9	15,2	1402	2,7	7,5	32	131	711	99	948	0,24	1,9	331	43,0	2,0	18	3,4	
Alpiste/1		Amont	6,1	6,8	12,5	13,7	1097	3,3	6,0	22	82	674	89	1070	0,23	1,5	316	42,7	1,8	22	2,0	
		Aval	6,1	6,7	11,9	14,2	1200	2,4	4,0	36	136	636	83	1166	0,27	2,1	376	39,5	3,8	12	3,1	
		moyenne	6,1	6,8	12,2	14,0	1148	2,8	5,0	29	109	655	86	1118	0,25	1,8	346	41,1	2,8	17	2,6	
Saule/1		Amont	6,1	6,9	11,3	13,9	1223	4,7	11,2	29	134	743	112	903	0,28	1,7	320	57,9	1,8	27	3,2	
		Aval	6,0	6,8	11,8	15,4	1300	2,0	5,2	36	151	688	93	973	0,25	1,8	381	50,2	2,9	18	3,7	
		moyenne	6,1	6,8	11,6	14,6	1262	3,3	8,2	33	143	715	103	938	0,27	1,7	351	54,1	2,4	22	3,5	
Saule/5		Amont	6,0	6,7	11,9	14,8	1250	2,9	9,9	39	149	677	100	1071	0,26	1,8	321	40,0	5,3	21	3,6	
		Aval	6,1	6,8	11,4	15,5	1360	2,1	4,6	35	129	720	98	1057	0,26	2,1	300	42,7	3,5	14	3,3	
		moyenne	6,0	6,7	11,6	15,2	1305	2,5	7,2	37	139	699	99	1064	0,26	1,9	310	41,3	4,4	17	3,4	
8 août 2011		moyenne	moyenne	6,4	6,9	12,8	13,8	1083	1,7	1,9	19	81	733	90	979	0,22	1,6	204	34,9	1,9	11	1,9
19 nov. 2012		moyenne	moyenne	6,1	6,8	11,6	14,4	1249	4,1	5,5	31	126	699	98	1013	0,25	1,9	334	48,7	3,3	19	3,

Annexe 4. Analyses de l'eau du sol (lysimètres à succion)

