

# Évaluation des effets combinés des principales pratiques de gestion bénéfiques (PGB)

Revue de littérature  
et schéma décisionnel pour la mise en œuvre de PGB

Document rédigé dans le cadre de l'INENA  
Initiative nationale d'élaboration de normes agroenvironnementales



Stéphane Martel  
Sandrine Seydoux  
Aubert Michaud  
Isabelle Beaudin

31 mars 2006



## AVANT-PROPOS

Cette étude a été réalisée dans le contexte l'Initiative nationale d'élaboration des normes agroenvironnementales (INENA) du Cadre stratégique pour l'agriculture au Canada (CSA).

L'INENA vise à établir des **seuils de référence** pour les trois grandes composantes du milieu, soit le sol, l'eau et l'air ainsi que pour la diversité de la faune et de la flore qui s'y développent. Pour chaque paramètre retenu comme caractéristique de l'état du milieu (ex. : la concentration en phosphore dans les eaux de surface), il s'agit de définir deux seuils de qualité :

- une **norme idéale**, qui garantit le maintien parfait et à long terme de la santé de l'écosystème dans sa totalité;
- une **norme « atteignable »** (qui dans les régions à vocation agricole représente le niveau de qualité atteignable grâce à la mise en œuvre systématique et généralisée de pratiques de gestion bénéfiques (**PGB**), proposées aux agriculteurs pour mieux gérer les impacts de leurs activités sur l'écosystème).<sup>1</sup>

Cette recherche bibliographique sur l'effet des combinaisons de PGB est basée sur près de 280 études et articles scientifiques ou vulgarisés, nationaux ou internationaux, ainsi que sur des entrevues avec plusieurs spécialistes. Le présent document ne prétend pas être exhaustif, mais fait le point sur les principales PGB interdépendantes, ainsi que sur les effets de leurs actions combinées. Il tente notamment de mieux cerner les notions de **synergie** et **d'antagonisme** appliquées aux combinaisons de PGB. Il propose enfin un schéma décisionnel pour guider le choix de combinaisons de PGB.

Dans l'évaluation des PGB et de leur association<sup>2</sup>, il est par ailleurs très important de garder à l'esprit l'impact des **nombreux facteurs biophysiques et climatiques** (eux-mêmes en interaction entre eux *et* avec les PGB). La prudence et le jugement professionnel sont donc toujours de rigueur dans l'interprétation des résultats obtenus.

---

<sup>1</sup> Un seuil « réaliste » pourrait également être établi pour refléter le taux d'adoption « réaliste » des PGB par les producteurs, compte tenu des contraintes technico-économiques existantes.

<sup>2</sup> Et par conséquent pour toute recommandation visant leur mise en œuvre ou l'établissement de seuils en fonction de leur application.

## **REMERCIEMENTS**

Plusieurs personnes ont collaboré à la réalisation de ce document. Les auteurs tiennent à remercier, pour leur expertise, mesdames Anabel Avery (Canards Illimités), Caroline Côté (IRDA) et Maryse Leblanc (IRDA), ainsi que messieurs Denis Côté (IRDA), Raymond-Marie Duchesne (MAPAQ), Marcel Giroux (IRDA) et Stéphane Godbout (IRDA). Leurs remerciements s'adressent également à madame Julie Deslandes (IRDA) et à messieurs Mohamed Amrani (Environnement Canada) et Serge Villeneuve (Environnement Canada) pour leur lecture critique.

# TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos i

Remerciements ii

Liste des figures v

Liste des tableaux vi

INTRODUCTION.....	1
1 Méthodologie .....	2
1.1 L'agroécosystème .....	2
1.2 Les PGB .....	5
1.3 Les combinaisons de PGB .....	6
2 Effets des PGB vis-à-vis des enjeux environnementaux .....	9
2.1 PGB du travail du sol.....	9
2.1.1 Qualité des sols .....	9
2.1.2 Qualité de l'eau .....	12
2.1.3 Qualité de l'air .....	18
2.1.4 Biodiversité.....	19
2.2 PGB du couvert végétal .....	19
2.2.1 Qualité des sols .....	20
2.2.2 Qualité de l'eau .....	20
2.2.3 Biodiversité.....	24
2.3 PGB de la fertilisation.....	26
2.3.1 Qualité des sols .....	26
2.3.2 Qualité de l'eau .....	27
2.3.3 Qualité de l'air .....	30
2.4 PGB de la protection des cultures.....	31
2.4.1 Qualité de l'eau .....	31
2.4.2 Biodiversité.....	32
2.5 PGB des élevages et des effluents .....	33
2.5.1 Qualité de l'eau .....	33
2.5.2 Qualité de l'air .....	36
2.5.3 Biodiversité.....	37
2.6 PGB de l'aménagement du parcellaire .....	38
2.6.1 Qualité de l'eau .....	38
2.6.2 Qualité de l'air .....	42
2.6.3 Biodiversité.....	42

3	Combinaisons de PGB .....	45
3.1	PGB du travail du sol .....	45
3.1.1	Couvert végétal .....	45
3.1.2	Fertilisation .....	47
3.1.3	Protection des cultures .....	50
3.1.4	Aménagement du parcellaire .....	52
3.2	PGB du couvert végétal .....	55
3.2.1	Fertilisation .....	55
3.2.2	Protection des cultures .....	57
3.2.3	Élevages et effluents .....	63
3.2.4	Aménagement du parcellaire .....	64
3.3	PGB de la fertilisation.....	66
3.3.1	Protection des cultures .....	66
3.3.2	Élevages et effluents .....	70
3.3.3	Aménagements du parcellaire.....	70
3.4	PGB de la protection des cultures.....	73
3.4.1	Élevages et effluents .....	73
3.4.2	Aménagements du parcellaire.....	75
3.5	PGB des élevages et des effluents .....	75
3.5.1	Aménagements du parcellaire.....	75
3.6	Les PGB et l’agriculture de précision.....	78
4	Synthèse des effets de combinaison de PGB et schéma décisionnel .....	81
4.1	Synthèse des effets sur le milieu des combinaisons de PGB .....	81
4.2	Schéma décisionnel en vue de l’implantation de combinaisons de PGB .....	86
	CONCLUSION .....	97
	RÉFÉRENCES.....	97
	Annexes .....	119

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Éléments en interaction au sein de l'agroécosystème .....	3
Figure 2 - Actions combinées de 2 PGB et gain environnemental théorique.....	7
Figure 3 - Carbone de la biomasse microbienne dans une rotation maïs-soya : (A) labour <i>vs</i> semis direct et (B) labour <i>vs</i> culture sur billons.....	10
Figure 4 - Distribution saisonnière et verticale des spores de mycorhizes dans une culture de maïs pour 4 stades de croissance dans des parcelles en semis direct (NT) et en travail conventionnel (CT).....	11
Figure 5 - Pertes de sol et de phosphore total (A) et ruissellement (B) pour 5 parcelles, d'érodabilités variées et labourées à l'automne ou au printemps.....	18
Figure 6 - Variation de l'indice moyen de diversité Shannon-Weiner pour l'émergence des plantes nuisibles en juillet de 1994 à 1999, selon le travail du sol et la longueur des rotations.....	24
Figure 7 - Variation du nombre moyen de semences de plantes nuisibles dans la banque d'adventices pour le semis direct (A) ainsi que pour le chisel et le labour (B), avec diverses rotations.....	25
Figure 8 - Variations de la densité des adventices levées, selon le travail du sol et la longueur des rotations .....	26
Figure 9 - Synergie de plusieurs tactiques (augmentation de la densité des semis, application localisée d'engrais, implantation tardive des cultures) sur la réduction de la biomasse des plantes nuisibles dans le maïs et le tournesol .....	32
Figure 10 - Distribution spatiale de l'ombre de deux pâturages .....	35
Figure 11 - Indice de diversité Shannon (H) des sols pour deux modes de travail du sol (réduit vs conventionnel), à différentes périodes de croissance du blé et selon trois doses d'engrais azoté.....	48
Figure 12a - Pertes annuelles d'atrazine dans le ruissellement selon la récurrence des précipitations, pour quatre combinaisons d'application de l'atrazine et de travail du sol.....	51
Figure 12b - Pertes annuelles d'atrazine dans le ruissellement selon la récurrence des précipitations, pour 4 combinaisons d'application de l'atrazine et de travail du sol.....	52
Figure 14 - Approche multi-tactique affectant la dynamique des populations de plantes nuisibles annuelles.....	59
Figure 15a- Prédiction de l'émergence de l'amarante hybride en fonction de (A) la biomasse des résidus de vesce velue pour divers taux de métolachlore et (B) la concentration en métolachlore pour divers taux de résidus.....	61
Figure 15b- Prédiction de l'émergence de l'amarante hybride en fonction de (A) la biomasse des résidus de vesce velue pour divers taux de métolachlore et (B) la concentration en métolachlore pour divers taux de résidus.....	62
Figure 13 - Effets des pratiques culturales sur la biodiversité des ennemis naturels et sur l'abondance des insectes ravageurs .....	63
Figure 16 - Synergie potentielle entre la gestion optimale de la fertilisation et la gestion intégrée des ennemis des cultures .....	67
Figure 17 - Effets de la date d'ensemencement, de la densité de semis, de la période de fertilisation et de la dose d'herbicide sur les semences de mauvaises herbes dans le sol après les 4 ans de l'étude à Lethbridge et Scott .....	69
Figure 18 - Cartographie des aménagements réalisés sur le bassin versant du ruisseau au Castor.....	71
Figure 19 - Schéma décisionnel .....	87

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Priorités relatives à chacun des enjeux agroenvironnementaux .....	4
Tableau 2 - Les principales PGB par catégories .....	5
Tableau 3a- Effets d'interaction potentiels des catégories de PGB vis-à-vis de la qualité des sols.....	8
Tableau 3b- Effets d'interaction potentiels des catégories de PGB vis-à-vis de la qualité de l'eau.....	8
Tableau 3c- Effets d'interaction potentiels des catégories de PGB vis-à-vis de la qualité de l'air.....	8
Tableau 3d- Effets d'interaction potentiels des catégories de PGB vis-à-vis de la biodiversité.....	8
Tableau 4 - Réduction de l'érosion hydrique selon les types de travail du sol et de résidus.....	11
Tableau 5 - Comparaison des pertes de nutriments sous forme soluble et particulaire selon trois systèmes de travail du sol .....	16
Tableau 6 - Pertes moyennes de P suivant la quantité de résidus sur un sol Neubois .....	17
Tableau 7 - Impacts potentiellement négatifs et positifs pour divers scénarios de rotation .....	22
Tableau 8 - Risque environnemental lié à l'épandage sur cultures annuelles .....	29
Tableau 9 - Risque environnemental lié à l'épandage sur des cultures pérennes.....	29
Tableau 10 - Impact moyen des différentes pratiques alimentaires sur le pourcentage de réduction de l'azote et du phosphore dans le lisier de porcs .....	33
Tableau 11 - Distribution des patrons spatiaux d'ombre.....	34
Tableau 12 - Débit, concentration et charge de phosphore réactif dissous (PRD), de phosphore total (PT), de matière en suspensions (MES) et d' <i>E.Coli</i> .....	35
Tableau 13 - Efficacité des bandes riveraines à réduire la pollution diffuse sous pluies naturelles.....	40
Tableau 14 - Abondance et diversité des communautés de micro mammifères et d'herpétofaune selon le type de bande riveraine.....	43
Tableau 15 - Impacts d'un paillis (résidus de seigle), du travail du sol et d'un herbicide (diphénamide) sur la répression des adventices dans une culture de tabac.....	51
Tableau 16 - Comparaison de la qualité de l'eau avant et après l'implantation de PGB culturales, structurales ou en combinaison de 1996 à 1999 .....	53
Tableau 17 - Expressions des symptômes de la fusariose et de la gale argentée à la surface des tubercules de pommes de terre selon 2 types de rotation et 2 modes de travail du sol (conventionnel vs réduit) .....	58
Tableau 18 - Effets de la date d'ensemencement, de la densité de semis, de la période de fertilisation et de la dose d'herbicide sur la biomasse des plantes nuisibles (g/m <sup>2</sup> ) dans une culture de blé.....	68
Tableau 19 - Effets de la date d'ensemencement, de la densité de semis, de la période de fertilisation et de la dose d'herbicide sur la biomasse des plantes nuisibles (g/m <sup>2</sup> ) dans une culture de canola.....	68
Tableau 20 - Moyennes des concentrations en phosphore total, en phosphore réactif soluble, en matières en suspension et en calcium en solution.....	72
Tableau 21 - Pourcentage de semences de plantes nuisibles viables après une immersion dans une lagune ou une fosse à lisier.....	74
Tableau 22a- Effets sur la qualité des sols .....	82
Tableau 22b- Effets sur la qualité de l'eau.....	83
Tableau 22c- Effets sur la qualité de l'air.....	84
Tableau 22d- Effets sur la biodiversité.....	84
Tableau 23 - Facteurs de risques à considérer dans l'analyse des effets d'une combinaison de PGB sur la qualité de l'eau .....	93
Tableau 24 - Mesures de mitigations à envisager dans la prévention des effets négatifs d'une combinaison de PGB à l'égard de la qualité de l'eau.....	94



## INTRODUCTION

Les pratiques de gestion bénéfiques (PGB) sont des pratiques de gestion agricoles économiquement viables qui assurent le maintien ou l'amélioration de la qualité des sols, de l'eau et de l'air, ainsi que de la biodiversité. Dans le cadre du Programme national de gérance agroenvironnementale (PNGA), près de 70 PGB (rassemblées en 30 groupes) sont proposées aux producteurs soucieux de conservation de l'environnement.

Quand ces PGB sont compatibles sur le terrain, quels sont les effets de leur application combinée? Les PGB agissent-elles en synergie ou peuvent-elles être antagonistes vis-à-vis de certains paramètres du milieu? Telles sont les principales questions que tente de cerner cette étude bibliographique.

La première partie du document expose la méthodologie adoptée. La seconde présente les effets des principales PGB retenues vis-à-vis de quatre enjeux environnementaux, soit : la qualité des sols, la qualité de l'eau, la qualité de l'air et la biodiversité. La troisième partie, traite des combinaisons de diverses PGB interdépendantes et de leurs effets conjoints sur l'écosystème<sup>3</sup>. Cette partie inclut également une brève discussion d'un concept émergeant : la conservation de précision. Dans cette branche de l'agriculture de précision, c'est la mise en place des PGB qui est optimisée en fonction de la variabilité spatiale des propriétés du parcellaire. La troisième partie, enfin, présente une synthèse des effets de combinaison de PGB et propose un schéma décisionnel pour guider le choix et la mise en œuvre de PGB.

---

<sup>3</sup> Des résumés de section et des tableaux de synthèse permettent un accès rapide à l'information.

# 1 MÉTHODOLOGIE

La démarche adoptée dans cette étude s'inspire des travaux de MacDonald (2000, cité dans EPA 2005) et de Cooper (2003). Elle s'appuie sur une **approche systémique de l'agroécosystème**, ainsi que sur le **jugement professionnel**, tout au long des étapes suivantes :

- Identification des **éléments de l'agroécosystème à étudier** (section 1.1)
- **Regroupement des PGB** en catégories et **sélection** des PGB dont les effets sur les enjeux environnementaux ciblés sont susceptibles d'être dépendants quand les PGB sont combinées (section 1.2);
- Identification des **synergies ou antagonismes potentiels** entre catégories de PGB sur la qualité du milieu (sections 1.3);
- Description, par catégorie de PGB, des **effets individuels les plus significatifs** des PGB retenues sur les enjeux environnementaux ciblés (chapitre 2);
- Présentation des **effets combinés** des principales PGB et formulation de recommandations en cas de risque pour le milieu (chapitre 3);
- Élaboration d'un schéma décisionnel pour guider le choix et la mise en œuvre des PGB (chapitre 4).

## 1.1 L'agroécosystème

Les PGB font partie des techniques de production agricoles qui sont elles-mêmes des composantes majeures de l'agroécosystème<sup>4</sup>. L'étude des impacts de leurs actions combinées sur l'environnement appelle d'emblée une approche systémique, qui tient compte des nombreux éléments du système considéré et de leurs interactions.

La figure 1 illustre les différents éléments de l'agroécosystème appréhendés dans ce document. Ce sont d'une part les composantes du système de production (ou catégories de pratiques) auxquelles se rattachent les **PGB** (voir tableau 2) et d'autre part les composantes de l'écosystème (le sol, l'eau, l'air, la faune et la flore). Les PGB de chaque composante du système de production interagissent entre elles (au sein d'une même catégorie ou entre catégories) comme avec les autres pratiques agricoles<sup>5</sup> et affectent les composantes du milieu. Inversement, les caractéristiques du milieu - en lien avec les facteurs climatiques - interagissent entre elles et influencent grandement les modalités d'application des PGB et leur efficacité.

La santé de l'écosystème est envisagée selon les **quatre enjeux** garants d'une agriculture durable, soit la qualité des sols, la qualité de l'eau, la qualité de l'air et la biodiversité.

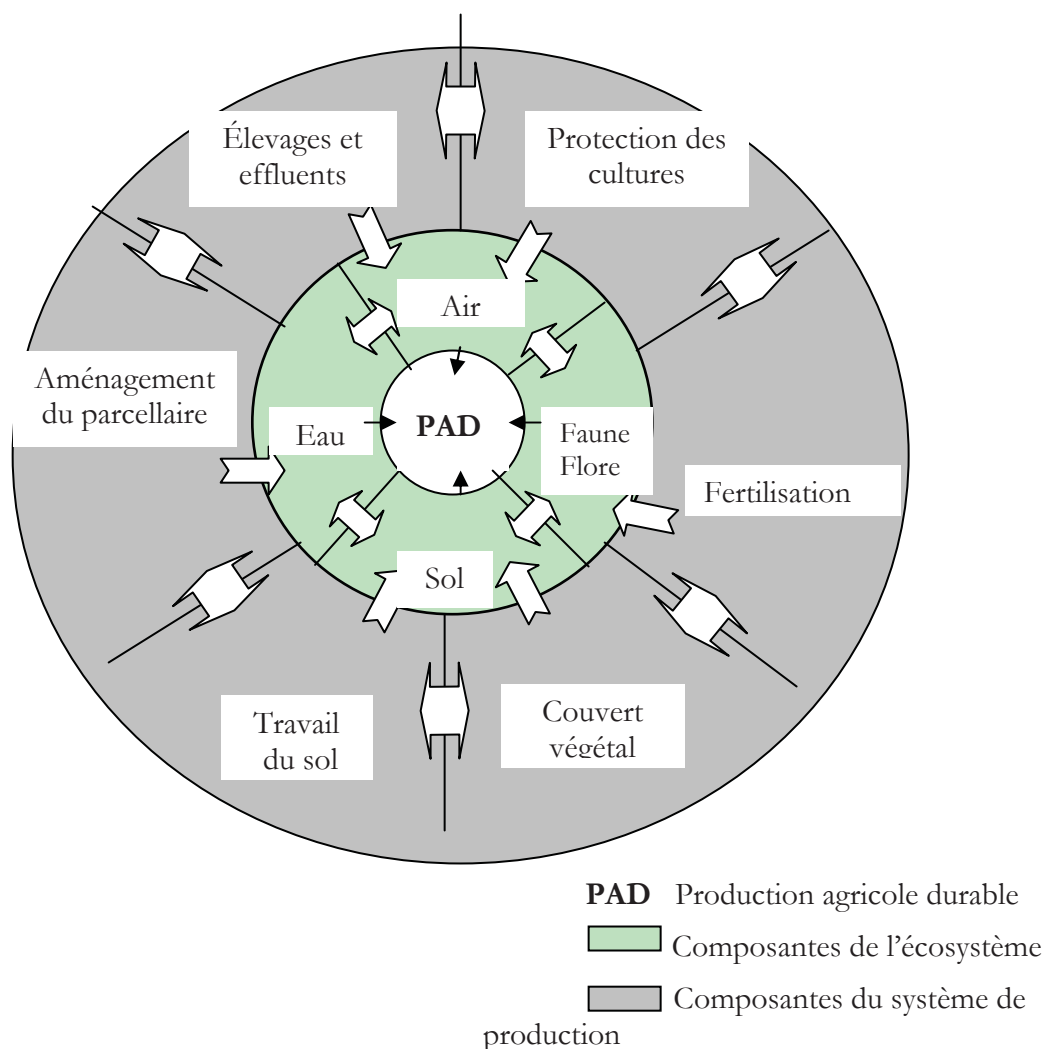
---

<sup>4</sup> L'agroécosystème est par définition l'écosystème dans lequel prennent place des activités de production agricole (Grand dictionnaire terminologique, Office québécois de la langue française, 2005).

<sup>5</sup> Il y a interaction (action réciproque) *entre les PGB* dans le sens où les modalités pratiques de leur mise en œuvre sont interdépendantes.

Dans ce document, les effets des PGB (chapitre 2) et de leurs combinaisons (chapitre 3) sont examinés par rapport aux cibles jugées prioritaires par le ministère de l'agriculture du Canada (AAC), ainsi qu'à deux autres aspects ayant un impact non négligeable sur le milieu : **les matières en suspension (MES)**, en lien avec la qualité de l'eau, et la **diversité microbienne des sols**, en lien avec la qualité des sols (voir tableau 1). En effet, les MES peuvent avoir une incidence importante sur les milieux aquatiques et la biodiversité. La diversité microbienne a, quant à elle, un rôle déterminant sur la dynamique de décomposition de la matière organique et des éléments nutritifs, ainsi que sur la structure des sols (chapitre 4).

Figure 1 - Éléments en interaction au sein de l'agroécosystème



**Tableau 1 - Priorités relatives à chacun des enjeux agroenvironnementaux**

Enjeux	Priorités
Qualité des sols	↑ Taux de matière organique (MO) du sol <sup>6</sup>
	↓ Érosion hydrique <sup>7</sup>
	↓ Érosion éolienne
	↓ Érosion liée au travail du sol
Qualité de l'eau	↓ Pertes d'azote (N)
	↓ Pertes de phosphore (P)
	↓ Pesticides (pertes dans l'eau et apports aux cultures)
	↓ Contamination par les microorganismes pathogènes
	↑ Conservation de l'eau
	↓ Matières en suspension (MES)
Qualité de l'air	↓ Gaz à effet de serre (GES)
	↓ Odeurs
Biodiversité	↑ Disponibilité de l'habitat
	↓ Dommages économiques liés à la destruction de l'habitat riverain
	↑ Protection des espèces menacées
	↑ Habitat (aménagement de l'habitat)
	↓ Dommages aux cultures

↑ Augmentation ou Amélioration. ↓ Diminution

*Adapté de AAC (2005)*

<sup>6</sup> Le niveau de matière organique d'un sol (MO) est une caractéristique essentielle à prendre en compte pour décrire la qualité agronomique (fertilité au sens large) d'un sol, mais il paraît inapproprié de viser son accroissement systématique. Le but à atteindre est plutôt la bonne structure du sol (dont la MO peut être un indice) associée à un juste niveau de disponibilité des éléments nutritifs et de l'eau.

<sup>7</sup> Ici, le terme « érosion hydrique » est préféré à celui de « ruissellement » utilisé dans le document d'AAC. C'est en effet l'érosion hydrique qui provoque des pertes vers l'environnement (sol, éléments fertilisants, matière organique, pesticides ou organismes pathogènes). Le ruissellement en tant que tel n'est pas un facteur de risque environnemental : le ruissellement de l'eau sur une prairie peut n'avoir aucune conséquence néfaste, alors que sur un sol nu il peut conduire à une perte de qualité du sol et de l'eau.