Date	Traitements	N total	N-	N-	P total	P	K	Ca	Mg	Al	B	Fe	Mn	Cu	Zn	Na
		dissous	NH ₄	NO ₃	dissous	réactif										
		mg/L			ug/L		mg/L									
31-août-11	Alpiste témoin	0,71	0,10	0,06	11,3	8,00	2,3	31	6,8	0,02	0,03	0,03	0,71	0,01	0,02	18,7
	Alpiste/1	0,82	0,18	0,03	10,8	5,67	2,9	34	8,5	0,03	0,04	0,10	2,19	0,01	0,01	11,2
	Saule sb	0,79	0,14	0,04	15,7	10,83	2,6	29	8,5	0,02	0,04	0,19	1,01	0,01	0,01	12,8
	Saule/1	0,97	0,41	0,09	34,2	29,17	1,9	32	8,5	0,02	0,03	0,02	1,24	0,01	0,02	9,2
	Saule/5	0,83	0,20	0,07	17,8	13,33	3,3	36	11,4	0,01	0,04	0,02	1,39	0,01	0,02	9,9
09-sept-11	Alpiste témoin	0,80	0,16	0,05	12,0	8,33	2,3	36	8,0	0,02	0,03	0,11	1,32	0,01	0,02	16,5
	Alpiste/1	0,84	0,23	0,02	9,5	5,67	3,1	38	9,6	0,02	0,04	0,11	2,66	0,01	0,01	9,7
	Saule sb	0,82	0,20	0,02	8,7	5,33	2,7	34	9,7	0,02	0,03	0,24	1,60	0,01	0,01	11,9
	Saule/1	0,83	0,27	0,04	15,3	12,33	2,0	37	9,4	0,02	0,03	0,02	1,56	0,01	0,01	8,4
	Saule/5	0,81	0,24	0,02	11,8	8,00	3,5	40	12,5	0,01	0,04	0,03	1,89	0,01	0,01	9,0
20-oct-11	Alpiste témoin	0,46	0,08	0,04	10,3	6,67	1,5	29	6,7	0,02	0,02	0,01	0,55	0,01	0,02	9,4
	Alpiste/1	0,52	0,19	0,01	10,7	6,00	2,1	35	9,2	0,03	0,03	0,01	2,44	0,01	0,01	7,5
	Saule sb	0,48	0,09	0,06	10,5	6,33	1,9	29	8,6	0,01	0,02	0,01	0,82	0,01	0,01	9,2
	Saule/1	0,44	0,12	0,03	12,5	8,17	1,4	32	8,7	0,02	0,02	0,01	1,09	0,01	0,01	7,1
	Saule/5	0,52	0,19	0,02	12,0	6,83	2,5	32	10,6	0,01	0,03	0,01	1,72	0,01	0,01	7,0
06-juin-12	Alpiste témoin	0,93	0,26	0,20	10,5	4,00	2,3	26	5,8	0,02	0,03	1,26	1,80	0,01	0,02	5,7
	Alpiste/1	0,89	0,24	0,22	9,3	3,17	2,8	35	7,7	0,02	0,04	0,28	2,18	0,01	0,02	5,5
	Saule sb	0,95	0,43	0,15	12,7	6,67	2,3	33	9,0	0,02	0,04	0,13	3,47	0,01	0,01	6,7
	Saule/1	1,43	0,90	0,08	12,2	4,17	2,1	37	8,0	0,01	0,03	0,58	3,63	0,01	0,01	5,4
	Saule/5	1,36	0,60	0,29	11,5	3,33	3,4	34	9,0	0,01	0,03	0,51	3,19	0,01	0,01	6,1
05-juil-12	Alpiste témoin	0,73	0,08	0,03	41,5	23,50	2,8	18	3,9	0,02	0,04	0,08	0,56	0,02	0,02	5,8
	Alpiste/1	0,76	0,09	0,17	13,5	2,00	2,0	24	5,6	0,01	0,04	0,09	1,08	0,01	0,03	4,2
	Saule sb	0,93	0,17	0,17	28,2	11,83	2,2	19	5,2	0,01	0,04	0,14	0,81	0,01	0,02	6,4
	Saule/1	0,82	0,28	0,01	22,8	7,00	1,7	21	4,3	0,01	0,03	0,46	1,05	0,01	0,02	3,9
	Saule/5	0,96	0,26	0,08	34,5	12,17	3,1	20	5,5	0,01	0,04	0,66	1,24	0,01	0,01	5,9
Moyenne	Alpiste témoin	0,73	0,14	0,08	17,1	10,10	2,2	28	6,3	0,02	0,03	0,30	0,01	0,02	0,99	11,2
	Alpiste/1	0,77	0,19	0,09	10,8	4,50	2,6	33	8,1	0,02	0,04	0,12	0,01	0,02	2,11	7,6
	Saule sb	0,79	0,21	0,09	15,1	8,20	2,3	29	8,2	0,01	0,03	0,14	0,01	0,01	1,54	9,4
	Saule/1	0,90	0,40	0,05	19,4	12,17	1,8	32	7,8	0,02	0,03	0,22	0,01	0,01	1,71	6,8
	Saule/5	0,90	0,30	0,10	17,5	8,73	3,2	32	9,8	0,01	0,04	0,25	0,01	0,01	1,89	7,6

Annexe 5. Analyses de l'eau de ruissellement

Tableau 12. Dates et fréquence d'échantillonnage par période d'échantillonnage.