## 1.2 Les PGB

Pour les besoins de l'étude, les principales PGB retenues parmi les 69 PGB répertoriées et rassemblées en 30 groupes par AAC (2005)<sup>8</sup> ont été réparties en six catégories, soit autant de domaines agronomiques de gestion de l'entreprise agricole (voir tableau 2).

**Tableau 2- Les principales PGB par catégories**

Catégorie de PGB	Principales PGB retenues
Travail du sol (TS)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Réduction du travail du sol</li><li>• Semis direct</li><li>• Culture sur billons</li></ul>
Couvert végétal (CV)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Rotation des cultures</li><li>• Implantation de cultures de couverture, de cultures intercalaires ou d'engrais vert</li></ul>
Fertilisation (F)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Optimisation de la fertilisation, minérale ou organique (date, dose et modalité d'application, fractionnement des apports,...)</li></ul>
Protection des cultures (PC)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Lutte intégrée contre les plantes nuisibles, les insectes et les maladies (méthodes chimiques, physiques et biologiques)</li></ul>
Élevages et effluents (EE)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Gestion raisonnée de l'alimentation</li><li>• Aménagement des pâturage (aires d'abreuvement, clôtures)</li><li>• Amélioration des infrastructures (bâtiments d'élevage et structures d'entreposage)</li><li>• Entreposage et traitement des effluents d'élevage</li></ul>
Aménagement du parcellaire (AP)	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mise en place de bandes riveraines, d'avaloirs, de voies d'eau engazonnées, de marais filtrants ou de bassins de sédimentation</li><li>• Plantation de haies brise-vent</li></ul>

N.B. : Seules sont considérées ici les PGB au sens strict de *pratiques agricoles*. Ainsi, les « services de consultation » et l'utilisation directe ou indirecte de techniques de l'agriculture de précision<sup>9</sup> n'ont pas été retenues. Le juste choix d'une PGB dépend de l'établissement d'un bon diagnostic agroenvironnemental, et ce n'est que la mise en œuvre concrète de la PGB (qui n'en est une que parce qu'elle correspond à un bon diagnostic) qui peut alors porter fruit<sup>10</sup>.

<sup>8</sup> Voir annexe1.

<sup>9</sup> Les outils de l'agriculture de précision (tel le système de géolocalisation par satellite GPS), en lien avec les PGB, sont traités à la section 3.7.

<sup>10</sup> Autrement dit, le constat d'une crevaison (quelle que soit la technique utilisée) ne suffit pas à faire redémarrer le véhicule. La PGB (au sens strict) correspond ici au « quoi » et « comment » faire. Après un diagnostic médical, c'est le suivi du traitement proposé, selon la posologie et les recommandations du spécialiste (établies elles-mêmes en fonction du terrain, le patient, et du problème à traiter).

### 1.3 Les combinaisons de PGB

Toutes les combinaisons de PGB ne sont pas possibles. L'établissement d'une culture de couverture permanente et l'enfouissement d'un engrais organique après son épandage constituent, par exemple, deux pratiques incompatibles. L'examen d'une telle combinaison de PGB n'est donc pas pertinente.

*Théoriquement*, quand deux PGB peuvent être appliquées conjointement, leurs actions respectives vis-à-vis d'un paramètre donné du milieu sont soit **synergiques**, **antagonistes** ou simplement **cumulatives**. Selon l'intensité de l'interaction entre les effets des PGB, la **combinaison** de deux PGB aura un impact favorable (gain agroenvironnemental), nul ou défavorable (risque agroenvironnemental) qui déterminera son niveau de recommandation (voir figure 2).

Par définition, la **synergie** est l'action conjuguée de deux ou plusieurs produits qui, lorsqu'ils sont associés, provoquent un effet supérieur à celui attendu de la superposition des propriétés de chacun des constituants pris isolément (HSPH, 1986). Autrement dit, deux PGB appliquées ensemble et agissant en synergie auront un effet total (sur un paramètre donné) plus grand que la somme des effets de chacune des PGB considérée individuellement ( $1+1 > 2$ , 1 représentant le gain agroenvironnemental associé à chacune des deux PGB). Plus la synergie est forte ( $1+1 \gg 2$ ), plus la combinaison des 2 PGB peut être recommandée.

À l'inverse, l'**antagonisme** entre deux PGB se traduit par des gains environnementaux moindres lorsque les PGB sont associées plutôt que mises en œuvre séparément ( $1+1 < 2$ ). Tant que le gain agroenvironnemental total de la combinaison des deux PGB se situe entre 2 et 1, l'utilisation de ces deux PGB en combinaison est recommandable puisque que celle-ci est plus favorable que les deux PGB appliquées séparément. Entre 1 et 0, la combinaison ne devrait pas faire l'objet d'une recommandation particulière et devrait même être proscrite pour un gain total nul ou négatif.

Enfin, deux PGB ont des effets indépendants ou cumulatifs lorsque l'effet des deux PGB combinées est égal à la somme des effets pris isolément ( $1+1 = 2$ ). C'est le cas, par exemple, pour une PGB de protection des cultures et une PGB reliée à la gestion des bâtiments d'élevages. Ces 2 PGB peuvent être recommandées indépendamment l'une de l'autre.

En pratique, les choses sont beaucoup moins simples, et ce pour les raisons suivantes :

- Il est impossible de qualifier *de façon absolue* la nature des actions combinées de deux ou plusieurs PGB vis-à-vis d'un paramètre du milieu. En effet, de nombreux facteurs pédoclimatiques interagissent avec chacune des PGB et entre eux. Ainsi, même si des travaux de terrain démontrent une synergie entre deux PGB, il se peut qu'il n'y en ait pas dans des conditions de milieu différentes. De la même manière, l'observation d'un antagonisme entre deux PGB ne permettrait pas d'affirmer que cet effet sera toujours observé.
- Deux PGB peuvent agir en synergie par rapport à une priorité (ou à un paramètre du milieu), mais de façon antagoniste vis-à-vis d'une autre priorité. Ainsi, dans le cas de cultures sur résidus en rotation, le lessivage des pesticides est accru en raison d'une meilleure infiltration de l'eau dans le sol. Cette perte environnementale est par contre

largement compensée par la diminution du ruissellement et de l'érosion hydrique, principale cause de la contamination des eaux de surface par les pesticides<sup>11</sup>. Ces nuances sont discutées dans la suite du texte ainsi que les risques (effets potentiellement négatifs) associés aux différentes combinaisons de catégories de PGB.

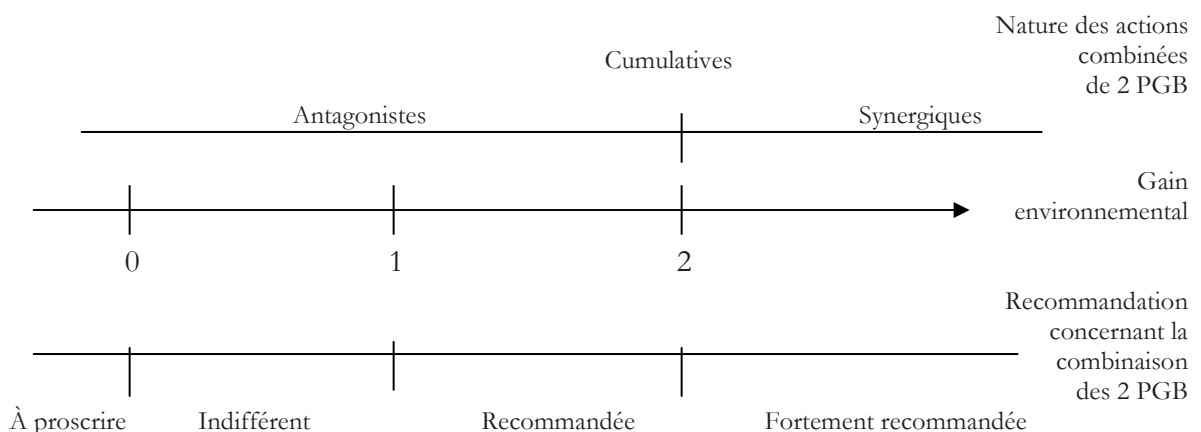
- Relativement peu d'études portent sur les effets synergiques ou antagonistes (au sens strict) des combinaisons de PGB. Cela représente en effet un exercice exigeant en temps et en ressources avec la mise en place de dispositifs expérimentaux rigoureux, où les PGB sont appliquées exactement dans les mêmes conditions, séparément et ensembles.

En pratique, il est donc bien difficile d'établir précisément l'effet strictement dû à l'application combinée des PGB; on pourrait dire « l'effet de l'interaction » ou « **l'effet d'interaction** ».

Les combinaisons présentées dans la suite du document sont celles dont les « effets d'interaction » sont **positifs** (ce qui correspond à une synergie potentielle des PGB appliquées ensemble) ou **négatifs** (ce qui correspond à un antagonisme potentiel ou plus généralement à un risque possible, mais pas nécessairement critique).

À titre indicatif, les tableaux 3a à 3c illustrent, de façon générale, les « effets d'interaction » potentiels entre les catégories de PGB, vis-à-vis de chacun des quatre enjeux agroenvironnementaux, soit la qualité des sols, la qualité de l'eau, la qualité de l'air et la biodiversité. Il est à noter que les interactions intra-catégorie (Ex. : TS x TS) ne sont pas développées ici. De plus, les interactions les plus nombreuses touchent la qualité de l'eau et celles les moins nombreuses (mais non les moindres) touchent la qualité des sols. Enfin, pour une même combinaison (ex. : TS x CV), les effets d'interaction potentiels peuvent être positifs ou négatifs, selon les priorités (tableau 1) et même les paramètres de qualité considérés<sup>12</sup>. Les « effets d'interaction » relevés dans la littérature sont présentés au chapitre 3.

**Figure 2 – Actions combinées de 2 PGB et gain environnemental théorique**



<sup>11</sup> Les concentrations de pesticide dans les eaux de surface sont parfois mille fois supérieures aux concentrations détectées dans la nappe phréatique (Fawcett *et al.*, 1994).

<sup>12</sup> Par exemple : P dans l'eau de ruissellement *vs* P entraîné vers les drains ou la nappe phréatique par lessivage.

**Tableau 3a – Effets d’interaction potentiels des catégories de PGB vis-à-vis de la qualité des sols**

Catégories de PGB		Effet d’interaction potentiel (+ : Positif; - : Négatif) Case vide : pas d’interaction <i>a priori</i>					
		TS	CV	F	PC	EE	AP
Travail du sol	TS	/	+	+			+
Couvert végétal	CV		/	+			
Fertilisation	F			/			
Protection des cultures	PC				/		
Élevages et effluents	EE					/	
Aménagement du parcellaire	AP						/

**Tableau 3b - Effets d’interaction potentiels des catégories de PGB vis-à-vis de la qualité de l’eau**

Catégories de PGB		Effet d’interaction potentiel (+ : Positif; - : Négatif) Case vide : pas d’interaction <i>a priori</i>					
		TS	CV	F	PC	EE	AP
Travail du sol	TS	/	+	+	+		+
Couvert végétal	CV	-	/	+	+	+	+
Fertilisation	F	-	-	/	+	+	+
Protection des cultures	PC	-	-		/		+
Élevages et effluents	EE	-	-			/	+
Aménagement du parcellaire	AP						/

**Tableau 3c - Effets d’interaction potentiels des catégories de PGB vis-à-vis de la qualité de l’air**

Catégories de PGB		Effet d’interaction potentiel (+ : Positif; - : Négatif) Case vide : pas d’interaction <i>a priori</i>					
		TS	CV	F	PC	EE	AP
Travail du sol	TS	/	+	+		+	
Couvert végétal	CV	-	/		+		+
Fertilisation	F	-		/			
Protection des cultures	PC				/		
Élevages et effluents	EE					/	
Aménagement du parcellaire	AP						/

**Tableau 3d - Effets d’interaction potentiels des catégories de PGB vis-à-vis de la biodiversité**

Catégories de PGB		Effet d’interaction potentiel (+ : Positif; - : Négatif) Case vide : pas d’interaction <i>a priori</i>					
		TS	CV	F	PC	EE	AP
Travail du sol	TS	/	+		+		+
Couvert végétal	CV		/		+		+
Fertilisation	F			/			+
Protection des cultures	PC				/		+
Élevages et effluents	EE					/	+
Aménagement du parcellaire	AP						/



## 2 EFFETS DES PGB VIS-À-VIS DES ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX

Ce chapitre présente, pour chaque catégorie de PGB, les effets généraux des PGB retenues ainsi que des effets particuliers sur la qualité des sols, la qualité de l'eau, la qualité de l'air et la biodiversité.

### 2.1 PGB du travail du sol

Les principales PGB appartenant à cette catégorie sont : le travail réduit du sol, le semis direct et la culture sur billons permanents.

Avec un **travail réduit du sol**, au moyen notamment d'un chisel, d'une herse à disque ou d'un vibroculteur, une partie des résidus de la culture précédente demeure à la surface du sol, lors du nouveau semis. En **semis direct**, il n'y a aucun travail du sol préalablement au semis : la totalité des résidus de culture reste à la surface du sol. En **culture sur billons**, enfin, la totalité des résidus est maintenue entre les rangs. Comme plus de 30 % des résidus sont encore au sol après les opérations d'ensemencement (CRAAQ, 2000), on parle de **culture sur résidus**.

Toutes ces PGB visent à réduire le passage de machinerie dans la parcelle et à laisser des résidus. D'une manière générale, les effets attendus de la culture sur résidus sont donc :

- l'augmentation du taux de matière organique du sol;
- la stimulation de la vie microbienne du sol et, par conséquent, l'amélioration de la structure des agrégats du sol;
- la diminution de la compaction du sol;
- la diminution des risques de battance<sup>13</sup>;
- la diminution de l'érosion éolienne et de l'érosion hydrique<sup>14</sup> (et par conséquent des pertes d'éléments nutritifs, de matière organique, de pesticides, et d'organismes pathogènes par perte de sol);
- la diminution de l'érosion attribuable au travail du sol;
- l'augmentation de l'infiltration de l'eau dans le sol.

Cependant, les résidus peuvent aussi retarder le ressuyage et le réchauffement du sol (MAPAQ, 1988).

#### 2.1.1 Qualité des sols

##### Activité biologique et biomasse

Dans une étude de Maurer-Troxler *et al.* (2006), le semis direct pratiqué pendant 10 ans a permis de doubler la **biomasse des lombrics**, comparativement au labour. À la fin de l'étude, la biomasse des lombrics était similaire à celle d'une prairie. Parallèlement, Desforges (1996; cité par Massicote *et al.*, 2000) a observé, en semis direct sur un sol argileux, une augmentation

---

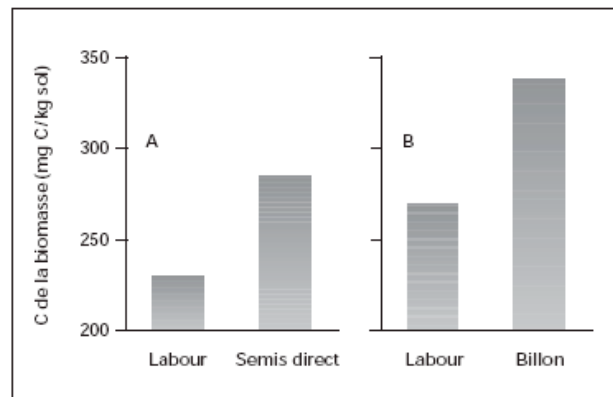
<sup>13</sup> Les résidus protègent les agrégats du sol de l'impact des gouttes de pluie qui, sur certains sols, pourrait même entraîner la formation d'une croûte de battance.

<sup>14</sup> La rugosité de surface créée par la présence de résidus freine l'écoulement de l'eau (le ruissellement) et diminue sa capacité à arracher et transporter des particules de sol.

de la biomasse de vers de terre d'environ 10 g/m<sup>2</sup>, comparativement au labour conventionnel. Lorsque les lombrics sont initialement présents dans le sol, le semis direct contribue à l'accroissement de leur population (Clapperton, 2000). Les vers de terre, en créant un réseau de galeries et de pores, améliorent la structure du sol (Massicote *et al.*, 2000; Clapperton, 2000).

En l'absence de travail du sol, les résidus sont mis en contact avec le sol de façon graduelle, sous l'influence des cycles de gel-dégel et d'humectation-dessiccation, ainsi que par l'action de la faune du sol (Chantigny et Angers, 2005). Les **microorganismes du sol**, stimulés par la présence des résidus de végétation, secrètent un mucilage qui s'agglutine aux particules de sol et à la matière organique. Les agrégats qui se forment alors ont une stabilité et une cohésion supérieure à celle du milieu (Tisdall et Oades, 1982). Le travail réduit rend la flore microbienne du sol plus active, mais aussi plus diversifiée qu'avec le travail conventionnel (Lindwall *et al.*, 2000). L'effet est plus prononcé lorsque des légumineuses sont intégrées au système de production via les rotations.

La figure 3 illustre l'abondance des microorganismes selon le type de travail du sol.



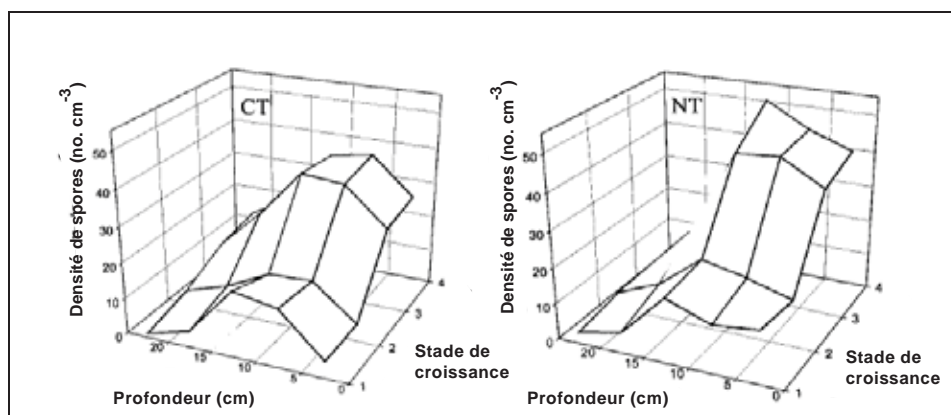
Tiré de CRAAQ (2000)

**Figure 3 - Carbone de la biomasse microbienne dans une rotation maïs-soya : (A) labour vs semis direct et (B) labour vs culture sur billons**

En l'absence de travail du sol, la proportion de **biomasse racinaire** et l'accumulation de carbone organique sont plus importants qu'avec le labour (Reicosky et Forcella, 1998). Par la sécrétion d'un mucilage lubrifiant riche en protéines et en glucides ainsi que par les cellules exfoliées lors de leur croissance, les racines stimulent la vie microbienne du sol. De plus, les fines racines et les systèmes racinaires très ramifiés, comme chez les graminées qui constituent parfois les bandes enherbées, forment une matrice dans laquelle les agrégats peuvent être retenus (Chantigny et Angers, 2005). Cet effet pourrait aussi être dû aux populations de champignons, plus particulièrement les mycorhizes, qui se développent sur les racines (Chantigny *et al.*, 1997).

La présence de **mycorhizes** à arbuscules dans les sols agricoles dépend de la formation et de la survie des propagules (hyphes, spores et racines colonisées). Leur persistance dans les sols est affectée par le travail du sol, car les mycorhizes se concentrent dans les couches superficielles du sol (figure 4). D'après Kabir (2005), le travail du sol brise les hyphes et les dilue. De plus, l'inclusion dans les rotations de cultures de couverture susceptibles d'être colonisées par des mycorhizes augmente le potentiel d'inoculation et la densité des hyphes. Le travail réduit du sol augmente donc la colonisation des racines par des champignons mycorhiziens (Clapperton, 2000). En culture sur résidus, le sol est plus humide et à l'ombre des résidus; il est donc plus

froid. Cela peut affecter la disponibilité du phosphore et du potassium. Par contre, le travail réduit favorise les mycorhizes qui peuvent contrebalancer l'effet des températures froides (Poisson *et al.*, 1997).



Stades de croissance : (1) 5 à 6 feuilles, (2) 10 à 12 feuilles, (3) épiaison et (4) maturité  
Adapté de Kabir (2005)

**Figure 4 - Distribution saisonnière et verticale des spores de mycorhizes dans une culture de maïs pour 4 stades de croissance dans des parcelles en semis direct (NT) et en travail conventionnel (CT)**

Comparativement au labour, le semis direct augmente significativement la fraction labile de la matière organique, du carbone et de l'azote, dans le sol (Malhi *et al.*, 2006). Après 4 ans de culture en semis direct, les proportions d'agrégats sensibles à l'érosion éolienne (diamètre < 0,83 mm) et de macro-agrégats (diamètre > 12,7 mm) étaient respectivement de 34 et 37 %. Avec un labour annuel, ces proportions étaient respectivement de 50 et 18 %. Les rendements (sous semis direct) ont augmenté à partir de la quatrième année grâce à une plus grande disponibilité de l'eau.

#### Réduction de l'érosion hydrique.

Le tableau 4 illustre l'effet de différents scénarios de travail du sol sur la réduction de l'érosion hydrique.

**Tableau 4 - Réduction de l'érosion hydrique selon les types de travail du sol et de résidus**

Type de résidus	Type de travail du sol <sup>1</sup>	Couverture de résidus (%)	Réduction de l'érosion par l'eau (%)
Maïs-grain	• Un passage de chisel, un passage de cultivateur, semis.	35	74
	• Deux passages de pulvériseur à disques, semis.	21	72
	• Culture sur billons.	34	86
	• Semis direct.	39	92
Soya	• Un passage de chisel, un passage de cultivateur, semis.	7	32
	• Un passage de pulvériseur à disques, semis.	8	26
	• Un passage de cultivateur, semis.	18	46
	• Semis direct.	27	64
Blé	• Un passage de chisel, un passage de cultivateur, semis.	29	72
	• Semis direct.	86	96

Tiré du CRAAQ (2000)

<sup>1</sup> Chacun des scénarios est comparé au travail conventionnel: labour (charrue à versoir), deux passages de cultivateur (un passage pour le blé) et semis.

## Conservation de l'eau dans le sol

En agissant comme un brise-vent, les résidus limitent l'évaporation du sol et l'évapotranspiration des plantes (Lindwall *et al.*, 2003). Dans les zones semi-arides des Prairies canadiennes, la neige s'accumule dans les résidus, ce qui augmente la disponibilité de l'eau au printemps. En revanche, dans les agroécosystèmes de climat plus humide (Est du Canada), la saturation des sols à texture fine peut retarder le réchauffement du sol et retarder l'ensemencement de certaine culture comme le maïs.

### 2.1.2 Qualité de l'eau

#### Efficacité de l'utilisation de l'azote

Avec le semis direct, l'efficacité de l'utilisation de l'azote par les plantes peut être compromise. Malhi *et al.* (2006) notent une immobilisation de l'azote, par les résidus au cours de la première année. Lindwall *et al.* (2000) soulignent que le taux d'humidité dans la couche arable souvent plus élevé peut accroître la dénitrification et que la minéralisation est ralentie en l'absence de labour. Ainsi, un déficit d'azote peut survenir, surtout dans les sols à texture fine. La dynamique de l'azote du sol à long terme varie selon la durée du non labour et peut faire fluctuer les rendements. Les dépenses encourues pour l'achat d'engrais azoté sont parfois supérieures en semis direct (Zentner *et al.*, 2002). L'optimisation de la fertilisation prend toute son importance avec le travail réduit.

#### Pesticides

Certains auteurs soulignent les atouts que présente la méthode du semis direct pour lutter contre le développement des **adventices** et pour réduire potentiellement l'utilisation d'herbicides:

- Les semences plantes nuisibles, qui restent à la surface ou près de la surface, sont soumises à la prédation, au froid extrême, au dessèchement et à la décomposition (Anderson, 2005; Bellinder *et al.*, 2004; MAAARO, 2002; Nazarko *et al.*, 2005). Toutefois, le positionnement en surface peut favoriser la germination de certaines espèces (Leblanc *et al.*, 1998).
- Avec le temps et grâce à une bonne gestion, le nombre annuel de semences d'adventices dans la zone de germination diminue (Anderson, 2005). Rappelons que la plupart des semences d'espèces annuelles survivent rarement plus d'un an dans le sol.
- Avec un remaniement minimum du sol, la dissémination des plantes vivaces et des plantes annuelles d'hiver à racines profondes reste localisée, ce qui facilite leur contrôle (MAAARO, 2002).

D'autres chercheurs rapportent au contraire que l'adoption du travail réduit du sol entraîne une hausse de l'utilisation d'herbicides et d'insecticides (Fawcett *et al.* (1994) ; Shipitalo et Edwards (1998)). Alors que Stevenson *et al.* (1998) ont observé que, comparativement au labour, le travail réduit est associé à une plus grande prolifération des plantes nuisibles, Zentner *et al.* (2002) ont constaté que les coûts reliés aux herbicides étaient plus élevés en cultures sur résidus. Cependant, plusieurs études n'ont révélé aucune augmentation de l'utilisation des herbicides en semis direct (Nazarko *et al.*, 2005). Par ailleurs, quelques études ont démontré qu'avec le travail réduit (comparativement au labour), la quantité d'herbicide résiduel dans le

sol n'est pas supérieure, principalement en raison d'une meilleure biodégradation (Lindwall *et al.*, 2000).

À long terme, le semis direct semble cependant favoriser les vivaces nuisibles (Maryse Leblanc, communications personnelles, 13 mars 2006) ainsi que les espèces bi-annuelles et annuelles d'hiver (dans les Prairies canadienne) (Gamache, 2004). Par ailleurs, en condition de travail réduit du sol, les adventices prolifèrent davantage lorsque le printemps est humide.

Ainsi, un labour occasionnel peut être souhaitable dans certains types de sol pour éviter la prolifération des adventices (Douville, 2002). Le labour d'automne permet de réduire la densité de graminées annuelles d'environ 75 % alors que le labour de printemps contrôle mieux les vivaces. De plus, les éléments peu mobiles, comme le phosphore ou certains pesticides, sont redistribués dans le profil de sol. Enfin, pour certains types de sol, le labour occasionnel permet de détruire une couche indurée.

Les épandages de pesticides doivent se faire préférentiellement au début du printemps et avant la récolte. La densité d'ensemencement peut jouer un rôle important puisque la culture est plus compétitive pour le prélèvement de l'eau et des nutriments. Une fois établie, une culture semée densément limite la pénétration de la lumière en raison de l'ombrage apporté par la canopée.

La rotations des cultures et les conditions météorologiques influencent davantage les ennemis des cultures (incluant les adventices) que le travail du sol (Lindwall *et al.*, 2000). Toutefois, le travail réduit exige un suivi plus rigoureux (Zentner *et al.*, 2002) et la période d'application demeure un facteur critique pour réussir la lutte contre les mauvaises herbes.

#### Pesticides: lutte contre les maladies et les insectes

Pour certaines cultures, les dommages causés par la maladie du piétin commun des racines sont inférieurs avec le travail réduit (Cook et Veseth (1991), cité dans Krupinsky *et al.*, 2002). Une autre étude a montré une diminution de la putréfaction de ceinturage brune des racines dans les cultures de pommes de terre avec une réduction de l'intensité du travail du sol (Soon *et al.*, 2005). L'effet est attribué aux organismes saprophytes qui se nourrissent des résidus et entrent en compétition avec *Rhizoctonia solani* Khün, le vecteur responsable de la maladie.

En revanche, les maladies favorisées par les conditions fraîches et humides offertes par la culture en semis direct sont particulièrement difficiles à vaincre dans les sols argileux mal drainés (MAAARO, 2002). Dans ce contexte, le travail réduit peut entraîner une utilisation accrue de pesticides et augmenter ainsi les risques de contamination de l'eau. Une étude récente a mis en évidence l'augmentation des populations de pyrales du maïs avec le semis direct (Vullioud *et al.*, 2006a). Les résidus de culture forment un habitat propices aux pyrales.

Les conditions climatiques, les rotations ainsi que la résistance des variétés cultivées ont une plus grande incidence sur le développement des maladies que le travail du sol (Lindwall *et al.*, 2000; Gamache, 2004). Comme c'est le cas avec les plantes nuisibles, les conditions de sol suite à la réduction de l'intensité du travail du sol modifient les populations d'insectes. Le suivi des insectes, une fertilisation optimale des cultures, le choix adéquat des rotations et l'adoption de seuils économiques afin d'épandre judicieusement les insecticides sont des stratégies qui minimisent l'impact des insectes ravageurs. Les résultats semblent néanmoins variables et contradictoires (Gilbert, 2004), ce qui reflète l'influence de nombreux autres facteurs reliés au climat, au type de sol, à la biodiversité, à la gestion de l'agroécosystème, etc. Dans certains

contextes, le travail réduit peut entraîner une hausse de l'utilisation des produits phytosanitaires (herbicides, insecticides et fongicides) alors que dans d'autres situations, c'est l'inverse.

#### Effet des résidus sur le lessivage de l'azote et du phosphore

Il est possible que le lessivage du phosphore provenant des résidus de culture contribue à l'enrichissement en cet élément des eaux de ruissellement (McDowell et McGergor, 1984). En effet, les résidus de culture ont le potentiel de moduler le contenu en azote et en phosphore du ruissellement par des phénomènes de lessivage et de sorption (Cernak *et al.*, 2004). Les résidus de soya et de maïs peuvent contribuer à l'enrichissement en azote et en phosphore des eaux de ruissellement alors que les résidus de blé peuvent sorber les phosphates ( $\text{PO}_4\text{-P}$ ) et les ions ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ). Toutefois, le risque potentiel de lessivage doit être relativisé en fonction des nombreux autres bénéfices découlant de la présence de résidus. De plus, la dynamique de sorption et de désorption est difficile à cerner.

#### Risque accru du lessivage des nitrates

Plusieurs travaux portant sur l'augmentation des risques de lessivage des nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) en travail réduit sont contradictoires (Waddell et Weil, 2005; CRAAQ, 2000). Selon Zhao *et al.* (2001), les pratiques culturales qui laissent résidus et amendements en surface, comme les cultures sur billons, rendent le sol plus vulnérable aux pertes de nutriments solubles. Les pratiques culturales qui enfouissent les résidus et les amendements (labour conventionnel) rendent le sol plus propice aux pertes de sédiments et de nutriments liés aux sédiments.

Sur une période de 6 ans, il semble que le travail réduit ait eu peu d'impact sur le lessivage des  $\text{NO}_3^-$  comparativement au labour conventionnel (Zhu *et al.*, 2003). Guertin et Barnett (2001) ont constaté cependant qu'il y avait moins de ruissellement et plus de lessivage avec le travail réduit. Par contre, leurs résultats n'ont pas mis en évidence que le travail réduit favorisait le lessivage des  $\text{NO}_3^-$ . Il y avait néanmoins plus de phosphore perdu dans l'eau de drainage.

Pourtant, une étude menée par Catt et ses collaborateurs (2000) a révélé qu'à long terme, le semis direct génère plus de pertes en azote via les drains que le travail conventionnel du sol. Les deux premières années, il y a eu plus de  $\text{NO}_3^-$  perdus sur les parcelles labourées. En revanche, après 5 ans, le semis direct a produit de 6 à 57 % plus de pertes de  $\text{NO}_3^-$ . En moyenne, la minéralisation était supérieure de 20 % avec le semis direct et l'azote minéralisé a essentiellement été lessivé ou dénitrifié. Dans le sud de l'Ontario, Yates *et al.* (2006) ont lié les plus grandes pertes de  $\text{NO}_3^-$  à un accroissement de la proportion des parcelles en semis direct. Les  $\text{NO}_3^-$  auraient principalement migré via les drains.

L'amélioration des propriétés physiques du sol par les pratiques de conservation favorise la formation de macropores qui peuvent accélérer l'infiltration de l'eau et le drainage (Malone *et al.*, 2003; Roulier et Jarvis, 2003; Shipitalo *et al.*, 2000; Naderman, 1991). Les nitrates comme d'ailleurs les pesticides solubles peuvent être ainsi plus rapidement transportés vers la nappe phréatique ou les drains agricoles.

La culture sur billons et le travail réduit, combinés à d'autres PGB, ralentissent le taux de nitrification et les mouvements de  $\text{NO}_3^-$  dans le sol (Power *et al.*, 2001). Néanmoins, le travail réduit peut amener les  $\text{NO}_3^-$  plus profondément dans le sol. D'après ces auteurs, la variabilité des conditions climatiques et des propriétés du sol a une plus grande influence sur le lessivage des  $\text{NO}_3^-$  que le travail du sol lui-même.

### Risque accru du lessivage des pesticides mobiles

De la même façon que pour les nitrates, l'augmentation de l'infiltration risque de favoriser le transfert des pesticides mobiles (solubilité élevée et faible valeur de K<sub>oc</sub>) vers la nappe d'eau souterraine. Le coefficient octanol-eau (K<sub>oc</sub>), la solubilité et la demi-vie sont les principaux facteurs qui influencent le mode de transport et la persistance des pesticides (Kerle *et al.*, 1996). Les herbicides de nature systémique comme l'atrazine sont plus sujets au lessivage que les herbicides de contact comme le glyphosate (Malone *et al.*, 2005).

Klik *et al.* (2001) ont constaté que la proportion de la dose de pesticide appliquée (Rimsulfuron, Bromoxynil, Tribenuron, Metamitron et Pendimethalin) qui a été perdue par ruissellement était supérieure avec le travail conventionnel du sol (5,6 %) comparé au travail réduit. Par contre, la proportion était supérieure avec le semis direct (2,6 %) comparativement au travail réduit (1,7 %). Isensee *et al.* (1990) ont mesuré un écoulement préférentiel des pesticides de 2 à 50 fois plus élevé en semis direct comparativement au travail conventionnel.

Dans le cas où une pluie intense survient, la vitesse de percolation est rapide et le temps de contact avec le sol est réduit (Malone *et al.*, 2003). Pour cette raison, le temps de réaction avec les colloïdes est moindre. Les premières précipitations sont déterminantes car plus le délai entre l'application et l'événement de précipitation est long, plus les phénomènes de diffusion, d'adsorption, de volatilisation, de dégradation et de prélèvement des nutriments par les plantes sont importants. Souvent, les macropores sont formés par l'activité des lombrics dans le sol et sont riches en matière organique. Cette matière organique peut augmenter la sorption des pesticides et l'aération du sol par les macropores stimule l'activité microbienne favorisant ainsi la biodégradation (Shipitalo *et al.*, 2000).

Par contre, d'après Shipitalo *et al.* (2000), l'impact global du travail du sol sur le lessivage des solutés non adsorbés comme les pesticides solubles ou les nitrates ou est minime. Les solutés non adsorbés, qui demeurent dans le sol après la saison de croissance, sont de toute façon lessivés pendant la saison de dormance. La différence de quantité d'eau qui s'infiltré n'est pas significative: c'est essentiellement pendant la période initiale de l'infiltration que les éléments solubles sont transportés.

### Accumulation du phosphore dans les couches superficielles du profil

Le phosphore (P) est un élément peu mobile dans le sol qui a tendance à demeurer adsorbé sur les colloïdes du sol. L'apport de P sur une base régulière peut mener à une accumulation de cet élément à la surface du sol sous travail réduit (Mamo *et al.*, 2005; Piovanelli *et al.*, 2005; Guertin et Barnett, 2001; Simard *et al.*, 2001). Ginting *et al.* (1998) ont quant à eux noté l'accumulation de phosphore dans l'horizon de surface (5 cm) suite à l'épandage de fumier de bovin dans une culture sur billons. Les parcelles en pâturage sont également sensibles à l'accumulation du phosphore en raison de la non incorporation des déjections (EPA, 2003).

L'enrichissement de l'eau de ruissellement en P est lié au taux de saturation du sol en cet élément (Sharpley *et al.*, 1996). L'accumulation du phosphore avec le semis direct représente un risque potentiel de libération de phosphore par désorption (Carter, 2005). Étant donné que la concentration en phosphore des couches superficielles est élevée avec le semis direct, l'exportation de phosphore dissous est supérieure (EPA, 2003; Koro *et al.* 1995). Ces pertes peuvent être attribuées à la désorption, à la dissolution et à l'extraction du phosphore des tissus végétaux ou du sol. Il y a lieu de croire qu'avec le travail réduit, les sédiments érodés sont plus riches en phosphore qu'avec un travail conventionnel.

Rappelons cependant que le phosphore particulaire constitue la principale forme sous laquelle le phosphore est transporté et que, généralement, les pratiques de conservation réduisent les risques de pertes.

### Devenir des pesticides

Certains pesticides se comportent comme le phosphore en raison de leur affinité avec les colloïdes du sol et de la matière organique. Les pesticides qui sont peu mobiles et qui possèdent une demi-vie suffisamment longue peuvent être adsorbés sur les colloïdes. En travail réduit, ils peuvent s'accumuler et se concentrer à la surface du sol. Éventuellement, les pesticides peuvent se volatiliser ou être transportés jusqu'au cours d'eau par érosion hydrique des sédiments (EXTOXNET, 1993). La toxicité issue de l'accumulation de pesticide dans le sol peut nuire à l'implantation de certaine culture l'année suivante.

### Risque accru de pertes par ruissellement de pesticides et de phosphore soluble

La réduction du travail du sol diminue les pertes de sol, mais peut augmenter les pertes de nutriments ou de pesticides solubles (Shipitalo et Edwards, 1998). Sur une base événementielle, le semis direct peut parfois générer plus de ruissellement que le travail réduit (McDowell et McGregor, 1984) ou que le travail conventionnel (Isensee et Sadeghi, 1993). Ces derniers ont constaté que la variation du ruissellement et des pertes de pesticides en semis direct dépend des conditions d'humidité du sol qui prévalent avant les précipitations. Avec un délai de plus de 7 jours entre deux pluies, le ruissellement était plus important avec le travail conventionnel alors qu'avec un délai inférieur à 6 jours, le ruissellement était plus élevé avec le travail réduit. La concentration en atrazine du ruissellement était plus élevée en semis direct. Thibodeau et Ménard (1993) ont aussi noté que la réduction du travail du sol peut avoir des effets contraires sur les nutriments. Ces auteurs citent entre autres Johnson *et al.* (1997) qui ont observé des concentrations plus élevées de phosphore dans les eaux de ruissellement quand le sol est soumis au travail réduit plutôt que labouré.

D'après les résultats de Ginting *et al.* (1998), les cultures sur billons génèrent plus de phosphore dissous que le labour conventionnel. Ce phosphore provient des résidus « lavés » par les précipitations et de la désorption du phosphore du sol. Néanmoins, les bénéfices de la culture sur billons, comme la réduction de la concentration du phosphore particulaire et total dans le ruissellement, surpassent les effets négatifs reliés à une plus grande perte de phosphore dissous. Le tableau 5 montre l'impact du travail réduit et des billons sur les pertes de matières en suspension ainsi que sur les pertes en azote et phosphore. La concentration en phosphore dissous est similaire ou supérieure avec le travail réduit et les cultures sur billons comparativement au labour conventionnel. Pour les autres paramètres, les pertes sont moindres avec le travail réduit et la culture sur billons.

**Tableau 5 - Comparaison des pertes de nutriments sous forme soluble et particulaire selon trois systèmes de travail du sol**

Type de travail du sol	Pertes de sol (t/ha)	Azote soluble (kg/ha)	Azote total (kg/ha)	Phosphore soluble (kg/ha)	Phosphore total (kg/ha)
Conventionnel	6,6	3,5	19,9	0,08	3,9
Travail réduit (chisel)	1,5	1,8	4,0	0,08	1,1
Billons	1,8	2,4	4,9	0,1	1,4

Station de recherche de Saint-Lambert-de-Lauzon  
Tiré du CRAAQ (2000)



Dans une étude sous pluie simulée, la quantité croissante de résidus a permis de réduire les pertes de sol et de phosphore (P total, particulaire et biodisponible) (Koro *et al.*, 1995). Toutefois, la réduction du ruissellement s'est accompagnée d'une augmentation des pertes de phosphore soluble (tableau 6). L'effet des résidus sur la réduction du ruissellement est particulièrement marqué pour plus de 1 000 kg/ha de résidus.

**Tableau 6 - Pertes moyennes de P suivant la quantité de résidus sur un sol Neuboiss**

Résidus (kg/ha)	P (mg/m <sup>2</sup> )					Total
	Total	Particulaire		Non particulaire		
		Non Mehlich	Mehlich	Soluble	Biodisponible	
0	185,0	95,5	89,5	42,8	132,3	227,8
500	154,2	76,9	77,3	46,1	123,4	200,3
1000	43,7	19,0	24,6	50,8	75,4	94,5
2000	10,5	4,3	6,2	63,2	69,4	73,7

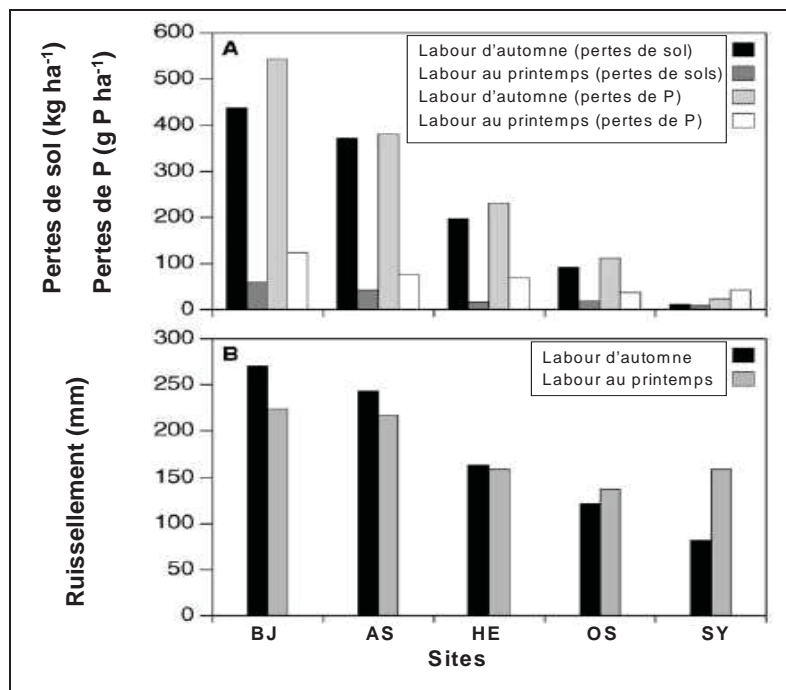
\* Valeurs moyennes pour 3 simulations de pluies d'intensité différente.

Le sol Neuboiss est un sol limono argileux fin.

Adapté de Koro *et al.* (1995)

Les pertes de P total (et de MES) provenant de parcelles sensibles à l'érosion sont nettement diminuées lorsque le labour est fait au printemps plutôt qu'à l'automne. Dans les parcelles faiblement érodables, l'absence de labour à l'automne conduit à une réduction des pertes en MES, mais elle peut se traduire par une augmentation du ruissellement et des pertes de P. (Kronvang *et al.*, 2005. Figure 5). La conservation de l'eau dans les parcelles soumises au semis direct favorise alors le ruissellement en raccourcissant le délai du déclenchement. En combinaison avec la présence de résidus de culture ou avec l'ajout de fumier, le risque de perte de phosphore peut être accru.

Guertin *et al.* (2000) soulignent en outre que le travail conventionnel tel que le labour à l'automne avec la charrue à versoir, suivi du passage du vibroculteur au printemps, est une pratique culturale qui représente un risque plus élevé de pertes de sol et d'éléments nutritifs. Les travaux avec la charrue scarificatrice (chisel) et le semis direct sont des méthodes de travail qui réduisent les pertes de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> dans les eaux de ruissellement. Au printemps, le labour hâtif des prairies entraîne une minéralisation importante de l'azote et une grande quantité de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> est libérée en cours de saison (Côté *et al.*, 2004).



Niveaux d'érodabilité : élevée (BJ, AS, HE), moyenne (OS) ou faible (SY)  
Adapté de Kronvang *et al.* (2005)

Figure 5 - Pertes de sol et de phosphore total (A) et ruissellement (B) pour 5 parcelles, d'érodabilités variées et labourées à l'automne ou au printemps.

### 2.1.3 Qualité de l'air

En prévenant la compaction des sols grâce à une meilleure agrégation des particules de sol, les cultures sur résidus (hormis le semis direct) réduisent la dénitrification responsable de la libération d'azote atmosphérique (Rochette *et al.*, 2001). Avec une présence accrue des cultures pérennes, les cultures sur résidus favorisent la séquestration du CO<sub>2</sub> atmosphérique. L'adoption du travail minimum du sol, surtout du semis direct, réduit l'utilisation de l'énergie fossile et par conséquent l'émission de CO<sub>2</sub> (Alberta Agriculture, Food and Rural Development, 2000).

En revanche, le taux d'humidité élevé en semis direct amplifie le phénomène de dénitrification en raison des conditions anaérobies. Le travail réduit du sol agit sur le taux de dénitrification; le taux d'humidité élevé à la surface ainsi que la présence de carbone et d'azote accentuent la présence des bactéries dénitrifiantes et augmentent le taux de dénitrification, comparativement au travail conventionnel du sol (Linn et Doran, 1984). Les conditions de sols humides rendent le milieu anaérobie. MacKenzie *et al.* (1997) ont constaté que les émissions de protoxyde d'azote (N<sub>2</sub>O) étaient supérieures en semis direct (par rapport à un labour d'automne). Toutefois, les conditions plus sèches des Prairies canadiennes rendent les sols moins propices à la dénitrification lorsque ceux-ci sont soumis au semis direct (Helgason *et al.*, 2005).

En comparaison avec l'Ouest canadien, le semis direct dans les sols de l'Est du Canada ne contribue pas significativement à l'accumulation du carbone dans le sol. D'après Gregorich *et al.* (2005), les conditions humides et le labour plus profond des sols de l'Est contribuent à une plus grande dégradation de la matière organique que dans l'Ouest du pays. Par contre, le travail intensif du sol contribue à libérer des quantités plus importantes de N<sub>2</sub>O lors de la fonte de la neige comparativement au semis direct (Lemke *et al.*, 1999) cité dans Coxworth, 1998). D'après

Lemke (2003), l'utilisation optimale des engrais azotés comme le positionnement à plus d'incidence sur l'émission des N<sub>2</sub>O que le type de formulation.

#### 2.1.4 Biodiversité

Le travail réduit favorise la prolifération des rongeurs fouisseurs comme la souris, le spermophile de Richardson ou le gautre (Bourne, 1997). Ces rongeurs préfèrent les cultures sous travail réduit car leur réseau de galeries et tunnels n'est pas détruit par la machinerie. Le risque de dommages aux cultures est accru si le travail réduit est accompagné d'une mauvaise gestion des plantes nuisibles. Des plates-formes ou des espèces d'arbres qui encouragent la présence des oiseaux de proie constituent une alternative intéressante aux produits phytosanitaires. Par ailleurs, les rongeurs peuvent contribuer à la prédation des semences de plantes nuisibles laissées près de la surface en absence de labour. Des recherches supplémentaires permettraient de mieux comprendre l'effet global de ces rongeurs fouisseurs sur la prolifération des adventices (effets bénéfiques *vs* dommages causés aux cultures).