Période d'échantillonnage	Date d'échantillonnage	nb d'échantillonnages
1	29-août-11	1
	06-sept-11	2
	27-sept-11	3
	07-oct-11	4
	17-oct-11	5
	29-nov-11	6
	07-déc-11	7
	21-déc-11	8
	15-mars-12	9
	19-mars-12	10
	22-mars-12	11
	28-mars-12	12
Total 1		12
2	25-avr-12	13
	17-mai-12	14
	31-mai-12	15
	06-juin-12	16
	03-juil-12	17
	18-oct-12	18
	24-oct-12	19
	17-janv-13	20
	04-févr-13	21
Total 2		9
3	02-avr-13	22
	08-avr-13	23
	18-avr-13	24
	24-mai-13	25
	27-mai-13	26
	19-juin-13	27
03-juil-13	28	
Total 3		7
Nombre d'échantillonnages total		28

Tableau 13. Charges en éléments nutritifs cumulées dans les eaux de ruissellement par traitement et par période d'échantillonnage.

Traitement	Période	Ruiss.	MES	N tot.			P tot.			K	Ca	Mg	Na	Al	B	Cu	Fe	Zn	Mn
		mm		diss.	N-NH ₄	N-NO ₃	P total	diss.	ortho										
Alpiste témoin	1	474	949	146	28	70	78	76	72	462	491	151	244	2.3	1.3	1.2	4.2	28.3	0.3
	2	300	1164	500	216	185	284	273	266	706	620	252	338	3.0	1.5	2.0	6.8	27.8	1.9
	3	211	575	431	263	108	313	315	304	561	468	241	263	2.2	1.4	1.4	4.7	15.3	0.9
	Total	986	2687	1077	507	363	675	665	643	1730	1578	644	844	7.5	4.2	4.6	15.7	71.4	3.1
Alpiste/1	1	304	461	54	15	19	27	26	25	204	363	115	166	1.8	0.6	0.8	3.7	20.4	0.4
	2	220	474	262	43	178	61	57	54	290	495	160	237	2.5	0.9	0.9	4.5	33.7	0.8
	3	99	170	161	82	51	72	71	68	225	250	94	132	1.2	0.5	0.5	2.3	11.3	0.4
	Total	624	1105	477	140	247	161	154	147	719	1107	369	535	5.5	2.0	2.1	10.5	65.3	1.6
Saufe sb	1	420	786	101	15	49	59	58	56	367	429	139	190	2.3	1.1	1.1	3.9	18.1	0.4
	2	280	1133	454	192	173	258	249	243	759	553	240	314	2.7	1.5	2.1	6.3	17.2	1.4
	3	147	516	240	121	69	180	179	172	400	325	177	190	1.7	1.1	1.2	3.6	7.8	0.5
	Total	847	2435	795	329	291	497	486	471	1526	1306	556	694	6.7	3.6	4.3	13.8	43.1	2.2
Saufe/1	1	549	1216	194	60	67	105	102	97	619	785	250	381	2.5	1.6	1.7	6.8	46.1	1.1
	2	234	505	403	124	215	114	110	106	575	616	216	322	2.2	1.1	1.3	5.9	31.3	1.8
	3	134	439	285	113	114	132	130	124	473	380	169	214	1.8	1.0	1.0	3.7	13.4	0.7
	Total	917	2160	882	298	396	351	341	326	1666	1781	635	916	6.5	3.8	4.0	16.4	90.9	3.6
Saufe/5	1	267	427	83	33	25	43	42	40	265	401	114	190	2.0	0.7	0.7	3.5	16.7	0.7
	2	120	222	134	18	102	27	25	24	163	276	94	129	1.4	0.4	0.4	2.4	14.3	0.4
	3	78	203	126	57	45	59	58	55	217	211	86	116	0.8	0.5	0.5	1.9	8.4	0.4
	Total	465	852	343	108	172	128	125	118	645	887	295	435	4.1	1.6	1.5	7.7	39.4	1.6
Alpiste témoin +Alpiste/1	1	389	705	100	21	44	53	51	48	333	427	133	205	2.1	1.0	1.0	4.0	24.3	0.3
	2	260	819	381	130	181	172	165	160	498	557	206	287	2.8	1.2	1.4	5.7	30.7	1.3
	3	155	373	296	172	79	193	193	186	393	359	168	198	1.7	0.9	0.9	3.5	13.3	0.7
	Total	805	1896	777	323	305	418	409	395	1224	1343	507	690	6.5	3.1	3.3	13.1	68.3	2.3
Saufe sb +Saufe/1	1	412	810	126	36	47	69	67	64	417	538	167	253	2.3	1.1	1.1	4.7	27.0	0.7
	2	211	620	330	112	163	133	128	124	499	482	184	255	2.1	1.0	1.2	4.9	20.9	1.2
	3	119	386	217	97	76	123	122	117	364	305	144	173	1.4	0.9	0.9	3.1	9.9	0.6
	Total	743	1816	673	245	286	325	317	305	1279	1325	495	682	5.8	3.0	3.3	12.7	57.8	2.5
Saufe/1 +Saufe/5	1	408	821	139	47	46	74	72	68	442	593	182	285	2.2	1.2	1.2	5.2	31.4	0.9
	2	177	364	268	71	158	70	67	65	369	446	155	226	1.8	0.7	0.8	4.1	22.8	1.1
	3	106	321	205	85	79	95	94	89	345	295	128	165	1.3	0.8	0.7	2.8	10.9	0.6
	Total	691	1506	612	203	284	240	233	222	1156	1334	465	676	5.3	2.7	2.7	12.1	65.1	2.6