Même à l'échelle du bassin versant, la qualité des écosystèmes aquatiques est améliorée grâce à l'ensemencement de parcelles en semis direct (Yates *et al.*, 2006). En réduisant l'exportation du phosphore et des sédiments, le semis direct (et les autres formes de travail réduit) contribue à améliorer la qualité de l'écosystème aquatique. Cette amélioration se reflète dans la composition des populations de macro-invertébrés benthiques, dans le pointage relatif à l'Indice Biotique Hilsenhoff et dans l'amélioration de la diversité de l'ichtyofaune. Les populations appartenant à la classe des Oligochaeta et à la famille des Sphaeriidae, adeptes des milieux riches en sédiments fins, ont décliné. On observe donc une plus grande diversité et une diminution des taxons tolérants aux conditions perturbées du milieu. Yates *et al.* (2006) notent également que la réduction de l'exportation des sédiments peut être masquée par d'autres pratiques agricoles, comme la rectification des cours d'eau, qui influencent plus fortement les habitats aquatiques.

## 2.2 PGB du couvert végétal

Ces PGB comprennent la rotation des cultures ainsi que les cultures de couverture et les cultures intercalaires. Par une « succession périodique sur une même parcelle de terre de plantes ayant des besoins différents »<sup>15</sup>, la **rotation des cultures** prévient l'épuisement du sol. La protection et l'amélioration des propriétés du sol sont en plus assurées si la rotation inclut des plantes fourragères. La **culture de couverture**, ensemencée juste après la récolte de la culture principale, protège le sol de l'érosion (hydrique et éolienne) et sert d'engrais vert par son enfouissement. Les **cultures intercalaires**, elles, croissent en même temps que la culture principale.

Les bénéfices reliés à ces PGB sont similaires à ceux des pratiques de travail réduit du sol. De plus, la rotation des cultures constitue un élément clé dans la lutte intégrée contre les ennemis des cultures. Par la diminution des doses de pesticides qu'elle permet, cette PGB représente un grand atout pour la qualité de l'eau.

Cependant, même si l'efficacité des rotations des cultures est reconnue, le Centre de conservation des sols et de l'eau (CCSE) de l'Est du Canada relève certains obstacles à leur

---

<sup>15</sup> Trésor de la langue française (TLQ, définition en ligne).

adoption. La période de transition à partir de laquelle les bénéfices des rotations se manifestent (matière organique, réduction de l'utilisation des pesticides et des engrais) est relativement longue et le taux d'endettement des producteurs est considérable. Dans plusieurs situations, il n'est donc pas profitable à court terme de louer des superficies pour intégrer des rotations. C'est à long terme que les rotations sont profitables en réduisant les risques de contamination de l'écosystème.

### 2.2.1 Qualité des sols

Avec l'implantation des cultures de couverture, l'accumulation de matière organique labile, facilement minéralisable, favorise la formation d'agrégats, augmente l'infiltration, réduit le ruissellement et l'érosion, tant hydrique qu'éolienne. À ce titre, l'intégration des prairies dans un système de rotation des cultures est souhaitable puisque l'accumulation de matière organique labile est favorisée (Giroux *et al.*, 2005). L'intégration de plantes fourragères dans une rotation améliore la structure du lit de semence, augmente la quantité de matière organique et ajoute de l'azote au sol. Sous culture intensive de pomme de terre, l'appauvrissement du sol en matière organique augmente la compaction des sols et réduit les rendements (CCSE, date inconnue). Par exemple, les rendements sont 1,33 fois plus élevés lorsque le précédent cultural est du trèfle plutôt que de la pomme de terre. L'amélioration de la qualité des sols se traduit par une augmentation des rendements commercialisables grâce à une répartition plus uniforme de la taille des tubercules.

### 2.2.2 Qualité de l'eau

Les cultures de couverture favorisent l'infiltration de l'eau en prévenant la formation d'une croûte de battance, en augmentant la macroporosité du sol ainsi qu'en favorisant le prélèvement et l'entreposage de l'eau (Dabney, 1998). En plus de réduire le ruissellement, la présence d'une culture de couverture ou de résidus augmente la résistance du sol à l'érosion (éolienne et hydrique) et réduit la capacité de transport de l'écoulement de surface (Langdale *et al.*, 1991).

#### Réduction des risques de contamination par les nitrates

L'implantation de rotations intégrant une culture de couverture (engrais vert ou prairie) permet de réduire le lessivage des nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) suite à l'épandage de lisier de porcs sur des parcelles de pommes de terre (Gasser *et al.*, 2000). Dans une autre étude, la culture de seigle après la récolte du maïs a permis de réduire de 80 % les flux de  $\text{NO}_3^-$  vers la nappe souterraine (Staver et Brinsfield, 1998). Les cultures de couverture implantées à l'automne permettent de réduire les teneurs en  $\text{NO}_3^-$  de l'eau de drainage et du sol (Isse *et al.*, 1999; Strock *et al.*, 2004), grâce au prélèvement de l'azote par les végétaux.

Pour réduire le lessivage des nitrates, il est préférable que les résidus de cultures soient enfouis au printemps plutôt qu'à l'automne (Hansen et Djurhuus, 1997). La séquence des rotations peut aussi influencer le prélèvement d'azote (Soon et Arshad, 2004). La diversification des cultures par une planification adéquate des rotations offre une certaine flexibilité quant aux périodes d'épandage (Magnan, 2005). Le lessivage potentiel des nitrates par les précipitations étant réparti sur une plus longue période, les risques de contamination sont ainsi diminués.

Quand il n'y a pas de rotation et de grandes parcelles, les risques de pollution lors de l'application d'un engrais de ferme sont plus grands que pour des petites parcelles cultivées en rotation, puisque les opérations d'épandages ont toutes lieu en même temps et le sol est à nu partout au même moment (D. Côté, communication personnelle, 1<sup>er</sup> mars, 2006). Par exemple,

si une pluie survient après un épandage, c'est toute la superficie qui est susceptible d'exporter des sédiments et des contaminants. Dans le cas où la parcelle est subdivisée, le risque est moindre puisque, pour chacun des événements, une partie du territoire seulement contribue à l'exportation.

La fixation symbiotique de l'azote par les légumineuses n'est pas une fonction obligatoire; les légumineuses fixent l'azote s'il y a un déficit dans le sol. Basée sur cette logique, une nouvelle approche se développe (Comis, 2005). En appliquant du fumier plutôt qu'un engrais minéral, les cultures cessent la fixation symbiotique pour prélever l'azote provenant des fumiers. Comme certaines légumineuses sont gourmandes en azote, l'utilisation de fumier sur ces cultures est sécuritaire en terme d'azote résiduel après la récolte et les risques potentiels de perte d'azote sont inférieurs. Dans un contexte où une proportion importante des sols est saturée en phosphore, l'ajout de fumier sur ces sols doit s'insérer dans le cadre d'un plan de gestion optimale de la fertilisation.

#### Pesticides : lutte intégrée contre les maladies et les insectes

La rotation des cultures est une PGB qui perturbe le cycle de reproduction des insectes et le cycle des maladies, en plus de contrôler les infestations des plantes nuisibles. En effectuant la rotation des familles chimiques des herbicides, la résistance des plantes nuisibles aux herbicides est amenuisée. De plus, les cultures de couverture favorisent la compétition entre les ravageurs et les prédateurs en raison d'une plus grande biodiversité dans le sol (Lal *et al.*, 1991; Altieri, 1999). Un sol fertile qui contient beaucoup de matière organique favorise le contrôle naturel des ennemis des cultures par antagonisme.

La rotation des cultures contribue à réduire les dommages causés aux feuillages par différentes maladies dans l'orge et le blé de printemps, sans en affecter la productivité (Krupinsky *et al.*, 2004). Parallèlement, l'impact des rotations sur le développement des maladies dans les cultures de pommes de terre est bénéfique. Peters *et al.* (2005) ont noté une réduction de la pourriture rose de la pomme de terre pour des rotations de trois ans (plutôt que de deux ans). La présence de microorganismes endophytes des racines accroît la résistance des plants alors que la diversité microbienne augmente la compétition avec *P. erythroseptica*, l'agent causal de la pourriture.

Le choix d'une rotation (espèces et séquence) est cruciale pour qu'une culture ne nuise pas à la suivante. En semis direct, ces considérations prennent d'autant plus d'importance car la présence de résidus, la température plus fraîche du sol et la teneur en humidité élevée sont des conditions favorables au développement de certains microorganismes pathogènes et insectes (MAAARO, 2002). Les scénarios possibles sont multiples et le bénéfice des combinaisons est variable. Les bénéfices découlent du fait que la quantité de produits phytosanitaires à appliquer est moindre lorsque les combinaisons sont adéquates. Le risque de contaminer l'environnement avec des pesticides est donc moins élevé avec les rotations des cultures. De plus, l'activité microbienne plus intense en travail réduit augmente le potentiel de biodégradation des pesticides.

Le tableau 7 résume les impacts potentiellement négatifs et positifs de quelques rotations, parmi celles présentées dans le guide du MAAARO (2002, voir annexe 3).

Certaines espèces favorisent la présence de nématodes des racines (sarrasin, trèfle rouge, vesce velue) ou de nématodes cécidogènes (trèfle rouge). Dans une production de tomates, le seigle en culture de couverture a permis de réprimer la noctuelle de la tomate (*Helicoverpa zea*).

Pourtant, le seigle a aussi contribué à l'augmentation des populations de punaises vertes (*Acrosternum bilare*) et de punaises puantes (*Euschistus servus*) (Roberts et Cartwright, 1991). Les cultures de couverture peuvent donc abriter des ravageurs pour certaines espèces cultivées et des prédateurs pour d'autres.

**Tableau 7 - Impacts potentiellement négatifs et positifs pour divers scénarios de rotation**

Résidus de culture	Culture à semer			
	Maïs	Soya	Blé	Plantes fourragères
Maïs	Problèmes d'insectes et de maladies	Recommandé	À éviter car les risques de maladies sont trop élevés	Recommandé
Soya	Recommandé	Peut fonctionner, mais préférer un suivi de non-légumineuse	Recommandé	Fonctionne généralement bien, mais préférer un suivi de non-légumineuse
Blé	Le sol peut prendre du temps à se ressuyer	Fonctionne généralement bien s'il n'est pas sous-ensemencé de trèfle rouge.	À éviter, car les risques de maladies sont trop élevés.	Recommandé
Plantes fourragères	Fonctionne généralement bien, mais attention aux limaces	Peut fonctionner, mais préférer un suivi de non-légumineuse	Possible, si les plantes fourragères sont détruites avant le semis	Possible, si toute végétation est détruite (3 semaines avant les semis)

Tiré du MAAARO (2002)

En choisissant une espèce appropriée et une densité de peuplement adéquate en plus d'adopter une stratégie efficace de contrôle des plantes nuisibles, il est possible de contrôler la présence des nématodes ou des autres ravageurs. En semis direct, il faut être prudent lors du choix d'une rotation. Par exemple, une culture de maïs ne doit pas être précédée une culture de blé car un lit de semence froid et humide rend la levée des jeunes plants de maïs difficile (MAAARO, 2002). D'autre part, les phytotoxines produites par les résidus de blé ralentissent la croissance des jeunes plants (Al Hamdi, 2001). Enfin, les limaces peuvent poser plus de problèmes si le printemps est froid et humide.

Pour éviter la prolifération des maladies et des insectes en semis direct, une céréale ne doit jamais être implantée après une culture de céréale en raison de la présence des spores (CDAQ-MAPAQ, 2005). À cause de la quantité importante de résidus de culture apportée par le maïs-grain, il n'est pas recommandé d'implanter une céréale sur une parcelle ayant comme précédent cultural le maïs-grain. De même, le maïs-grain ou le soya ne doit pas être implanté après une culture de soya. Pour éviter fusariose de l'épi, il est préférable d'effectuer un semis hâtif et d'utiliser des cultivars résistants. Dans les crucifères, les rotations de 3 ou 4 ans qui intègrent des légumineuses ou des céréales réduisent les infestations d'hernies en plus d'augmenter les rendements de 25 % (MAPAQ, 1998). Pour le doryphore de la pomme de terre, il est aussi reconnu que les rotations réduisent l'effet des infestations.

### Pesticides : lutte intégrée contre les plantes nuisibles

L'implantation d'une culture de couverture après une récolte diminue le développement des plantes nuisibles l'année suivante (Maryse Leblanc, communications personnelles, 13 mars 2006). La diversification des rotations, en augmentant les types de culture, contribue à prévenir les infestations de plantes nuisibles (Melander *et al.*, 2005), mais aussi à faciliter la rotation des familles chimiques afin d'atténuer le développement de résistances (Douville, 2002). En variant les conditions de croissance, les adventices ont plus de difficultés à s'adapter et prolifèrent moins (Nazarko *et al.*, 2005). La séquence des rotations peut favoriser des cultures qui permettent plus facilement l'implantation d'un engrais vert en fin de saison.

Les résidus de culture agissent également de façon positive sur le contrôle des plantes nuisibles. La présence de résidus altère les conditions environnementales, constitue un obstacle physique à la germination, inhibe la germination et la croissance des plantes nuisibles. Al Hamdi (2001) a démontré l'effet phytotoxique de la paille de blé sur la germination et la croissance de certaines espèces de plantes nuisibles. D'autres céréales, comme l'orge, ont aussi le potentiel de générer des substances qui inhibent la croissance des plantes nuisibles (Dhima *et al.*, 2006). L'implication de la molécule d'artémisinine a pu être mise en évidence et offre des perspectives prometteuses pour diminuer l'utilisation des herbicides (Delabays et Mermillod, 2002). Un phénomène intéressant découle du potentiel de transformation chimique des acides organiques impliqués dans l'allélopathie par les microorganismes, qui peuvent rendre les molécules encore plus phytotoxiques (Worsham, 1991).

Les cultures intercalaires sont utiles pour réduire l'érosion sur les sols à risque, mais aussi pour la répression des plantes nuisibles. Par contre, la complexité de la gestion des cultures intercalaires est un obstacle à son adoption. Une étude effectuée au Québec conclut que la culture intercalaire n'a que peu d'effets sur la répression des plantes nuisibles (Leblanc *et al.*, 1996). Abdin *et al.* (2000) précisent que les cultures intercalaires peuvent contrôler le développement des mauvaises herbes si, initialement, la densité d'adventices n'est pas trop élevée. Ces auteurs soulignent l'importance d'intégrer d'autres méthodes pour augmenter l'efficacité des cultures intercalaires à réprimer les plantes nuisibles.

Les espèces les plus compétitives utilisées dans les cultures intercalaires réduisent le rendement du maïs. Si on utilise une culture intercalaire dans le maïs et sous les conditions climatiques du Québec, il faut s'assurer d'ensemencer la culture intercalaire le plus tard possible afin de réduire la compétition. Dans certains cas, il se pourrait même que la banque de semence de plantes nuisibles soit alimentée (Leblanc *et al.*, 1996). La culture intercalaire est surtout efficace pour contrer le ruissellement et l'érosion. L'effet des cultures de couverture sur la suppression des mauvaises herbes varie ; des validations scientifiques sont donc nécessaires (Melander *et al.*, 2005).

L'espèce utilisée comme engrais vert ou culture intercalaire a des effets variables sur le type de mauvaise herbe réprimé (Douville *et al.*, 2002). Par exemple, dans des cultures intercalaires, le ray-grass ou le trèfle incarnat réprime mieux les adventices (de 10 à 25 %) que l'avoine ou le seigle d'automne (moins de 10 %). La gestion des cultures de couverture implantées après une culture est un facteur essentiel pour ne pas infester la culture principale l'année suivante. Le sarrasin et le radis oléagineux, utilisés en culture de couverture, sont des espèces qui peuvent causer des problèmes d'infestations (MAAARO, 2002). La culture suivante peut subir la compétition des repousses, surtout en travail réduit.

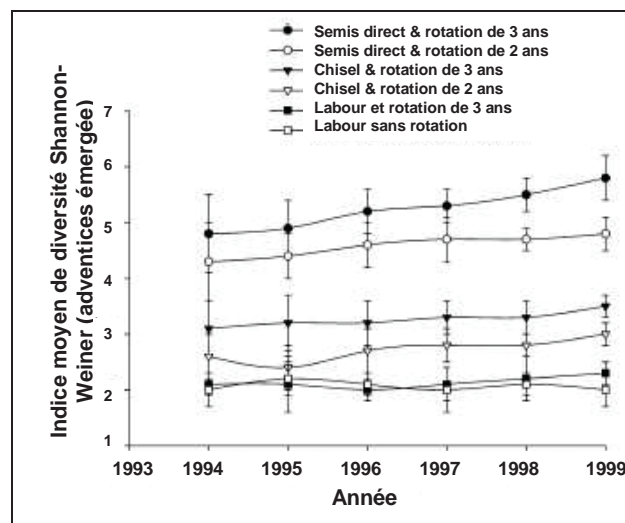
### 2.2.3 Biodiversité

#### Lutte intégrée et diversité des plantes nuisibles

Murphy *et al.* (2006) estiment que la diversité des plantes nuisibles a certains avantages. La compétition accrue entre les plantes nuisibles, la création de niches pour les ennemis naturels des plantes nuisibles ainsi que la réduction de la résistance aux herbicides en sont des exemples. Les rotations et le travail réduit du sol contribuent à la diversité des plantes à la levée et des semences présentes dans le sol (figure 6). Vullioud *et al.* (2006a) relatent que la simplification des rotations peut augmenter la densification et la spécialisation de la flore adventice avec la réduction de l'intensité du travail du sol.

La régie des cultures et les caractéristiques inhérentes au type de culture créent de nouveaux habitats et en éliminent d'autres. La luminosité à travers la canopée, le type d'herbicide appliqué, la période de travail du sol, la présence des ennemis naturels des plantes nuisibles, la création de microenvironnements et la perturbation minimale du sol contribuent ainsi à la diversification des plantes nuisibles. Ainsi, aucune espèce ne domine la population d'adventices comparativement à une monoculture labourée, ce qui facilite la lutte intégrée.

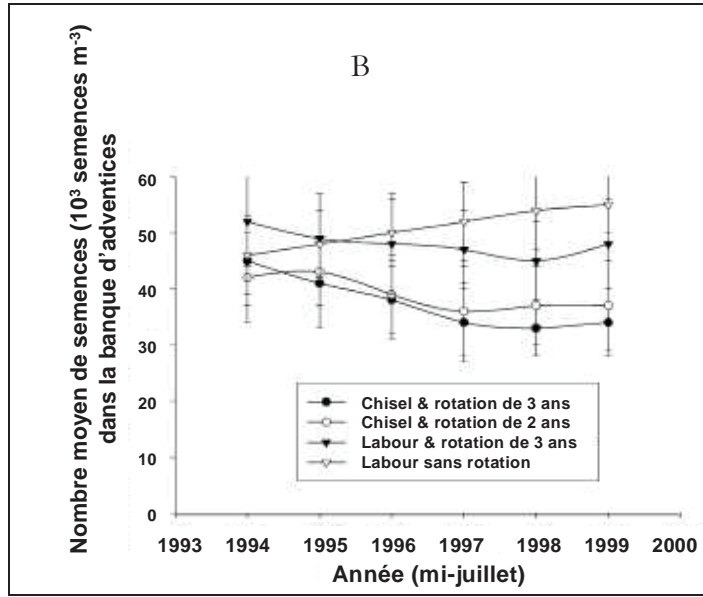
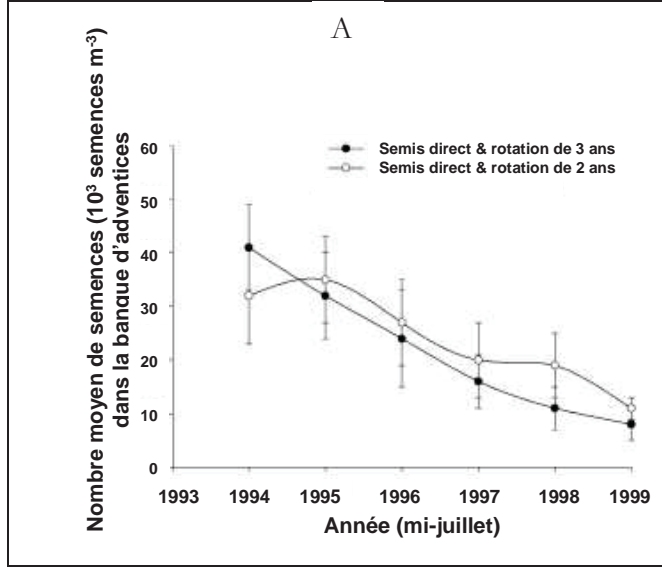
Après 6 ans de semis direct, la banque de semence d'adventices dans le sol est passée de 41 000 à 8 000 semences par  $m^{-3}$  (figure 7). Pour la densité des plantes nuisibles émergées, l'effet est plus marqué après 3 ou 4 ans (figure 8). La dessiccation, la prédation et l'efficacité accrue des herbicides seraient responsables de la destruction des semences laissées en surface avec le travail réduit. De plus, les auteurs ont noté qu'en semis direct, les herbivores étaient plus abondants et les plantes nuisibles étaient plus susceptibles de développer des infections pathogéniques. Les auteurs concluent leur étude en mentionnant que la diversité des plantes nuisibles peut être neutre ou positive, mais n'aggrave jamais le problème d'infestation par les mauvaises herbes. Des recherches supplémentaires permettraient de préciser davantage la nature de l'interaction entre la diversité des adventices et la lutte intégrée (Murphy *et al.*, 2006).



Adapté de Murphy *et al.* (2006)

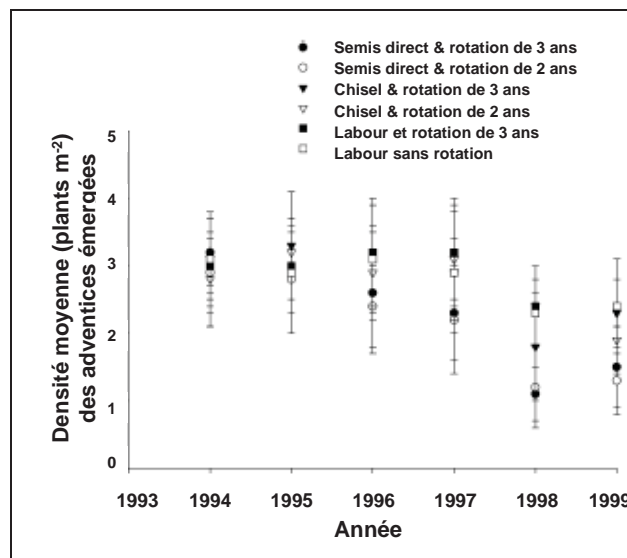
Figure 6 - Variation de l'indice moyen de diversité Shannon-Weiner pour l'émergence des plantes nuisibles en juillet de 1994 à 1999, selon le travail du sol et la longueur des rotations





Adapté de Murphy *et al.* (2006)

Figure 7 - Variation du nombre moyen de semences de plantes nuisibles dans la banque d'adventices pour le semis direct (A) ainsi que pour le chisel et le labour (B), avec diverses rotations



Adapté de Murphy *et al.* (2006)

Figure 8 - Variations de la densité des adventices levées, selon le travail du sol et la longueur des rotations

### 2.3 PGB de la fertilisation

La gestion optimale de la fertilisation a pour objectif de limiter la contamination de l'eau par les engrais (minéraux ou organiques) et de diminuer la quantité d'intrants utilisés. Les PGB relatives aux modalités d'épandage, l'utilisation de grilles de fertilisation et le fractionnement des doses permettent d'améliorer la fertilisation des plantes et de mieux contrôler les risques de contamination.

#### 2.3.1 Qualité des sols

Comme le travail réduit et les cultures de couverture, l'ajout de fumier à des doses agronomique améliore la stabilité des agrégats et la résistance à l'érosion (N'Dayegamiye et Anger, 1990), en plus d'augmenter la population des lombrics et la conductivité hydraulique (Power *et al.*, 2001).

#### Bilan humique

Le bilan humique quantifie le niveau de matière organique (fraction humique et labile) accumulée ou perdue suite à une culture, ce qui affecte évidemment la minéralisation. La minéralisation se fait à partir de la fraction labile, mais aussi de la fraction humique. La fertilisation des cultures avec du fumier plutôt qu'avec des engrais minéraux permet d'améliorer le bilan humique. Pour une période de 10 ans, Giroux *et al.* (2005) ont calculé un bilan humique net positif suite à l'ajout de fumier de bovin de laitier (5,93 t/ha) contrairement aux engrais minéraux (-2,55 t/ha) et au lisier de porcs (-0,60 t/ha). Ces résultats ont été obtenus avec des cultures commerciales (maïs-grain, orge, canola). La même étude a permis d'évaluer un bilan humique net positif sous prairies, peu importe la source des engrais.

Établir un bilan des éléments nutritifs en fonction du bilan humique d'une culture permet d'ajuster les doses en fonction de la minéralisation et constitue en soi une PGB. Il faut également quantifier l'azote provenant des résidus de culture (Power *et al.*, 2001). Avec le processus d'humification, l'azote est intégré dans les agrégats, ce qui augmente la teneur des

sols en azote sans pour autant augmenter les risques de lessivage de cet élément (Giroux *et al.*, 2005; Power *et al.*, 2001).

### 2.3.2 Qualité de l'eau

#### Nitrates et phosphore soluble

En rotation des cultures, il est important de comptabiliser la minéralisation due à l'incorporation des résidus afin d'ajuster les doses d'engrais (par réduction ou fractionnement de la dose) pour les cultures subséquentes. Le fractionnement des applications d'engrais azotés pour mieux synchroniser l'apport avec les besoins des cultures constitue une alternative intéressante. Par exemple, dans les prairies, le fractionnement des doses de fumiers entre le printemps et l'automne réduit les pertes en phosphore (Simard *et al.*, 2001). Notons que le fumier contient plus de phosphore soluble que les engrais minéraux, ce qui pourrait augmenter les risques de contamination.

La problématique des cultures exigeantes en azote réside dans leur faible coefficient d'utilisation. Même si les doses élevées sont économiquement rentables, le prélèvement d'azote est limité. Plus la dose est élevée, plus il y a de reliquats d'azote dans le sol et plus les risques de lessivage de l'azote sont importants (Giroux *et al.*, 2003a). Ces auteurs suggèrent que l'adoption de rotations peut réduire les risques de lessivage des  $\text{NO}_3^-$  en introduisant la notion de rejets moyens pondérés. Cette approche offre la possibilité de répartir dans le temps, à l'aide de différentes séquences de rotations, des cultures laissant des quantités appréciables de  $\text{NO}_3^-$  dans le sol après les récoltes. En Europe, le rejet moyen pondéré est l'approche qui a obtenu le plus de succès (Strebel *et al.*, 1989).

Avec l'utilisation des engrais minéraux, la concentration en nitrates des lixiviats a dépassé le niveau de 10 mg/l dans 38 % des échantillons contrairement à 15 % pour les fumiers. À long terme, la tendance s'est inversée en raison de la minéralisation. Ce phénomène illustre le potentiel des fumiers à fournir de l'azote aux végétaux, mais il souligne aussi l'importance de comptabiliser la minéralisation afin de réduire les risques environnementaux. Pour ce faire, le bilan prévisionnel des éléments nutritifs qui tient compte des apports de matières organiques labiles permet d'ajuster les doses appliquées (Giroux *et al.*, 2003).

#### Les organismes pathogènes

Les épandages pendant l'été ne présentent pas de risque élevé de contamination par les organismes pathogènes. D'une part, la période critique de ruissellement ne survient pas pendant l'été et les cultures, qui protègent le sol de l'érosion, absorbent l'eau et les éléments nutritifs. D'autre part, la chaleur estivale contribue à stimuler la vie microbienne du sol ce qui accentue la compétition entre les microorganismes du sol et les organismes pathogènes (Caroline Côté, communications personnelles, 13 mars 2006).

La gestion adéquate des fumiers réduit la charge en microorganismes potentiellement pathogènes. En réduisant la charge et le potentiel de migration, les végétaux de la bande riveraine sont plus performants. La migration des microorganismes dans le sol peut être limitée par l'application de certaines pratiques comme la destruction des voies d'écoulement préférentiel, l'application de doses non-excessives, la répartition des épandages pendant la saison ainsi que l'épandage en post-levée et par temps sec (Majdoub *et al.*, 2004).

Notons que la rotations des culture facilite la répartition des épandages durant la saison : plusieurs fenêtres sont propices aux épandages en raison de la diversité des périodes de croissance des cultures (donc de prélèvement des éléments nutritifs).

#### Influence de la nature de l'engrais de ferme utilisé et de ses modalités d'épandage

Les travaux de Côté *et al.* (2004) font le point sur les risques environnementaux associés au choix d'une période d'épandage, selon divers facteurs (nature de l'engrais de ferme, méthode et type de culture, etc.). Le respect de la dose agronomique est évidemment un facteur essentiel dans le facteur de risque. Il importe de préciser que le rapport C/N des engrais de ferme influence le transport de l'azote. En effet, un rapport C/N supérieur à 15 indique que l'azote est plus facilement immobilisé. Dans la même logique, le carbone contenu dans les résidus contribue à remonter le rapport C/N de la surface du sol (Ball-Coelho *et al.*, 2004). La libération des nitrates étant ralentie, le risque d'en perdre est moindre.

D'après Giroux *et al.* (2003), les fumiers qui contiennent plus de litière auraient une vitesse de libération des nitrates plus lente. De plus, le rapport N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/N total des fumiers et des lisiers serait lié au taux de libération des nitrates dans les sols. Le rapport N- NH<sub>4</sub><sup>+</sup>/N total indique la proportion de l'azote qui est sous forme minérale. Le lisier est caractérisé par une teneur élevée en azote minéral, ce qui indique une plus grande disponibilité de l'azote pour les cultures par rapport à d'autres types de fumier. Il est donc préférable d'épandre le lisier sur des cultures pendant les périodes actives de croissance (Magnan, 2005).

Selon Côté *et al.* (2004), les applications en pré-semis avec incorporation et en post-levée présentent des risques faibles à modérés dans les cultures annuelles (tableau 8). Une étude similaire conclut que l'application de lisier de porcs dans des cultures d'orge et de canola en pré-semis est préférable à une application en post-levée (Gasser *et al.*, 2000a). Néanmoins, les restrictions liées au délai d'ensemencement et au nombre de jours propices aux épandages mènent les producteurs à appliquer les engrais sur des sols humides, propices à la compaction. En post-levée, la période de croissance active favorise le prélèvement des nutriments.

Par ailleurs, les applications d'automne (en post-récolte) présentent des risques de contamination potentiellement élevés, malgré la présence d'une culture de couverture. Les quantités de résidus des cultures de pommes de terre, de soya et de céréales avec pailles récoltées sont insuffisantes pour immobiliser l'azote. Le risque est potentiellement très élevé lors de l'application d'engrais de ferme avec un rapport C/N inférieur à 15 en l'absence de cultures de couverture ou de résidus. L'application de lisier à l'automne augmente les pertes de phosphore pendant l'hiver (Guertin et Barnett, 2001). La période printanière est souvent très active sur le plan hydrologique en raison de la saturation des sols en eau. Dans ces situations, les producteurs doivent faire preuve de jugement pour cibler les périodes où le risque est le plus faible.

Les épandages sur les cultures pérennes (tableau 9) sont caractérisés par l'absence d'incorporation, sauf pour les applications avant la première coupe, mais par la présence continue de végétaux. Peu importe le type de fumier, l'épandage doit être réalisé avant la 1<sup>re</sup> coupe afin d'éviter les risques environnementaux. Les apports de fumier avant la 2<sup>e</sup> et la 3<sup>e</sup> coupe sont moins bénéfiques pour les cultures en raison de l'impossibilité d'enfouir les engrais. Comme il est impossible techniquement d'enfouir les engrais dans les prairies, les épandeurs munis de pendillards sont fortement recommandés pour réduire les émissions d'odeurs et réduire les pertes ammoniacales (Pigeon, 2005). De plus, cette méthode évite la salissure des

cultures et la contamination des récoltes par des organismes pathogènes en plus de positionner adéquatement le lisier près des zones sensibles (puits, cours d'eau).

Les épandages après la dernière coupe présentent un risque potentiellement élevé ou très élevé de lessivage des éléments nutritifs et des agents pathogènes. Le risque est très élevé pour les applications après la fin de la croissance active pour les lisiers et fumiers ayant un rapport C/N inférieur à 15.

**Tableau 8 - Risque environnemental lié à l'épandage sur cultures annuelles**

Périodes d'épandage				
En pré-semis incorporé	En post-levée	En post-récolte		
		Sur culture de couverture	Sur résidus avec C/N élevé	Sans cult. de couv. ni résidus
<b>Pour les lisiers et fumiers avec un C/N &lt; 15</b>				
2	1	3	3	4
<b>Pour les lisiers et fumiers avec un C/N &gt; 15</b>				
1	2	3	3	3

- : Echelle de risque : 1 = faible; 2 = modéré; 3 = potentiellement élevé; 4 = potentiellement très élevé

Tiré de Côté *et al.* (2004)

**Tableau 9 - Risque environnemental lié à l'épandage sur des cultures pérennes**

Périodes d'épandage				
Avant 1 <sup>ère</sup> coupe	Avant 2 <sup>e</sup> coupe	Avant 3 <sup>e</sup> coupe	Après dernière coupe	
			Avant fin de croissance active	Après fin de croissance active
<b>Pour les lisiers et fumiers avec un C/N &lt; 15</b>				
1	1	2	3	4
<b>Pour les lisiers et fumiers avec un C/N &gt; 15</b>				
1	2	2	3	3

- : Echelle de risque : 1 = faible; 2 = modéré; 3 = potentiellement élevé; 4 = potentiellement très élevé

Tiré de Côté *et al.* (2004)

Les risques de pertes sont supérieurs avec le lisier de porc non enfoui comparativement aux autres types de fumier car sa teneur élevée en eau contribue à réduire le décalage entre la pluie et le déclenchement du ruissellement (Gangbazo *et al.*, 1996). Conséquemment, le volume d'eau de ruissellement est supérieur et le taux d'infiltration est réduit. L'épandage du lisier présente donc un risque de contamination de l'eau par les matières en suspension, l'azote, le phosphore et les agents pathogènes. Toutefois, peu importe le type d'engrais (minéral ou organique), l'incorporation moins de 24 heures après l'épandage permet d'éviter les risques de perte associés aux précipitations (Giroux *et al.*, 2003). De plus, l'enfouissement des engrais permet de contrôler les pertes de  $\text{NH}_4^+$  après un épandage (Giroux *et al.*, 2003a).

Néanmoins, il est plus difficile de contrôler les nitrates du sol avec l'utilisation des fumiers car la minéralisation varie selon plusieurs facteurs (Power *et al.*, 2001). Le fractionnement des doses permet d'appliquer des engrais de ferme en complément d'un engrais minéral (Côté *et al.*, 2004). Le fractionnement des apports azotés dans le maïs a des avantages environnementaux

sans affecter le rendement lorsque le maïs est en rotation avec le soya (Bjorneberg *et al.*, 1998). En synchronisant la nutrition azotée avec les besoins des cultures, ces pratiques limitent la présence des nitrates dans le sol quand aucune culture ne prélève d'azote. La rotation soya-maïs offre l'opportunité de mieux gérer les risques de lessivage des nitrates, contrairement à la monoculture de maïs. Par contre, le soya ne laisse pas suffisamment de résidus pour réduire l'érosion (Power *et al.*, 2001).

Ball-Coelho *et al.* (2004) précisent que l'application en bandes latérales des engrais dans une culture de maïs limite les pertes associées à l'épandage. Une étude de Guertin *et al.* (2000) confirme les bénéfices de l'application localisée des engrais minéraux. Le placement de l'engrais minéral localisé près du rang de maïs a réduit de trois fois les pertes en nitrates, comparativement à un épandage à la volée. L'application des engrais en bande facilite notamment la lutte contre les adventices en limitant l'accès à l'azote.

Combiné aux autres pratiques d'épandage, l'enfouissement, l'application localisée et le fractionnement de la fertilisation atténuent les pertes d'éléments nutritifs. Des recherches sont actuellement en cours pour adapter les équipements d'épandage afin d'enfouir les engrais inorganiques en prairie (Pote *et al.*, 2006). Cette technique apporte des bénéfices environnementaux à l'égard des pertes de nutriments et d'organismes pathogènes en plus d'augmenter les rendements.

Le respect des modalités optimales d'épandage est crucial pour contrôler adéquatement les risques environnementaux liés aux épandages des engrais minéraux et des engrais de ferme. Ensemble, ils agissent en synergie et constituent des PGB qui réduisent l'émission de contaminants à la source. De même, l'émission des odeurs et des gaz à effets de serre est réduite suite à l'adoption de ces pratiques.

### 2.3.3 Qualité de l'air

La manipulation adéquate des engrais et des fumiers permet de limiter l'émission d'oxyde nitreux ( $N_2O$ ) et de méthane ( $CH_4$ ). Les modalités d'épandage reliées à la valorisation des engrais de ferme ont des impacts significatifs sur l'émission des odeurs et des gaz à effets de serre ( $CH_4$  et surtout  $CO_2$ ,  $N_2O$ ). En plus d'augmenter l'efficacité de l'utilisation des engrais de ferme, l'incorporation des fumiers et des lisiers réduit les émissions d'odeurs. La volatilisation de l'ammoniac ( $NH_3$ ) suite à l'épandage du lisier est un phénomène important. L'incorporation des résidus de cultures et du lisier réduit les pertes de  $NH_3$  (Rochette *et al.* 2001). Chantigny et Anger (2005) précisent que de 60 à 100 % du carbone contenu dans le lisier se transforme en  $CO_2$  dans les semaines qui suivent l'application au champ.

L'utilisation d'engrais ammoniacal au lieu des engrais à base de nitrates ( $NO_3^-$ ) augmente les pertes de  $NH_3$  mais réduit les émissions de  $N_2O$  (Monteny *et al.*, 2006). L'épandage de lisier produit plus de  $N_2O$  que l'épandage de fumiers solides. Pourtant, la fertilisation azotée permet d'augmenter la biomasse des récoltes et de séquestrer ainsi plus de  $CO_2$ .

## 2.4 PGB de la protection des cultures

Dans le domaine de la protection des cultures, les pratiques de gestion bénéfique sont celles qui concourent à une véritable «lutte intégrée»<sup>16</sup> contre les ennemis des cultures. D'après Melander *et al.* (2005), l'épandage de pesticides mène à un appauvrissement général de la faune et de la flore des écosystèmes agricoles. La lutte intégrée, pour qu'elle soit considérée comme une PGB, doit avoir comme objectif de réduire les doses de pesticides appliquées au champ (Maryse Leblanc, communications personnelles, 13 mars 2006).

### 2.4.1 Qualité de l'eau

Prises individuellement, les méthodes de lutte intégrée ne se manifestent pas toujours par des réductions des quantités de pesticides. C'est souvent la combinaison de deux ou plusieurs méthodes qui influencent la qualité de l'eau par une réduction des doses épandues.

La combinaison des différentes pratiques de gestion intégrée des ennemis des cultures est bénéfique. La combinaison de la répression des plantes nuisibles par le sarclage avec la houe rotative avec le contrôle de la pyrale du maïs (Leblanc *et al.*, 2003) en est un exemple. Le mécanisme par lequel le sarclage affecte les populations de pyrale n'est pas connu, mais les auteurs suggèrent que le passage de la houe nuit à la ponte des œufs. Une autre hypothèse est que le tissu lacéré des plantes nuisibles émet des molécules qui éloignent la pyrale.

La réduction des doses pour le contrôle des insectes ou des maladies est une approche peu utilisée compte tenu des risques importants relatifs à une baisse d'efficacité des produits. Par contre, l'utilisation d'un seuil d'intervention pour déterminer le moment d'application des insecticides, en fonction du niveau d'une population de ravageurs, n'affecte pas les rendements. Cette procédure permet d'appliquer des insecticides moins souvent, d'autant plus que les insecticides détruisent l'entomofaune utile et par conséquent les insectes prédateurs (Altieri, 1999).

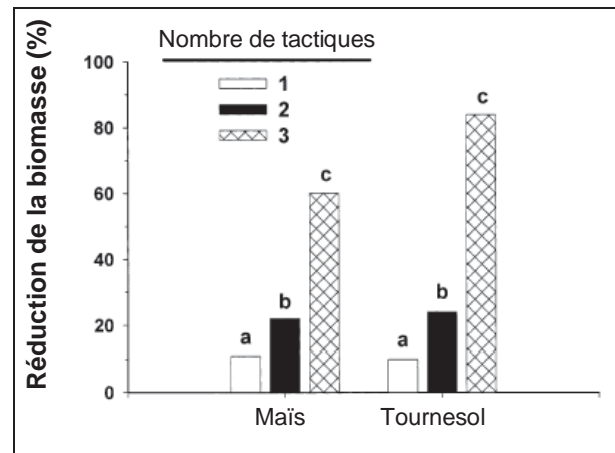
En combinant plusieurs méthodes non-chimiques, des effets synergiques peuvent se manifester (Nazarko *et al.*, 2005). Les travaux d'Anderson (2005) ont mis en évidence la synergie qui découle de l'application de plusieurs tactiques. Dans les cultures de maïs et de tournesol, la biomasse des plantes nuisibles a diminué de manière significative avec la combinaison de trois tactiques (figure 9).

L'utilisation conjointe du sarclage mécanique et de la technique du semis différé (faux-semis) dans la culture du maïs permet d'obtenir une densité de plantes nuisibles similaires à l'utilisation d'herbicides (Leblanc et Cloutier, 1996). En plus de réprimer les plantes nuisibles, le sarclage mécanique ameublisse le sol en brisant la croûte de battance et favorise ainsi l'aération du sol et son réchauffement. De ce fait, l'infiltration de l'eau est favorisée et l'humidité du sol peut être conservée. L'efficacité du sarclage augmente lorsque la densité de mauvaises diminue. Par contre, le sarclage est peu performant pour éliminer les plantes vivaces. Melander *et al.* (2005) précisent que le sarclage en pré-levée et post-levée est bénéfique. Les interventions

---

<sup>16</sup> Méthode décisionnelle qui a recours à toutes les techniques nécessaires pour réduire les populations d'organismes nuisibles de façon efficace et économique, tout en respectant l'environnement (comité d'expert en lutte intégrée).

ayant lieu à différentes périodes permettent une répression sur différentes cohortes d'adventices. Les effets ne sont pas synergiques mais plutôt cumulatifs.



Adapté d'Anderson (2005)

**Figure 9 - Synergie de plusieurs tactiques (augmentation de la densité des semis, application localisée d'engrais, implantation tardive des cultures) sur la réduction de la biomasse des plantes nuisibles dans le maïs et le tournesol**

Il faut préciser que le faux-semis ne s'applique pas bien aux cultures à cycle long qui nécessitent toute la saison de croissance pour atteindre la maturité. L'utilisation de la technique du faux-semis n'a pas affecté les rendements de la récolte. En revanche, l'ensemencement tardif du maïs a entraîné une augmentation du taux d'humidité du grain à la récolte, une situation pouvant élever les coûts liés au séchage du grain. Utiliser des hybrides plus hâtifs et récolter le plus tardivement possible sont deux solutions qui abaissent le taux d'humidité du grain à la récolte (Leblanc et Cloutier, 1996).

En substitut aux herbicides, le sarclage peut aussi être utile pour détruire une culture de couverture, mais le stade de développement est un paramètre essentiel pour la performance du sarclage (Teasdale et Rosecrance, 2003). Il y a un besoin de recherche et de développement concernant cette méthode mécanique, notamment sur les équipements pour les cultures en semis direct. Le développement d'outils adéquats pour le contrôle mécanique des cultures de couverture permettrait d'éliminer des épandages de pesticides et de réduire ainsi les risques de contamination.

Derkson *et al.* (2002) réfèrent à des résultats qui confirment la synergie entre les différentes tactiques utilisées dans la culture du maïs. Appliqués seuls, l'épandage d'engrais localisé, l'augmentation de la densité de plantation et l'utilisation de rangs étroits ont permis de réduire la biomasse des plantes nuisibles de 10 à 15 %. La combinaison des trois tactiques a permis de réduire la biomasse des plantes nuisibles de 70 %. D'ailleurs, la diminution des rendements du maïs en raison de la compétition des plantes nuisibles est inférieure avec l'adoption des trois tactiques contrairement aux traitements traditionnels.

#### 2.4.2 Biodiversité

L'intensification de l'agriculture et l'utilisation massive d'herbicides ont entraîné un appauvrissement des espèces de plantes nuisibles (Marshall *et al.*, 2003). Malheureusement, l'utilisation croissante d'herbicides à spectre large a des conséquences sur des taxons non ciblés



qui ont une fonction écologique, souvent mal connue, sur l'agroécosystème (Marshall *et al.*, 2001). Ces auteurs établissent un lien entre l'abondance et la diversité des mauvaises herbes avec l'abondance et la diversité des insectes et des oiseaux. Le régime alimentaire des insectes et des oiseaux dépend largement de la présence d'adventices (graines et biomasse végétale). Parallèlement, l'abondance et la diversité des insectes sont favorables aux populations d'oiseaux.

## 2.5 PGB des élevages et des effluents

Ces PGB concernent la nutrition, le contrôle des conditions d'élevages, le pâturage intensif, l'entreposage ainsi que le traitement des déjections. Le pâturage intensif permet d'améliorer la qualité des sols alors que la nutrition et les structures d'entreposage peuvent réduire la contamination de l'eau et préserver la qualité de l'air. Comme les autres catégories de PGB, cette catégorie inclut plusieurs PGB qui interagissent entre-elles.

### 2.5.1 Qualité de l'eau

#### La régie alimentaire et les rejets d'azote et de phosphore

La nutrition du cheptel doit tenir compte des besoins physiologiques des animaux afin d'améliorer la conversion alimentaire. Séparer les castrats des femelles est une pratique qui permet de modifier la composition de la moulée pour améliorer la conversion alimentaire. Ainsi, dans les élevages porcins, en adaptant la formulation des moulées en fonction de l'âge et du stade de production, les rejets peuvent être réduits de 2 % pour l'azote ainsi que de 2 à 5 % pour le phosphore (Turgeon, 2002). Le tableau 10 montre l'impact moyen des différentes pratiques alimentaires sur le contenu en azote et en phosphore du lisier.

Diverses pratiques telles que l'ajout de phytase, l'ajout d'acides aminés ou l'utilisation de trémies pour l'alimentation améliorent la conversion alimentaire de l'azote et/ou du phosphore. Comme le lisier est moins riche en azote et phosphore, il peut être épandu à plus forte dose. La réduction de la marge de sécurité, la qualité et le type d'aliments, la mouture des grains, le traitement thermique et le traitement des ingrédients pour éliminer les facteurs anti-nutritionnels sont tous des pratiques qui augmentent la conversion alimentaire.