Tableau 14. Concentrations moyennes pondérées en éléments nutritifs dans les eaux de ruissellement par traitement et par période d'échantillonnage.

Traitement	Période	Ruiss.	MES	N tot. diss.			P tot. diss.			P ortho									
		mm		mg/L			µg/L			mg/L									
				N-NH ₄	N-NO ₃	P total	K	Ca	Mg	Na	Al	B	Cu	Fe	Zn	Mn			
Alpiste témoin	1	474	12,5	1,9	0,4	0,9	1033	1006	952	6,1	6,5	2,0	3,2	0,03	0,02	0,02	0,06	0,37	0,004
	2	300	24,2	10,4	4,5	3,9	5905	5684	5545	14,7	12,9	5,3	7,0	0,06	0,03	0,04	0,14	0,58	0,039
	3	211	17,0	12,8	7,8	3,2	9251	9321	8998	16,6	13,8	7,1	7,8	0,06	0,04	0,04	0,14	0,45	0,026
	Total	986	17,0	6,8	3,2	2,3	4280	4215	4077	11,0	10,0	4,1	5,4	0,05	0,03	0,03	0,10	0,45	0,019
Alpiste/1	1	304	9,5	1,1	0,3	0,4	562	532	507	4,2	7,5	2,4	3,4	0,04	0,01	0,02	0,08	0,42	0,008
	2	220	13,4	7,4	1,2	5,0	1734	1609	1543	8,2	14,0	4,5	6,7	0,07	0,02	0,02	0,13	0,95	0,022
	3	99	10,7	10,1	5,1	3,2	4554	4476	4250	14,1	15,7	5,9	8,3	0,08	0,03	0,03	0,15	0,71	0,026
	Total	624	11,1	4,8	1,4	2,5	1611	1540	1469	7,2	11,1	3,7	5,4	0,06	0,02	0,02	0,11	0,65	0,016
Saufe sb	1	420	11,7	1,5	0,2	0,7	886	870	831	5,5	6,4	2,1	2,8	0,03	0,02	0,02	0,06	0,27	0,005
	2	280	24,6	9,9	4,2	3,7	5588	5398	5278	16,5	12,0	5,2	6,8	0,06	0,03	0,04	0,14	0,37	0,030
	3	147	21,9	10,2	5,2	2,9	7644	7595	7324	17,0	13,8	7,5	8,1	0,07	0,05	0,05	0,15	0,33	0,022
	Total	847	17,8	5,8	2,4	2,1	3633	3553	3446	11,2	9,5	4,1	5,1	0,05	0,03	0,03	0,10	0,31	0,016
Saufe/1	1	549	13,8	2,2	0,7	0,8	1199	1156	1104	7,0	8,9	2,8	4,3	0,03	0,02	0,02	0,08	0,53	0,013
	2	234	13,5	10,8	3,3	5,7	3048	2930	2815	15,3	16,4	5,8	8,6	0,06	0,03	0,03	0,16	0,84	0,047