**Tableau 10 - Impact moyen des différentes pratiques alimentaires sur le pourcentage de réduction de l'azote et du phosphore dans le lisier de porcs**

Pratiques	Réduction des rejets en élément (%)	
	N	P
Amélioration de la conversion alimentaire de 0,1	5	5
Ajout de phytase	2	25 à 35
Ajout d'acides aminés	8	-
Trémies <i>vs</i> alimentation au sol	4 à 7,5	4 à 7,5
Nombre de formulations		
Truies (2 <i>vs</i> 1)	2	5
Porcs (3 <i>vs</i> 2)	2	2

Adapté de Turgeon (2002)

### Traitements des fumiers et contamination microbienne

La digestion anaérobie du lisier permet d'abaisser le taux de microorganismes pathogènes dans le lisier de porcs (Côté *et al.*, 2006). L'entreposage pendant une certaine période permet aussi d'abaisser les populations de microorganismes pathogènes (Majdoub *et al.*, 2003).

### Les pâturages

Comme le travail réduit du sol, le pâturage intensif favorise l'accumulation du phosphore dans les couches superficielles du sol, puisqu'il est impossible d'incorporer les déjections. Les risques de contamination par des organismes pathogènes et aussi par du phosphore dissous sont importants. Le pâturage intensif favorise également la formation de macropores qui accélèrent le drainage et peut mener au lessivage des nutriments solubles. En revanche, les risques de ruissellement ainsi que de pertes de sédiments et de nutriments non solubles sont moindres.

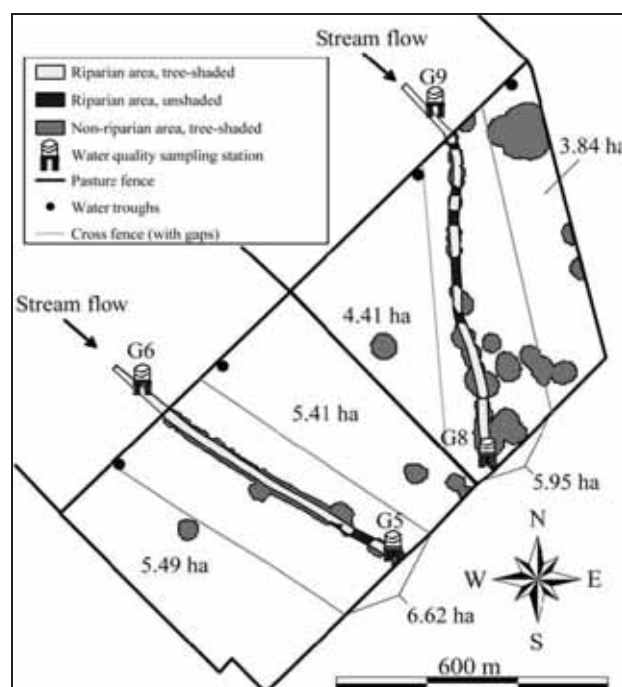
En évitant le surpâturage, l'érosion hydrique est réduite et la qualité de l'eau est améliorée indirectement. L'implantation de clôtures contrôlant les déplacements du bétail et limitant les aires de pacage permet d'éviter le surpâturage, et en conséquence, de diminuer les risques d'érosion éolienne et hydrique liés à la disparition du couvert végétal. La densité accrue des semis, la fertilisation fractionnée de l'azote, la rotation des pâturages et le respect de la densité optimale des animaux au pâturage sont des pratiques qui favorisent l'uniformité des prairies, une croissance plus rigoureuse des plants et une augmentation de la productivité à l'hectare (DeRamus *et al.*, 2003). Le pâturage intensif est donc une pratique à privilégier car la croissance des végétaux, et par conséquent la couverture du sol, est maximale. D'autres pratiques de gestion peuvent aussi influencer directement la qualité de l'eau tel que le retrait des animaux à proximité des cours d'eau.

En Georgie (USA), Byers et ses collaborateurs (2005) ont étudié pendant trois ans la qualité de l'eau de surface de deux pâturages bovins non clôturés ayant différents patrons de distribution spatiale de l'ombre (figure 10 et tableau 11). Des abreuvoirs permettant de mesurer la consommation d'eau des animaux ont été installés et des clôtures ont été construites dans chacun des champs afin d'alterner le pacage entre la zone près du cours d'eau et la zone éloignée du cours d'eau. Ces clôtures permettaient aux animaux l'accès au cours d'eau.

**Tableau 11 - Distribution des patrons spatiaux d'ombre**

	Pâturage (m <sup>2</sup> )	
	G5G6	G8G9
Aire d'ombre en zone non ripicole	6425	18523
Aire d'ombre en zone ripicole	4212	5010
Aire d'ombre totale	40637	23553
Zone ripicole	4931	6406
Pâturage (ha)	17.52	14.20

Tiré de Byers *et al.* (2005)



Tiré de Byers *et al.* (2005)

Figure 10 - Distribution spatiale de l'ombre de deux pâturages

Les résultats montrent que même sans clôtures restreignant l'accès des animaux aux cours d'eau, il est possible de réduire l'accès au cours d'eau en introduisant des zones d'ombre loin du cours d'eau (zone non ripicole). Ainsi, la contamination engendrée par le piétinement et la défécation des bêtes est significativement moins élevée (tableau 12).

Tableau 12 - Débit, concentration et charge de phosphore réactif dissous (PRD), de phosphore total (PT), de matière en suspensions (MES) et d'*E.Coli*

Variable	Pâturage		Différence	
	G5G6	G8G9	G5G6 - G8G9	
	Concentration médiane en période de crue			
PRD (mg/l)	0,050	0,036	0,026	P >  s
PT (mg/l)	0,64	0,42	0,23	0,047
MES (mg/l)	507	218	58	0,076
	Charge médiane en période d'étiage			
PRD (g/j)	2,91	2,77	2,87	0,07
PT (g/j)	98,2	104,8	-3,3	0,84
MES (kg/j)	16,6	37,4	-12,4	0,04
<i>E.Coli</i> (CFU/j)	1,4x10 <sup>9</sup>	2,5x10 <sup>9</sup>	-2,5x10 <sup>9</sup>	0,01
Débit (m <sup>3</sup> /j)	641	622	97	0,94

CFU : cellules souches unipotentes

Tiré de Byers *et al.* (2005)

En période de crue, le champ ayant moins d'ombrage (G5G6) a davantage contribué aux charges en sédiments (507 mg/l) et en nutriments (PT : 0,64 mg/l; PRD : 0,050 mg/l) dans le cours d'eau que le champ G8G9 (MES : 218 mg/l; PT : 0,42 mg/l; PRD : 0,036 mg/l). Selon les auteurs, ces différences d'exportation seraient dues au comportement du bétail qui passerait

plus de temps dans la zone ripicole du champ G5G6 puisque ce pâturage possède trois fois moins d'ombre en zone non ripicole que le champ G8G9.

En période d'étiage, les différences de charge en PRD étaient significativement plus élevées en provenance du champ G5G6. Toutefois, contrairement aux résultats en période de crue, les charges en PT, MES et *E.Coli* du champ G8G9 pendant la période d'étiage étaient plus élevées. Cette exportation plus forte du champ le plus ombragé était probablement due au fait que le cours d'eau de ce dernier comportait une « piscine » où le bétail demeurait pendant de longues périodes, augmentant ainsi la probabilité de défécation et de suspension des sédiments. Dans cette étude, la mise en place d'abreuvoirs éloignés du cours d'eau (80 à 90 mètres) a permis de réduire les charges de PRD, PT, MES et *E.Coli* respectivement de 85, 57, 95 et 95 % par rapport à la consommation directe dans le cours d'eau.

Toutefois, malgré les réductions importantes des concentrations et des charges médianes des contaminants avec un meilleur agencement des zones ombragées ou la mise en place d'abreuvoirs, les concentrations observées en contaminants (PT : 0,42 – 0,64 mg/l et *E.Coli* :  $1.4 \times 10^9$  -  $2.5 \times 10^9$  CFU/j) dépassent largement les critères de qualité de l'eau de surface du Québec (PT : 0,03 mg/l) ou des eaux utilisées à des fins récréatives au Canada (*E.Coli* : 200 CFU/100 ml). L'importance de restreindre l'accès aux cours d'eau par la mise en place de clôtures, en combinaison avec d'autres éléments de gestion des élevages, demeure cruciale pour restreindre les risques de contamination de l'eau. Dans la même logique, les haies brise-vent apportent de l'ombre et peuvent contribuer à éloigner les animaux des cours d'eau. Cependant, l'effet bénéfique des aires ombragées localisées dans les zones non ripicoles risque d'être moins important dans des climats plus froids que celui de la Georgie.

## 2.5.2 Qualité de l'air

### La régie alimentaire et les émissions d'odeurs et de gaz à effet de serre

La régie adéquate de la nutrition des animaux peut non seulement améliorer la conversion alimentaire, mais aussi contrôler les émissions d'odeurs et de gaz à effet de serre (GES). La fermentation des aliments dans le système digestif des ruminants est le principal responsable de l'émission de méthane ( $\text{CH}_4$ ). Peu de  $\text{CH}_4$  provient de l'entreposage et de l'épandage des fumiers. L'objectif d'une bonne régie alimentaire à l'égard des GES est d'améliorer la conversion alimentaire afin de réduire la quantité de nourriture ingérée et la fermentation (Leng, 1993; Monteny *et al.*, 2006).

Des chercheurs de l'IRDA (Godbout *et al.*, 2000) ont mis en évidence l'effet positif de l'aspersion d'huile de canola combiné à une régie alimentaire particulière, sur la réduction des odeurs. D'une part, l'aspersion de l'huile de canola diminue la concentration des poussières (90 %) et les odeurs véhiculées par les particules en suspension dans l'air. D'autre part, l'ajout d'acides aminés dans l'alimentation et la proportion accrue d'hydrates de carbone fermentables réduit l'excédent d'azote, dont l'ammoniac, dans les déjections. Notons que les poussières sont générées par les matières fécales séchées. Ces deux PGB agissent ensemble pour réduire l'émission des odeurs mais ont peu d'impacts sur les GES.

### Le pâturage intensif et les émissions de méthane

Le pâturage intensif, considéré ici comme étant une seule PGB regroupant plusieurs pratiques, constitue un moyen efficace de réduire la production de méthane ( $\text{CH}_4$ ). Le surpâturage mène généralement à une dégradation de la qualité des prairies et affecte par conséquent la qualité de

l'alimentation, la conversion alimentaire et la production de CH<sub>4</sub>. D'ailleurs, la pression sur les pâturages peut être augmentée sans causer de dommages permanents aux prairies. Le pâturage intensif réduit l'émission de CH<sub>4</sub> des troupeaux; en optimisant la prise alimentaire mais aussi en accélérant les cycles de reproduction comparativement aux animaux en surpâturage.

#### Les traitements

Le traitement des déjections animales permet de réduire les odeurs et les émissions de GES. Le méthane, émis par le processus de digestion anaérobie, peut être récupéré pour produire de l'énergie (Monteny *et al.*, 2006), ce qui réduit la consommation d'énergie fossile. En ajoutant de l'amidon, la production de biogaz est supérieure (Clemens *et al.*, 2006), à condition de respecter le temps de résidence minimal du lisier dans le .

La couverture des structures d'entreposage contrôle les émissions d'ammoniac (NH<sub>3</sub>) Elle contrôle aussi de 50 à 100 % les odeurs et augmente la capacité d'entreposage de 15 à 35 %, selon les précipitations et à la dimension de la fosse (Pouliot, 2002). En réduisant les pertes de NH<sub>3</sub> reliées aux odeurs, environ de 5 à 10 % d'azote total est disponible. Ainsi, en augmentant généralement la concentration en éléments nutritifs des lisiers, les coûts d'épandage sont réduits. Toutefois, l'acidification du lisier (pH < 6) avec de l'acide lactique ou du saccharose prévient l'incrustation et réduit les émissions de CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O (Berg *et al.*, 2006).

### **2.5.3 Biodiversité**

#### Les pâturages

Le broutage permet de contrôler la dispersion des espèces les plus vigoureuses, comme la fétuque scabre. Dans un parcours où un broutage modéré est effectué, la dominance des espèces les plus compétitives est réduite et permet aux espèces moins vigoureuses, comme les agropyres ou les stipes, de se disperser sur les parcelles (AAC: [http://www.agr.gc.ca/pfra/biodiversity/grazing\\_f.htm](http://www.agr.gc.ca/pfra/biodiversity/grazing_f.htm)).

Certains oiseaux, comme la chevêche des terriers et la plupart des oiseaux de proie, sont associés aux zones de surpâturages (AAC: [http://www.agr.gc.ca/pfra/biodiversity/grazing\\_f.htm](http://www.agr.gc.ca/pfra/biodiversity/grazing_f.htm)). Ces oiseaux préfèrent les endroits jouissant d'une vue sans obstacles. Dans une étude sur les facteurs associés à la sélection des lieux de nidification et de perchage des populations de chevêches des terriers, Poulin *et al.* (2005) ont noté que 83 % des nids se trouvaient dans les zones de pâturages, alors que ceux-ci ne représentaient que 7 % du territoire et que seulement 3 % des nids étaient situés sur les terres cultivées (90 % du territoire). De plus, ces oiseaux préféreraient les zones à forte densité de terriers (11.1 terriers/ha), construits de préférence par les spermophiles de Richardson et les blaireaux américains, parce que les dimensions sont adéquates. Le choix des pâturages et une gestion adéquate du bétail peuvent donc contribuer à la diversification animale sur le territoire agricole.

La composition végétale influence le nombre d'individus et les espèces retrouvées dans les bandes riveraines. Dans une étude visant à évaluer l'importance de six types de bandes riveraines (pâturages, herbacées graminoides, herbacées non-graminoides, arbustaias basses, arbustaias hautes et boisées) pour la conservation des oiseaux, Deschênes *et al.* (1999) ont observé plus de 870 oiseaux faisant partie de 48 espèces non-aquatiques. La plupart des espèces retrouvées dans les arbustaias et les lisières boisées étaient insectivores, et donc susceptibles d'effectuer un contrôle biologique des insectes nuisibles au champ. Enfin, même si

le nombre total d'individus appartenant à des espèces considérées comme nuisibles pour les cultures étaient plus élevé dans les bandes arbustives hautes et les boisées, peu d'oiseaux se retrouvaient dans les cultures.

## 2.6 PGB de l'aménagement du parcellaire

Ces PGB d'aménagements du parcellaire agricole visent la réduction du ruissellement, de l'érosion hydriques et des pertes de contaminants. Elles sont généralement complémentaires aux autres types de PGB. En agissant physiquement ou chimiquement sur l'eau, ces aménagements permettent de réduire la migration des contaminants vers le cours d'eau.

Les aménagements se répartissent en trois groupes principaux :

1. Aménagements visant la réduction du ruissellement et l'érosion hydrique  
Ceux-ci peuvent être effectués à la ferme (déviation de l'eau en amont des bâtiments), au champ ou à l'interface des parcelles et des cours d'eau.  
=> voies d'eau engazonnées, avaloirs, bassins de sédimentation, bandes riveraines (enherbées, arbustives et arborées), stabilisation des berges et des talus, contrôle de l'irrigation, mise en place de terrasse ou de zones humides.
2. Aménagements destinés à limiter l'érosion éolienne  
=> haies brise-vent (parfois clôtures brise-vent)
3. Aménagements concernant les voies d'accès pour les véhicules ou les animaux  
=> clôtures qui limitent l'accès des animaux aux cours d'eau; amélioration des voies d'accès ou des ponts pour la machinerie agricole et le bétail.

### 2.6.1 Qualité de l'eau

#### Structure de contrôle pour l'érosion hydrique

Les aménagements qui contrôlent l'érosion hydrique agissent comme une barrière physique qui ralentit la vitesse d'écoulement du ruissellement et réduit ainsi son pouvoir érosif. Par exemple, les avaloirs au champ, en retenant l'eau dans de petites cuvettes, favorisent une meilleure infiltration de l'eau dans le sol et permettent la sédimentation des particules de sol et des nutriments adsorbés. D'autres aménagements, comportant une barrière végétale, tels que les voies d'eau engazonnées ou les bandes riveraines, en plus d'offrir une barrière physique qui favorise l'infiltration et la sédimentation, agissent aussi au niveau chimique et biologique car le système racinaire de la végétation absorbe une partie des nutriments. Ces aménagements végétaux ont cependant une capacité de rétention limitée et leur mise en place n'élimine pas le besoin d'adopter des pratiques de conservation dans les champs (Lemunyon (1991) cité par CCSE, date inconnue).

#### Les bassins sédimentation

Les bassins de sédimentation visent à réduire l'érosion du sol. Ils interceptent l'eau, les sédiments et les contaminants associés aux sédiments lors d'événements pluvieux. En captant et en retenant l'eau de ruissellement un certain temps, ces bassins permettent de réduire la vitesse d'écoulement de l'eau et de diminuer le ravinement et l'érosion de berges (CCSE, date inconnue). Ils favorisent aussi le dépôt des sédiments et des contaminants dans le fond de la

cuvette et évitent que ceux-ci n'atteignent le cours d'eau. Drainant généralement des superficies de 2 à 30 ha., ces structures sont conçues pour déposer de 70 à 80 % des particules dans un délai de 24 à 40 heures et évacuer toute l'eau en 72 heures. Encore une fois, la réduction du ruissellement, de l'érosion et des exportations de nutriments en provenance du champ par d'autres pratiques de conservation est une condition qui assure le fonctionnement optimal et à long terme des aménagements hydro-agricoles.

### Les marais filtrants

Les marais filtrants artificiels constituent filtrent les contaminants qui sont exportés des parcelles par ruissellement. L'immaturation du marais et la période de l'année peuvent limiter la capacité filtrante (La Flamme *et al.*, 2004). À l'automne, la sénescence des végétaux nuit à la performance de filtration. Malgré tout, sur une base annuelle, les marais filtrants ont réduit la concentration médiane en orthophosphates, en phosphore total et en phosphore biodisponible de 48, 14 et 38 % respectivement (La Flamme *et al.*, 2004). Casey et Klaine (2001) ont quant à eux obtenu une atténuation moyenne de 80 % pour les  $\text{NO}_3^-$  et de 74 % pour les  $\text{PO}_4$ . Ces auteurs ont identifié la dénitrification des  $\text{NO}_3^-$  et la sorption des  $\text{PO}_4$  sur les colloïdes comme principal mécanisme de décontamination. Il y a lieu de s'interroger sur l'efficacité filtrante à long terme du phosphore en raison de la saturation graduelle du marais.

Selon Goupil (1995 et 1996), le marais filtrant, combiné à une bande riveraine, réduit les exportations de sédiments et de contaminants, ce qui permet une diminution de la largeur de la bande riveraine. Les marais pourrait aussi court-circuiter le drainage souterrain. L'efficacité du marais est réduite durant la fonte de neige, pendant la période hivernale ou lorsqu'il se produit des pluies intenses (Tyson, 1996; Simeral, 1998). C'est généralement pendant ces périodes que de grandes quantités de nutriments sont exportés des terres agricoles. Mitsch et Gosselink (1986; cité par Hillbricht-Ilkowska *et al.*, 1996) ont observé des réductions de l'ordre de 24 à 97 % pour le phosphore et de 38 à 95 % pour l'azote dans les marais. Toutefois, ils ont noté que les marais en zone ripicole sont plutôt des "transformateurs" de nutriments que des "puits". En fait, les marais sont des importateurs des formes inorganiques et des exportateurs de formes organiques de nutriments.

En 2000, Uusi-Kampaa *et al.* ont publié les résultats de plusieurs études traitant de l'effet des bandes tampons, des marais filtrants et des étangs sur la réduction de la pollution diffuse en Scandinavie. Les concentrations à l'entrée des marais et des étangs variaient de 0,1 à 0,6 mg P/L, 0,08 à 0,4 mg P/L et de 0,05 à 1,1 mg P/L en Norvège, en Suède et en Finlande respectivement. Les taux de rétention du phosphore particulaire et dissous, variables selon les sites, oscillaient entre 2 et 116 g P total/m<sup>2</sup> annuellement. Les taux de rétentions observés aux marais (41 %) étaient généralement supérieurs à celles observées dans les étangs (17 %), probablement parce que la profondeur des marais était moindre et que la végétation y était plus dense. Dans une revue bibliographique sur les effets des mesures de réduction du phosphore, Kronvang *et al.* (2005) notent cependant que la littérature internationale sur les zones inondables indique que ces zones peuvent représenter une source autant qu'un puit pour le phosphore. La charge hydraulique et la saturation des sols sont des paramètres importants pour la rétention et le relargage du phosphore sur les terres inondées (Peterjohn et Correl, 1984; Richardson, 1985).

### Bandes riveraines

Souvent évoquée comme étant une méthode efficace et relativement peu coûteuse pour diminuer les exportations de sédiments, de nutriments et d'autres polluants (Dillaha *et al.*, 1986, Lowrance *et al.*, 2002), la bande enherbée est probablement l'aménagement le plus étudié.

Plusieurs articles scientifiques ou vulgarisés font d'ailleurs état de leur efficacité à retenir et emmagasiner divers contaminants (tableau 13). On constate une grande variabilité dans la réduction de la pollution diffuse selon les paramètres concernés. Les études traitant des bandes enherbées sont pour la plupart effectuées dans un environnement fermé. C'est-à-dire que les parcelles sont ceinturées d'une paroi qui empêche le ruissellement de s'écouler en dehors de la bande filtrante. De plus, les mesures sont parfois effectuées sous précipitations simulées. À l'échelle du bassin versant, ces conditions idéales, menant à un écoulement laminaire du ruissellement, sont improbables. Parfois, les conditions expérimentales peuvent expliquer les performances exceptionnelles des bandes riveraines.

Patty *et al.* (1997) ont étudié la filtration des pesticides à travers des bandes riveraines de 6, 12 et 18 mètres. La sorption sur les colloïdes constitue le principal mécanisme et prolonge la période où les pesticides sont dégradables par les microorganismes. En général, les auteurs ont constaté qu'environ 0,7 % de la dose appliquée était perdu par ruissellement. Par contre, entre 2 et 17 % de la dose appliquée migrait vers la bande riveraine lorsqu'une pluie survenait après l'épandage. Les nitrates et le phosphore soluble ont été réduit de 47 à 100 % et de 22 à 89 % respectivement.

La capacité de filtration d'une bande riveraine dépend de l'épaisseur de la lame d'eau de ruissellement (Duchemin et Majdoub, 2004). Si celle-ci est supérieure à la hauteur de la végétation de la bande riveraine (surtout au printemps, lorsque la végétation est absente), l'efficacité sera moindre. La formation de voies d'écoulement préférentiel contribue à rendre une portion de la bande inefficace (Dosskey *et al.*, 2002), en plus d'augmenter l'épaisseur de la lame de ruissellement à des endroits précis de la bande.

**Tableau 13 - Efficacité des bandes riveraines à réduire la pollution diffuse sous pluies naturelles**

Référence	Largeur de la bande (m)	Paramètres	Réduction (%)
Arora <i>et al.</i> (1996)	20,1	Sédiment	40-100
		Atrazine	11-100
		Métolachlore	16-100
		Cyanazine	8-100
		Eau	9-98
Robinson <i>et al.</i> (1996)	3,0 - 9,1	Sédiment	70-85
Lowrance <i>et al.</i> (1997)	8,0	Atrazine	79
Sheridan <i>et al.</i> (1999)	8,0	Sédiment	78-83
		Eau	56-72
Uusi-Kämpä <i>et al.</i> (2000)	10	P total	27-38
		P dissous	(-64)1-14
		Eau	
Duchemin <i>et al.</i> (2002)	3,0 - 9,0	Eau	48-56
		Sédiment	87-90
		P total	85-87
		P dissous	(-41)1-(-57)1
		P biodisponible	78-81
		N- NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	85-96
		N- NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	38-44
		N total	69-76
		Atrazine	50-99
Metolachlore	55-98		

Les valeurs entre les parenthèses sont des augmentations.

Adapté de Duchemin et Majdoub (2004)



La saturation de la bande riveraine en sédiments peut entraîner un dépassement de la capacité de rétention (Damboise *et al.*, 2001). Cette situation est vraie aussi pour les contaminants adsorbés sur les sédiments qui saturent la bande. Dans ce cas, la bande peut devenir une source de contaminant (Dillaha et Inandar, 1997). L'accumulation de sédiments dans les premiers mètres d'une bande témoigne d'une érosion excessive et peut inciter le ruissellement à s'écouler dans des voies préférentielles. Krutz *et al.* (2005) précisent d'ailleurs que l'accumulation des sédiments à la jonction du champ et de la bande riveraine peut limiter la filtration des pesticides liés aux sédiments.

#### Aménagements combinés

Les combinaisons de PGB d'aménagement du parcellaire sont fréquemment citées dans la littérature. Lowrance *et al.* (2002) ont effectué une revue des connaissances acquises concernant les bandes riveraines associées à d'autres PGB. Dans cette publication, les auteurs affirment que les bandes riveraines ont une meilleure efficacité lorsqu'on les combine avec d'autres aménagements tels les marais filtrants, les terrasses, la végétalisation des cours d'eau, les bassins de sédimentation, les structures de stabilisation et les étangs de ferme ou les marais en cours d'eau. Les auteurs affirment qu'une bande de six mètres en prairie naturelle filtre plus de 75 % des sédiments et plus de 40 % du phosphore total, de l'azote total, des nitrates et des phosphates. Lorsque 10 mètres de bandes boisées additionnels sont mis en place, l'efficacité de rétention peut atteindre plus de 90 % pour les sédiments et plus de 80 % pour les nutriments.

#### *Effet combiné des bandes riveraines et des structures de captage*

La mobilité du phosphore (P) dans le bassin versant (11 km<sup>2</sup>) du ruisseau au Castor, un tributaire agricole de la rivière aux Brochets, a fait l'objet d'une analyse mettant en relation les débits et la qualité de l'eau mesurés à l'exutoire avec les caractéristiques des systèmes de production agricole et du paysage. Parallèlement au suivi agroenvironnemental, le bassin versant a fait l'objet d'une action concertée des propriétaires riverains, ciblée sur le contrôle du ruissellement de surface au moyen de structures de captage, l'aménagement systématique de bandes riveraines le long de la branche principale du ruisseau, de même que de la mise à jour des programmes de fertilisation et des modes de gestion des engrais de ferme. Malgré une importante variabilité inter-annuelle dans le comportement hydrologique du bassin versant, l'analyse de covariance des concentrations en phosphore indique une réduction significative de 25 % des concentrations en P total en période de crues du ruisseau entre la période de référence (1997-1999), précédant les interventions agroenvironnementales et deux périodes successives d'évaluation (1999-2001 et 2001-2003). L'influence des aménagements sur la dynamique du ruissellement et la mobilité du P est associée au laminage des crues engendrant le ruissellement de surface et au bris de la connectivité hydrologique entre les champs agricoles et le ruisseau. L'action complémentaire des bandes riveraines et des structures de captage aurait ainsi favorisé l'écoulement hypodermique et la sédimentation du P particulaire en amont du réseau hydrographique.

Les efficacités de piégeage respectives de la bande riveraine et des fossés-avaloirs sont non seulement tributaires de leur effet respectif sur la lame d'eau ruissellée, mais aussi des proportions relatives du parcellaire en culture qui s'égouttent vers la bande ou vers le fossé-avaloir. Dans un autre bassin versant expérimental (celui du Ruisseau Walbridge de 6 km<sup>2</sup>), la modélisation haute précision des cheminements hydrologiques de surface a permis d'établir que 33 % du parcellaire en culture de ce petit bassin se draine vers les talus du cours d'eau, alors que la majeure partie (67 %) s'égoutte vers les fossés de drainage (Duguet *et al.*, 2002; Michaud *et al.*, 2004). Sur cette base, le coefficient d'efficacité de piégeage (CEP) global, estimé

à 25 % à l'échelle du bassin versant, peut être fractionné en deux composantes, soit des CEP de 9 % pour les bandes riveraines aménagées en bordure du cours d'eau et de 16 % pour les fossés-avaloirs.

## 2.6.2 Qualité de l'air

### Haies brise-vent

Les haies brise-vent, tout comme les bandes riveraines, particulièrement les bandes arbustives et boisées contribuent à la qualité de l'air.

En réduisant la vitesse du vent elles captent les particules en suspension et contribuent à diminuer le déplacement des odeurs associées aux bâtiments d'élevages. La végétation agit comme un filtre qui absorbe les odeurs. Les composés causant les odeurs peuvent alors être dégradés, avant qu'ils n'atteignent les zones habitées (Pelletier *et al.*, 2004). Selon Vézina (2005), les haies brise-vent ont le potentiel de réduire du tiers la superficie du panache d'odeur et de diluer les odeurs par un facteur de trois, en plus de capter jusqu'à 40 % du volume de poussières.

Les haies brise-vent servent aussi de puits de carbone (Brandle *et al.*, 2004). En 40 ans, un kilomètre de haie brise-vent peut séquestrer jusqu'à 300 tonnes de carbone.

## 2.6.3 Biodiversité

### Bandes riveraines et haies brise-vent

L'implantation de bandes riveraines en milieu agricole est souvent limitée par la crainte des agriculteurs que ces zones puissent contribuer à la prolifération d'espèces végétales ou animales nuisibles aux cultures. Plusieurs études se sont donc attardées à recenser les espèces retrouvées dans ces zones tampons. Deschênes *et al.* (1999) ont évalué les espèces et le nombre d'oiseaux retrouvés dans les bandes riveraines de la rivière Boyer au Québec. Les résultats ont démontré que les bandes riveraines, arbustives ou boisées, favorisent la présence d'oiseaux insectivores qui peuvent contribuer à la lutte biologique. Les bandes riveraines peuvent aussi abriter des espèces d'oiseaux nuisibles aux cultures, tel le carouge à épauettes. Rappelons que, d'après cette étude, même si le nombre total d'individus d'espèces considérées comme nuisibles pour les cultures était plus élevé dans les bandes arbustives hautes et les boisées, peu d'oiseaux se retrouvaient dans les cultures.

Toujours dans le bassin versant de la rivière Boyer, Paquet et Maisonneuve (2004) ont étudié la fréquentation des bandes riveraines par les petits mammifères et l'herpétofaune (amphibiens et reptiles). En terme de biodiversité, les haies brise-vent ont les mêmes effets que les bandes riveraines arborées. Les auteurs soulignent aussi la crainte des agriculteurs face à la présence d'ennemis des cultures. Ils notent cependant que la proportion d'espèces pouvant être dommageables aux cultures varie grandement selon le type de bande. Alors que les bandes herbacées comptaient 10 % d'espèces nuisibles, les bandes arbustives en comptaient 5 % et les bandes boisées seulement 3 %. La proportion de rongeurs était plus élevée dans les bandes boisées (61 %) et arbustives (52 %) comparativement aux bandes herbacées, mais les espèces rencontrées étaient différentes. Ainsi, le campagnol des champs et la souris commune, deux espèces considérées comme nuisibles, sont davantage retrouvés dans les bandes herbacées.

Les bandes riveraines peuvent aussi servir de brise-vents et fournir une protection à l'entomofaune. La réduction de la vitesse du vent par la végétation crée un microclimat, dans la zone d'action du vent, favorable à l'implantation de populations d'insectes (Goupil, 1995, cité dans Marineau, 1999). Les turbulences créées par l'effet du brise-vent contribuent à augmenter la dispersion des insectes qui s'établissent dans les zones d'abris et favorisent ainsi leur colonisation.

Même si les bandes enherbées contiennent deux fois plus d'espèces nuisibles que les bandes arbustives et boisées, les bandes riveraines sont peu propices aux espèces nuisibles aux cultures. Non seulement les espèces nuisibles sont moins abondantes dans les bandes riveraines arbustives et boisées, mais le nombre d'espèces insectivores, capable d'effectuer un contrôle biologique des insectes nuisibles aux cultures, est supérieur (Paquet et Maisonneuve, 2004). Le pourtour des parcelles peut abriter des ennemis naturels et favoriser leur dissémination dans le champ. L'organisation du pourtour des parcelles devrait par conséquent s'effectuer en fonction de la migration des ennemis naturels, en reliant les habitats par des corridors fauniques (Altieri, 1999).

L'effet de l'aménagement du parcellaire agricole sur la biodiversité s'effectue principalement par l'introduction dans les champs d'un habitat favorable à certaines espèces. Les effets des aménagements hydroagricoles, tels que les bandes riveraines et les marais, ont un effet sur la biodiversité des animaux. Paquet et Maisonneuve (2004) ont évalué la fréquentation de la bande riveraine en milieu agricole. D'un point de vue faunique, la bande riveraine, tout comme les haies brise-vent servent de couloir de déplacement entre les boisés et évitent l'isolement des populations, le déclin et la disparition d'espèces fauniques. Au Québec, près de 271 espèces ont été associées au milieu riverain (Gratton, 1989). Dans leur étude, Paquet et Maisonneuve (2004) ont recensé 20 sites représentant 3 600 mètres de bandes herbacées, arbustives ou boisées. L'étude a permis de capturer 1 460 mammifères (14 espèces) et 329 spécimens d'herpétofaune (11 espèces) dans les trois types de bande. Les résultats ont montré une augmentation graduelle de l'abondance et de la richesse des captures de micromammifères de la bande enherbée à la bande arbustive (tableau 14). L'abondance des captures des spécimens d'herpétofaune augmentait en fonction de l'étagement, mais la diversité était supérieure dans les bandes arbustives.

**Tableau 14 - Abondance et diversité des communautés de micro mammifères et d'herpétofaune selon le type de bande riveraine**

	Bandes herbacées	Bandes arbustives	Bandes boisées
<u>Micromammifères</u>			
Nombre total d'individus capturés	344	496	620
Nombre total d'espèces capturées	11	12	14
<u>Herpétofaune</u>			
Nombre total d'individus capturés	35	89	205
Nombre total d'espèces capturées	8	11	8

Tiré de Paquet et Maisonneuve (2004)

Les bandes riveraines ont comme but principal de filtrer les sédiments et les polluants qui ruissellent des champs agricoles vers les cours d'eau. En réduisant les apports de sédiments et

de nutriments, les bandes riveraines contribuent à réduire l'eutrophisation des cours d'eau et à maintenir la biodiversité. Par ailleurs, les bandes riveraines arbustives et boisées offrent au cours d'eau de l'ombrage qui permet de régulariser la température. Sans végétation, la température du cours peut être supérieure de 2 à 10°C. Cette augmentation de la température de l'eau peut être néfaste à certaines espèces de poissons, comme les truites et les saumons, puisque la concentration en oxygène dissous diminue lorsque la température augmente (Belt *et al.*, 1992). En filtrant les sédiments en provenance des terres agricoles, les bandes riveraines évitent aussi que les sites de fraye des poissons soient ensevelis et que les œufs soient asphyxiés (AAC: [www.agr.gc.ca/pfra/land/shorelds.htm](http://www.agr.gc.ca/pfra/land/shorelds.htm)). De plus, la présence de végétation près des cours d'eau est une source importante d'éléments nutritifs et d'abris (CCSE, date inconnue).

#### Drainage et dimensionnement des parcelles

L'augmentation de la dimension des parcelles entraîne une modification du réseau hydrographique. En affectant la diversité et la densité du réseau hydrographique, on diminue le captage par les fossés. Le morcellement de la lame de ruissellement est donc réduit. Sans barrière physique, la vitesse de l'écoulement est augmentée ainsi que sa capacité de transport. Dans ce contexte, peu importe les pratiques de conservation, l'efficacité de filtration de la végétation riveraine est compromise.

Au Québec, près de 30 000 km de cours d'eau ont été reprofilés depuis 1940, afin d'améliorer le drainage et la configuration des terres agricoles (Beaulieu, 2001). Ce réaménagement agricole a cependant eu un effet néfaste sur les habitats fauniques, spécialement ceux du poisson (Dumas *et al.*, 2004). La disparition des méandres des cours d'eau, des seuils, des fosses, des dépressions humides et de la végétation aquatique a grandement réduit la diversité des habitats et appauvri la biodiversité en milieu agricole. Afin de redresser la situation, des aménagements fauniques en milieu agricole sont désormais mis en place.

Par exemple, Dumas *et al.* (2004) font état d'un projet visant l'intégration de l'entretien des cours d'eau agricoles et l'aménagement faunique dans un bassin versant (ruisseau du marais Noir) situé dans les plaines inondables de la vallée du Saint-Laurent. Ces aménagements fauniques visent à rétablir des conditions permettant la migration, la reproduction, l'élevage et l'alimentation de certaines espèces, comme la perchaude et le grand brochet. Les aménagements consistent à reprofiler les talus des terres agricoles en pentes plus douces, à enlever les sédiments des cours d'eau, à revégétaliser les zones dénudées des cours d'eau, à instaurer des bandes riveraines de 3 à 40 m selon la topographie, à installer des avaloirs à certaines sorties de fossés et à remplacer certains ponceaux. Quoique les résultats en terme de biodiversité ne soient pas encore disponibles, les interventions ont permis de construire des habitats aquatiques favorables aux frayeurs hâtifs (grand brochet et perchaude) ainsi qu'une mosaïque de boisés profitant aux amphibiens, aux rats musqués, aux oiseaux et aux petits mammifères.

### 3 COMBINAISONS DE PGB

Ce chapitre présente catégorie par catégorie, les effets sur le milieu (sol, eau, air, biodiversité) des différentes combinaisons de PGB de la catégorie concernée avec celles des autres catégories. Pour ne pas surcharger le texte, les combinaisons de catégories ne sont présentées qu'une seule fois, selon l'ordre de présentation des catégories de PGB adopté dans ce document. Les *effets d'interaction* recueillies dans la littérature concernent généralement la mise en œuvre de PGB, mais certaines combinaison de trois PGB sont également présentées au fil du texte.

#### 3.1 PGB du travail du sol

##### 3.1.1 Combinaisons de PGB : Travail du sol et couvert végétal

Dans une perspective de gestion, les **rotations des cultures** augmentent la faisabilité technico-économique de la culture sur résidus. En diversifiant les types de culture, les opportunités de modifier les pratiques culturales ou de convertir uniquement une portion des parcelles en travail réduit sont supérieures comparativement aux monocultures. Les échecs économiques reliés à la culture sur résidus en raison des conditions climatiques, d'une gestion déficiente, de la prolifération d'un ennemi des cultures ou d'une baisse de rendements peuvent être amenés par l'inclusion de rotations dans l'agroécosystème.

D'après Zentner *et al.* (2002), le travail réduit et les rotations sont des pratiques économiquement viables dans la zone des prairies canadiennes où prédominent les sols noirs et gris (selon le système canadien de classification des sols). Ce n'est pas le cas, en revanche, dans les zones de sols bruns et brun foncé. De plus, les occasions économiques qu'y offrent la diversification des cultures par les pratiques de conservation sont limitées. Notons que l'analyse ne considère les avantages économiques pour les producteurs qu'à court terme. D'après Zentner *et al.* (1996), le semis direct est profitable pour les systèmes en rotations alors que le labour est préférable en monocultures.

##### Qualité des sols

Les engrais verts et le travail réduit interagissent et augmentent le niveau de matière organique des sols. Plusieurs études ont démontré une amélioration de la qualité physique, chimique et biologique du sol en implantant une culture de couverture dans les systèmes de production en semis direct. L'amélioration des propriétés biologiques et biochimiques s'explique par l'accumulation de carbone organique à la surface du sol (Mullen *et al.*, 1998). Même en semis direct, la présence des résidus de culture est un facteur déterminant pour la protection du sol. Pour les sols plus sensibles à l'érosion, la rotation doit comprendre des espèces produisant une biomasse importante lorsque la culture subséquente produit peu de résidus<sup>17</sup> (Merril *et al.*, 2006).

L'effet du semis direct sur les populations de lombrics est amplifié par l'ajout de résidus de culture (Maurer-Troxler *et al.*, 2006). Ces auteurs soulignent notamment l'importance des lombrics sur l'infiltration de l'eau. La qualité des sols est améliorée avec l'implantation de cultures de couverture et le semis direct. Ces deux catégories de PGB augmentent ou

---

<sup>17</sup> Le soya constitue un bon exemple de culture qui produit peu de biomasse.

maintiennent le niveau de matière organique des sols, soutiennent l'activité microbienne et accroît l'agrégation des particules de sol.

D'après la distribution de la taille des agrégats, le semis direct semble avoir une influence plus grande que les résidus sur la sensibilité des agrégats à l'érosion éolienne (Singh et Malhi, 2006). Même si les résidus ont une moins grande importance sur les propriétés physiques du sol que l'absence de travail du sol, l'ajout de matière organique stimule la vie microbienne, affecte la chimie du sol et la formation des agrégats. Selon ces auteurs, la vulnérabilité des sols à l'érosion éolienne augmente dans l'ordre suivant :

Semis direct avec résidus < Semis direct sans résidus < Labour avec résidus < Labour sans résidus

L'impact du travail réduit et des cultures de couverture sur le diamètre moyen pondéré des agrégats dépend du type de sol. Ainsi, l'impact est supérieur pour un luvisol comparativement à un gleysol. Ce phénomène s'explique en partie par l'état structural initialement plus faible du luvisol. En dépit des sols plus compacts et plus denses dans l'ouest canadien, le semis direct et la présence de résidus sont recommandés pour améliorer l'agrégation des sols (Singh et Malhi, 2006). Le type de sol affecte donc les bénéfices découlant du travail réduit et des cultures de couverture. Dans certains sols limoneux et peu perméables, le semis direct prolongé réduit la macroporosité et induit la formation d'une couche durcie (augmentation de la densité apparente) qui peut limiter l'infiltration de l'eau en profondeur et la croissance des racines (Vulliodud *et al.*, 2006).

### Qualité de l'eau

Le travail réduit du sol ainsi que la rotation des cultures interagissent pour réduire l'érosion et les risques de contamination. Pour un même type de travail du sol, certains scénarios de rotations augmentent les rendements par rapport à la monoculture tout en utilisant moins d'intrants chimiques (Katsvairo et Cox, 2000). L'augmentation des rendements s'accompagne d'une optimisation du prélèvement de l'eau et des nutriments (Anderson, 2005), ce qui réduit les risques de pertes en raison d'une quantité moindre de reliquats d'azote dans le sol.

La conservation de l'eau et la réduction de l'érosion hydrique sont des caractéristiques communes au travail réduit et aux rotations des cultures. Il apparaît évident que la combinaison de ces deux catégories de PGB interagissent positivement pour réduire les risques de contamination par les matières en suspension, l'azote ammoniacal, le phosphore (particulaire et total), les pesticides et par les microorganismes pathogènes. Rappelons cependant, que, sur une base événementielle, le semis direct peut parfois générer plus de ruissellement que le travail réduit (McDowell et McGregor, 1984) ou le travail conventionnel (Isensee et Sadeghi, 1993).

### *L'infiltration de l'eau avec la culture sur résidus et les impacts sur les pertes de nitrates et de pesticides solubles*

La réduction de la vitesse d'écoulement et la formation des macropores dans le sol contribuent à augmenter l'infiltration de l'eau, des nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ) et des pesticides. Ce phénomène peut être amplifié par les fentes de retrait dans les sols argileux soumis aux cycles de dessiccation et d'humectation. Les pertes de nitrates peuvent être atténuées grâce à une culture de couverture qui capte les nitrates (Staver et Brinsfield, 1998; Isse *et al.*, 1999; Strock *et al.*, 2004; Gasser *et al.*, 2000). En revanche, les cultures de couverture n'auraient aucun impact sur le prélèvement des pesticides et augmenteraient indirectement leur migration vers la nappe souterraine en accentuant la macroporosité des sols.

### *La stratification du phosphore et des pesticides dans le profil de sol*

L'absence de travail du sol peut entraîner une stratification des éléments nutritifs (du phosphore surtout) et des pesticides peu mobiles qui s'accumulent dans les strates supérieures du profil du sol. L'approfondissement du profil cultural, par un labour profond mais ponctuel pourrait être un atout (D. Côté, communication personnelle, 1<sup>er</sup> mars 2006). Labourer le sol plus en profondeur (30 cm versus 15 cm) sur une base périodique (tous les 5 à 7 ans, selon la nature et l'état de compaction du sol) à l'aide d'un chisel modifié permet de ramener de l'aluminium des couches plus profondes à la surface du sol. Le phosphore ainsi dilué dans le profil du sol a une moins grande mobilité (Chantigny *et al.*, 2001). Ce type de labour permet d'accroître la capacité de fixation du phosphore dans les couches supérieures. En augmentant graduellement la profondeur d'enracinement et par conséquent le prélèvement de phosphore, le risque de perte en cet élément serait moins élevé.

Beckman *et al.* (2005) soulignent pour leur part que l'alternance des cycles de gel-dégel contribue à libérer le phosphore séquestré par le sol et les résidus de culture, ce qui enrichit l'eau de ruissellement en phosphore dissous.

D'un côté, l'association du travail réduit du sol et des cultures de couverture limitent considérablement le ruissellement et les risques de migration du phosphore particulaire. De l'autre côté, cette combinaison libérerait potentiellement encore plus de phosphore dans l'eau de ruissellement, qu'une pratique conventionnelle (labour sans culture de couverture). Cela mériterait d'être précisé.

### Qualité de l'air

Contrairement au travail intensif du sol, la combinaison de bonnes rotations de cultures, du travail réduit du sol et de l'apport de fumier favorise la séquestration de l'azote dans les agrégats en ralentissant la minéralisation (N'Dayegamyie et Vanasse, 2005). Les sols génèrent environ 4 % du méthane produit par les élevages de ruminants dans l'Est du Canada (Gregorich *et al.*, 2005).

### Biodiversité

En minimisant l'exportation de sédiments et de phosphore, le travail réduit améliore la qualité de l'écosystème aquatique (Yates *et al.*, 2006), au même titre que les cultures de couverture. Cette combinaison est donc globalement favorable à la qualité de l'habitat aquatique.

## **3.1.2 Combinaisons de PGB : Travail du sol et fertilisation**

La structure du sol, les microorganismes, les processus de minéralisation, de dénitrification et de séquestration de carbone sont influencés conjointement par le travail du sol et la fertilisation. Ces effets combinés se répercutent sur la qualité de l'eau, des sols et de l'air. Le travail réduit du sol modifie la dynamique de minéralisation et des cycles d'éléments nutritifs. L'immobilisation de l'azote par les résidus doit être considérée dans le bilan d'éléments nutritifs afin d'épandre des doses optimales pour la croissance des cultures.

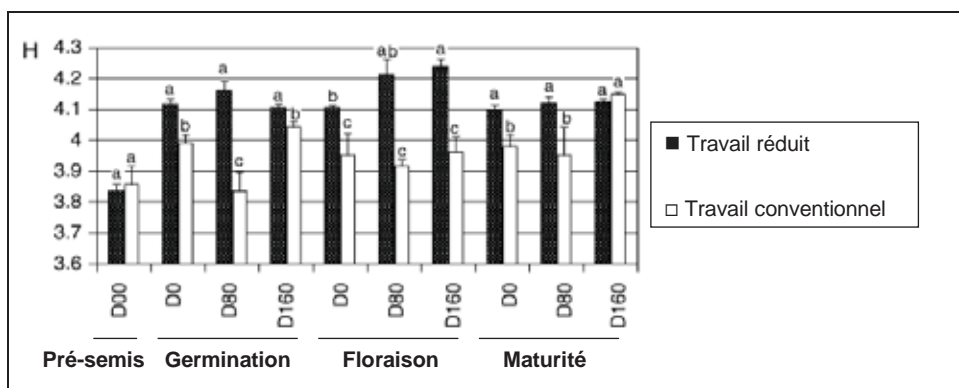
Les principes de gestion optimale de la fertilisation préconisent l'enfouissement des engrais de ferme, tant pour des raisons agronomiques qu'environnementales. L'application du fumier sur des prairies ou des parcelles en semis direct est une pratique qui semble paradoxale dans la mesure où le but du travail réduit (surtout le semis direct) est le maintien de résidus à la surface (Walter *et al.* (1987), cité par Kern et Wolfe, 2005).