	3	134	20,5	13,3	5,3	5,3	6160	6065	5789	22,1	17,8	7,9	10,0	0,08	0,05	0,05	0,17	0,63	0,035
	Total	917	14,7	6,0	2,0	2,7	2394	2325	2224	11,4	12,1	4,3	6,2	0,04	0,03	0,03	0,11	0,62	0,025
Saufe/5	1	267	10,0	2,0	0,8	0,6	994	978	931	6,2	9,4	2,7	4,4	0,05	0,02	0,02	0,08	0,39	0,017
	2	120	11,6	7,0	1,0	5,3	1385	1290	1236	8,5	14,4	4,9	6,8	0,07	0,02	0,02	0,12	0,75	0,022
	3	78	16,4	10,1	4,6	3,6	4738	4675	4412	17,5	16,9	7,0	9,3	0,07	0,04	0,04	0,15	0,67	0,033
	Total	465	11,5	4,6	1,5	2,3	1721	1677	1592	8,7	11,9	4,0	5,9	0,06	0,02	0,02	0,10	0,53	0,021
Alpiste témoin +Alpiste/1	1	389	11,3	1,6	0,3	0,7	848	820	778	5,3	6,9	2,1	3,3	0,03	0,02	0,02	0,06	0,39	0,006
	2	260	19,6	9,1	3,1	4,4	4140	3959	3851	12,0	13,4	5,0	6,9	0,07	0,03	0,03	0,14	0,74	0,032
	3	155	15,0	11,9	6,9	3,2	7749	7772	7479	15,8	14,4	6,7	8,0	0,07	0,04	0,04	0,14	0,53	0,026
	Total	805	14,7	6,0	2,5	2,4	3245	3178	3066	9,5	10,4	3,9	5,4	0,05	0,02	0,03	0,10	0,53	0,018
Saufe sb +Saufe/1 +Saufe/5	1	412	12,3	1,9	0,5	0,7	1048	1021	974	6,3	8,2	2,5	3,8	0,03	0,02	0,02	0,07	0,41	0,011
	2	211	18,1	9,6	3,3	4,8	3878	3732	3626	14,6	14,1	5,4	7,4	0,06	0,03	0,04	0,14	0,61	0,035
	3	119	20,2	11,3	5,1	4,0	6461	6392	6120	19,0	16,0	7,5	9,1	0,07	0,05	0,05	0,16	0,52	0,029
	Total	743	15,2	5,6	2,1	2,4	2728	2660	2560	10,7	11,1	4,2	5,7	0,05	0,02	0,03	0,11	0,48	0,021
Saufe/1 +Saufe/5	1	408	12,6	2,1	0,7	0,7	1132	1098	1048	6,8	9,1	2,8	4,4	0,03	0,02	0,02	0,08	0,48	0,014
	2	177	12,8	9,5	2,5	5,6	2486	2376	2281	13,0	15,8	5,5	8,0	0,06	0,03	0,03	0,15	0,81	0,039
	3	106	19,0	12,1	5,0	4,7	5638	5554	5283	20,4	17,5	7,6	9,8	0,08	0,05	0,04	0,17	0,65	0,034
	Total	691	13,6	5,5	1,8	2,6	2168	2107	2011	10,5	12,1	4,2	6,1	0,05	0,02	0,02	0,11	0,59	0,024