L'incorporation demeure une pratique essentielle dans le semis direct et des équipements comme des pendillards ou des injecteurs favorisent la pénétration des engrais dans le sol. Le sarclage permet aussi d'enfouir les résidus dans les cultures sur billons. La gestion des épandages doit tenir compte de cette limite qu'impose le travail réduit du sol. De surcroît, le choix de la période d'épandage en fonction des probabilités de précipitations est un facteur primordial pour réduire les risques de contamination événementielle.

### Qualité des sols

Le travail réduit du sol et l'apport de fumier favorisent la formation d'agrégats stables et accroissent l'infiltration de l'eau ainsi que la résistance des agrégats à l'érosion. L'ajout de fumier de bovin liquide en combinaison avec le travail réduit du sol (chisel) dans un système de rotation avec l'orge (incluant le trèfle et la fléole) a permis d'améliorer les conditions du sol (Bissonnette *et al.*, 2001). Ces auteurs concluent que les améliorations sont plus marquées dans les systèmes de production incluant des rotations comparativement aux monocultures. Les changements au niveau de la biomasse microbienne et de l'activité enzymatique sont à la base des améliorations de la structure (formation d'agrégats stables) et de la qualité de la matière organique. L'ajout de fumier améliore le bilan humique (Giroux *et al.*, 2005) et la présence de résidus liée au travail réduit améliore d'autant plus le bilan.

Diosma *et al.* (2006) ont mis en évidence les conséquences négatives du labour sur la flore microbienne du sol. La figure 11 illustre l'influence de 2 types de travail du sol et de trois doses d'engrais azoté sur la diversité. Comparativement au travail réduit, le labour provoque une diminution significative de la diversité microbienne (caractérisée par l'indice de diversité Shannon) du sol pour toutes les périodes de croissance du blé. L'indice n'est pas significatif uniquement pour la période de maturité avec une dose de 160 kg N ha<sup>-1</sup>. Les auteurs affirment que le labour associé à la fertilisation azotée minérale altère la diversité microbienne. L'effet des engrais dépend du stade de croissance considéré. D'après les auteurs, la fertilisation affecte aussi la diversité des microorganismes du sol, mais cette relation semble moins significatives.



Doses d'azote en kg/ha : 0 (D0), 80 (D80) et 160 (D160). D00 : avant ensemencement.

Pour une même période de croissance, les valeurs associées à des lettres différentes sont significativement différentes au seuil de 5 % (test de Turkey).

Adapté de Diosma *et al.*, 2006

**Figure 11 - Indice de diversité Shannon (H) des sols pour deux modes de travail du sol (réduit vs conventionnel), à différentes périodes de croissance du blé et selon trois doses d'engrais azoté**



## Qualité de l'eau

Un facteur particulièrement déterminant de la mobilité du phosphore (P) dans le ruissellement de surface est le mode et la période d'application des engrais de ferme. La solubilité élevée du P contenu dans les fumiers, la faible densité des particules organiques et leur présence en surface de la fine couche de sol, réactive au ruissellement, sont autant de facteurs qui contribuent à l'accroissement des charges en phosphore biodisponible (surtout quand l'engrais de ferme n'est pas enfoui). Quelques études québécoises ont mis en relief cette problématique notamment associée au climat et aux systèmes de production québécois. Gangbazo (1991) a mesuré sous pluies simulées un accroissement de la charge d'orthophosphates dans le ruissellement proportionnel au taux d'épandage de lisier, alors que l'enfouissement annulait pratiquement la charge de P. En parcelles expérimentales à Lennoxville, l'incorporation de doses agronomiques de lisier de porc au printemps ou en post-levée n'a cependant pas contribué à des charges significativement plus élevées de N et P, dans le ruissellement comme dans les drains souterrains, qu'un traitement de fertilisation minérale. (Gangbazo *et al.* 1997). Grando (1996) a mesuré des charges élevées de phosphore suivant l'épandage non-enfoui de lisier en post-levée sur céréales, dans une étude réalisée en parcelles sous pluies simulées. De la même façon, Michaud et Laverdière (2004) ont observé un accroissement de la charge et de la biodisponibilité du P exporté de parcelles en prairie et sol nu amendées par du lisier non-enfoui.

Comparativement à la fertilisation minérale, la fertilisation organique présente des risques de pertes potentiellement plus élevés. Les caractéristiques des fertilisants organiques peuvent amplifier les risques de perte de phosphore soluble associés au travail réduit, surtout si l'engrais de ferme appliqué n'est pas incorporé au sol.

Stoddard *et al.* (2005) ont étudié l'effet des combinaisons de travail de sol (semis direct et chisel) et de la fertilisation (fumier et engrais minéraux) sur le lessivage des nitrates et des pesticides. Avec le semis direct, le lessivage des nitrates a parfois été significativement supérieur en comparaison avec le chisel, probablement en raison d'une plus grande minéralisation et de la présence des macropores. Les auteurs ont observé une synergie entre l'ajout de fumier au printemps et l'ajout d'engrais minéral, sur l'augmentation du lessivage. À plus long terme, cette interaction est devenue additive. Il n'y aurait par ailleurs aucune interaction entre le travail du sol et l'ajout de fumier sur le lessivage des nitrates.

La culture sur billons combinée à l'application de fumier de bovin s'est traduit par un ruissellement et des pertes de sédiments moindres que lorsqu'aucun engrais de ferme n'est ajouté (Grinting *et al.*, 1998a). Ce phénomène traduit un effet d'interaction; l'ajout de fumier augmente la capacité d'infiltration et améliore la structure du sol ce qui réduit encore plus le ruissellement et l'érosion. Il y donc une synergie sur la diminution du ruissellement et de l'érosion en combinant l'ajout de fumier avec le travail réduit du sol (Ball-Coelho *et al.*, 2000), d'autant plus que le carbone des résidus immobilise l'azote du fumier (Chantigny *et al.*, 2001). Le respect des modalités optimales d'épandage permet de limiter les risques de contamination de l'eau en travail réduit. Ainsi, les engrais doivent être appliqués au niveau des billons plutôt que dans les sillons afin de rendre le prélèvement plus efficace (Waddell et Weil, 2006).

## Qualité de l'air

Le travail du sol et les pratiques de fertilisation influencent les flux de carbone et d'azote. La fertilisation azotée (lisier ou engrais minéral) en semis direct peut mener à une plus grande dénitrification, comparativement au labour. En semis direct, il est préférable que l'application d'azote soit réalisée en post-levée (au stade 6 feuilles) plutôt qu'au semis afin d'éviter des pertes

par dénitrification (Sainz Rosas *et al.*, 2001). En raison du rythme de croissance des plantes, l'azote est prélevé rapidement et les risques de dénitrification sont restreints.

L'émission d'oxyde nitreux (ou protoxyde d'azote, N<sub>2</sub>O) avec le semis direct est amplifiée par l'application d'engrais azotés, surtout si les engrais sont d'origine minérale ou sous forme de lisier (Gregorich *et al.*, 2005). De nombreuses pratiques qui favorisent la séquestration du carbone exigent un apport azoté qui se traduit potentiellement par des plus grandes pertes en N<sub>2</sub>O. Sachant qu'une molécule de N<sub>2</sub>O a le même effet sur le réchauffement climatique que 310 molécules de CO<sub>2</sub>, les effets de certaines pratiques apparaissent comme étant conflictuelles à l'égard des bénéfices sur la qualité de l'air (Lemke, 2003). Si réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de 25 % implique une hausse des émissions de N<sub>2</sub>O aussi minime que 5 ou 10 %, l'effet global sur le réchauffement climatique sera négligeable, voir même négatif. Ces considérations doivent être prises en compte pour évaluer l'effet des combinaisons de PGB sur l'émission des gaz à effets de serre.

### 3.1.3 Combinaisons de PGB : Travail du sol et protection des cultures

#### Qualité de l'eau

Gorneau *et al.* (2001) ont évalué l'impact du travail du sol et de plusieurs méthodes d'épandage d'herbicides sur le ruissellement et les pertes en atrazine. Pour une simulation sur une période de 50 ans, les événements de pluie de seulement 7 ans ont contribué pour plus de 50 % des pertes en atrazine. À partir de ce constat, les auteurs soulignent l'importance de prioriser les PGB qui ont le plus d'impact lorsque survient des événements générant des quantités substantielles de ruissellement. En culture sur billons, l'application en pré-émergence avec incorporation a réduit considérablement les pertes d'atrazine pour les événements ayant une récurrence de 10 ans et plus (figures 12a et 12b). L'incorporation s'est avérée efficace avec le labour pour les événements ayant une récurrence de 10 ans et plus. La faible performance environnementale du semis direct découle en partie de la non incorporation de l'atrazine. Ces résultats peuvent s'appliquer à d'autres pesticides qui ont les mêmes propriétés.

Stoddard *et al.* (2005) ont aussi étudié les effets combinés de l'ajout de fumier et le semis direct sur les pertes de pesticides. La combinaison s'est avérée favorable puisqu'elle s'est traduite par une réduction des concentrations d'herbicides dans l'eau de drainage. Ces deux PGB ont comme effet d'activer la vie microbienne et les processus biochimiques, ce qui a amélioré le taux de biodégradation des herbicides. De plus, l'adsorption des pesticides sur la matière organique peut être significative.

Le tableau 15 illustre l'importance, en semis direct, de la présence des résidus de culture sur la répression des adventices à feuilles larges. En présence des résidus de culture et avec l'utilisation d'un herbicide, la répression est supérieure de 35 % (Shilling *et al.* (1986), cité par Worsham (1991)). Remarquons aussi l'effet positif du semis direct sur la répression des adventices. Le semis direct en présence de résidus procure un meilleur contrôle des adventices à feuilles larges (79 %) comparativement aux parcelles labourées avec application d'herbicide (52 %). Toutefois, l'utilisation d'herbicides, surtout en post-levée, peut s'avérer nécessaire malgré la présence d'une culture de couverture. Remplacer les épandages d'herbicide en pré-levée par une culture de couverture ou le sarclage réduit les risques de pertes dans l'environnement. L'application en post-levée est moins problématique (Worsham, 1991) et si une culture de couverture est intégrée au système, l'utilisation d'herbicides résiduels peut être éliminée (Teasdale et Rosecrance, 2003).

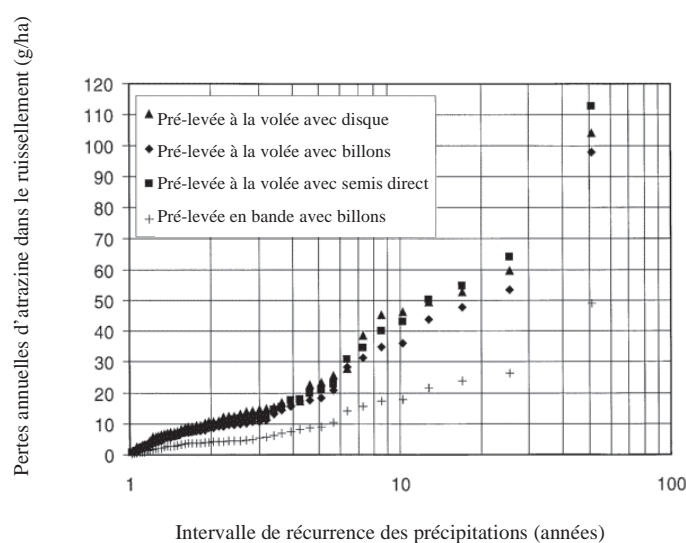
L'accumulation du phosphore en surface du sol peut réduire la capacité du sol à sorber des pesticides non-ioniques comme le glyphosate (Vasudevan et Cooper, 2004). En effet, les phosphates sont adsorbés sur l'aluminium et la saturation des sites d'échange en phosphates se fait au détriment des molécules d'herbicides. Les auteurs suggèrent que l'application d'herbicides à base d'acides carboxyliques (non ioniques) sur des sols saturés en phosphore présente un risque plus élevé de lessivage de ces herbicides. Le travail réduit, et plus particulièrement le semis direct, augmente les risques de contamination de l'eau souterraine, en raison notamment des macropores qui facilitent le drainage (Malone *et al.*, 2003; Roulier et Jarvis, 2003; Shipitalo *et al.*, 2000; Naderman, 1991) et l'utilisation de glyphosate caractérise ces agrosystèmes (Fawcett *et al.*, 1994).

**Tableau 15 - Impacts d'un paillis (résidus de seigle), du travail du sol et d'un herbicide (diphénamide) sur la répression des adventices dans une culture de tabac**

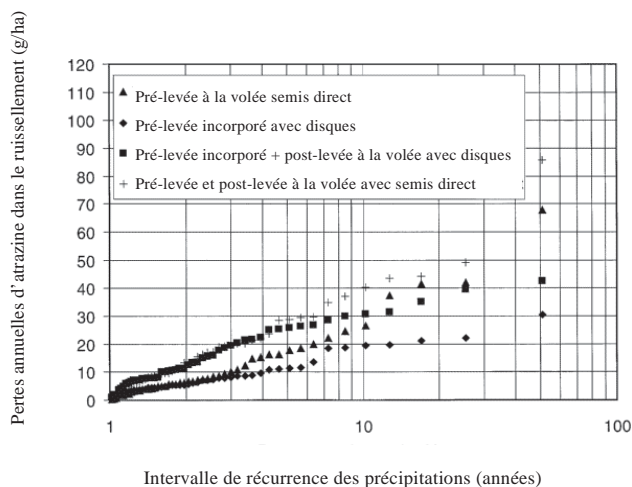
Traitements	Répression des adventices (%)*	
	Feuilles larges	Graminées
Labour sans herbicide	8e†	47c
Labour avec herbicide	52d	67bc
Semis direct sans herbicide	68bc	71abc
Semis direct avec herbicide	87ab	94a
Semis direct avec paillis	79bc	54bc
Semis direct avec paillis et herbicide	97a	80ab

\*Évaluation 4 semaines après la transplantation. †Les valeurs d'une même colonne suivies par une même lettre ne sont pas significativement différentes selon le test de Waller-Duncan T-test (K-ratio = 100)

Adapté de Shilling *et al.* (1986), cité dans Worsham (1991)



**Figure 12a - Pertes annuelles d'atrazine dans le ruissellement selon la récurrence des précipitations, pour 4 combinaisons d'application de l'atrazine et de travail du sol**



Adapté de Gorneau *et al.* (2001)

**Figure 12b - Pertes annuelles d'atrazine dans le ruissellement selon la récurrence des précipitations, pour 4 combinaisons d'application de l'atrazine et de travail du sol**

### 3.1.4 Combinaisons de PGB : Travail du sol et aménagement du parcellaire

#### Qualité de l'eau

La performance des aménagements du parcellaire est dépendante de plusieurs facteurs biophysiques et climatiques. En contrepartie, le type de travail de sol peut contribuer à augmenter l'efficacité filtrante des bandes riveraines. Une bande riveraine filtre les contaminants par deux mécanismes distincts: la sédimentation des particules grossières (matières en suspension et contaminants adsorbés) et l'infiltration des contaminants solubles. Le travail conventionnel du sol génère plus de ruissellement, de sédiments, d'azote ammoniacal et de phosphore particulaire que le travail réduit. Le travail réduit en association avec une bande riveraine est donc une combinaison bénéfique; en générant moins de ruissellement, de sédiments et de phosphore non soluble, la performance de la bande riveraine est supérieure (Vallières, 2005). Par ailleurs, le labour peut former des voies d'écoulement préférentiel.

Utilisées en combinaison avec les PGB de type culturale (cultures sur résidus, rotations et cultures de couverture), l'efficacité des aménagements du parcellaire agricoles devient optimale. Ainsi, Thibodeau et Ménard (1993) rapportent que le semis direct peut réduire l'érosion de 90 à 95 % et qu'une couverture de 30 % de résidus peut réduire de plus de 50 % l'érosion. L'eau, chargée de sédiments et de nutriments, qui passent ensuite par les structures de captage ou les bandes riveraines est filtrée davantage.

Dans le but d'évaluer la performance de la combinaison de plusieurs PGB sur la qualité de l'eau, Cullum *et al.* (2005) ont comparé l'efficacité individuelle et combinée de deux groupes de PGB dans trois bassins versants; les PGB structurales (bassin de sédimentation, bandes riveraines et zones tampons, plantation perpendiculaire à la pente) et les PGB culturales (travail réduit, rotations des cultures, doses réduites de pesticides). Le tableau 16 résume les données de qualité de l'eau avant et après l'implantation des deux groupes de PGB, seules ou en combinaisons.

**Tableau 16 - Comparaison de la qualité de l'eau avant et après l'implantation de PGB culturales, structurales ou en combinaison de 1996 à 1999**

Paramètres	PGB structurales			PGB culturales et structurales			PGB culturales		
	Avant	Après	Écart (%)	Avant	Après	Écart (%)	Avant	Après	Écart (%)
Secchi (cm)	17	21	21	12	25	108*	11	15	36
MES (mg/l)	429	202	-53*	289	70	-76*	405	169	-58*
N- NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	0,534	0,553	4	0,393	0,387	-2	1,157	0,85	-27
N- NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	0,123	0,139	13	0,189	0,116	-39*	0,168	0,224	33*
P total (mg/l)	0,496	0,344	-31*	0,522	0,233	-55*	0,437	0,299	-32*
P dissous (mg/l)	0,032	0,049	53*	0,019	0,046	142*	0,018	0,044	144*
Chlorophylle (µg/l)	16,6	118,9	616*	24,4	61	150	9,9	72,2	629*

\* Indique une différence significative (P < 0,05)

Les résultats montrent une amélioration de la visibilité (disque de Secchi) avec la combinaison des deux groupes de PGB et une hausse de la concentration en chlorophylle, générée par les phytoplanctons. Curieusement, l'augmentation de la chlorophylle est associée à chacun des deux groupes de PGB mais pas à leur combinaison. Ces améliorations sont étroitement liées à la réduction significative des MES. La qualité de l'eau à l'égard de l'azote n'a pas été affectée sauf pour la concentration en N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> qui a augmenté suite à l'adoption des PGB culturales et diminué avec la combinaison des deux groupes de PGB. La concentration en phosphore total a diminué significativement alors que le phosphore dissous (orthophosphates) a augmenté, ce qui reflète bien la relation entre le travail réduit et les pertes de phosphore soluble (section 3.1.1). Néanmoins, l'interprétation des résultats entre les deux groupes de PGB doit se faire avec prudence car même si les trois bassins versants sont similaires, des caractéristiques les distinguent.

### Combinaisons de PGB incluant des PGB de travail du sol - Synthèse -

#### *Qualité des sols*

Le travail réduit et la rotation des cultures améliorent les propriétés biologiques et physico-chimiques des sols par l'accumulation de matière organique et la stimulation de la vie microbienne. La meilleure structure du sol réduit les risques d'érosion éolienne et hydrique.

Le travail réduit du sol associé à l'ajout de fumier améliore également les propriétés du sol, favorise la nutrition des plantes et diminue les risques d'érosion. Par contre, l'incorporation des fumiers en semis direct n'est pas toujours possible faute d'équipement adéquat.

#### *Qualité de l'eau*

La réduction de l'érosion hydrique se traduit par une diminution des risques de contamination de l'eau de surface par l'azote ammoniacal, le phosphore total, les agents pathogènes et les matières en suspension.

Synthèse (suite)

Bien géré, le travail réduit ainsi qu'un labour occasionnel peut permettre de diminuer l'utilisation des pesticides et, par conséquent, les risques de contamination de l'eau. Les conditions environnementales locales produites par le semis direct offrent des avantages pour la destruction de semences de plantes nuisibles, mais les résidus de cultures peuvent intercepter les herbicides et restreindre leur efficacité. L'apport de fumier, en combinaison avec le semis direct, stimule les microorganismes et augmente le potentiel de biodégradation et d'adsorption. La synergie entre les résidus de cultures et les doses de pesticide est prometteuse, mais elle requiert des recherches supplémentaires.

Le travail réduit et la rotation des cultures ont des effets contradictoires sur le lessivage des pesticides et des nutriments solubles. Le délai entre la période d'épandage et les premières précipitations semble constituer le facteur prédominant, même s'il existe des évidences sur l'augmentation de l'infiltration et de la minéralisation avec les pratiques de conservation. Il est possible aussi que, selon la texture du sol, le travail réduit génère plus de ruissellement comparativement au labour. En favorisant le prélèvement des nitrates, les rotations peuvent atténuer l'effet négatif du travail réduit sur leur lessivage.

Avec la réduction du travail du sol, l'accumulation du phosphore et des pesticides dans le sol de surface augmente les risques de perte de ces éléments en cas d'érosion. Une culture de couverture protège de l'érosion, mais la présence de résidus augmente la libération potentielle de phosphore soluble. Les interactions entre les effets du travail du sol, de la rotation des cultures et des cultures de couverture sur le comportement de l'azote, du phosphore et des pesticides dans l'environnement mériteraient d'être précisées.

L'efficacité des bandes riveraines est accrue lorsque le sol est soumis au travail réduit. Celui-ci améliore aussi la performance des autres aménagements hydroagricoles tels les avaloirs, les marais filtrants et les bassins de sédimentation. Combinés au travail réduit, la rotations des cultures, la lutte intégrée, la gestion des élevages et l'aménagement du parcellaire réduisent l'exportation de sédiments et de contaminants.

#### *Qualité de l'air*

En plus de séquestrer du CO<sub>2</sub>, les pratiques de conservation contribuent à l'immobilisation de l'azote par les résidus. Selon le type de sol dans lequel le semis direct est pratiqué, les conditions d'humidité favorisent la dénitrification. Les effets sur la séquestration du carbone sont évidents pour l'Ouest canadien, mais l'émission de N<sub>2</sub>O peut contrebalancer les effets positifs du travail réduit sur l'effet de serre.

#### *Biodiversité*

En réduisant l'exportation de sédiments et de contaminants dans l'eau, la combinaison du travail réduit, de la rotations des cultures, de la lutte intégrée, de la gestion des élevages et de l'aménagement du parcellaire favorise la qualité des écosystèmes aquatiques et par conséquent leur biodiversité. De plus, la rotation des cultures et le travail réduit sont propices à la diversification des microorganismes du sol et des adventices.

#### *Implications*

En travail réduit, l'implantation de cultures de couverture peut limiter le lessivage des nitrates et l'approfondissement ponctuel du profil cultural permet de contrer l'accumulation du phosphore dans la couche superficielle du sol. La prudence est de mise lors de l'épandage des engrais de ferme sur parcelles en travail réduit; le choix de la période d'épandage en fonction des précipitations est crucial. En semis direct, le labour occasionnel est recommandé pour détruire la couche indurée qui se forme en dessous du lit de semence, pour diversifier les conditions de croissance des plantes nuisibles et pour contrer la stratification des éléments nutritifs. La fréquence souhaitable de ce labour dépend du type de sol.

## 3.2 PGB du couvert végétal

### 3.2.1 Combinaisons de PGB : Couvert végétal et fertilisation

La contribution des rotations des cultures à la fertilité du sol doit être comptabilisée dans le bilan des éléments nutritifs afin d'ajuster la fertilisation en fonction du besoin des plantes. Les nutriments du sol libérés par la minéralisation doivent aussi être inclus dans le bilan.

#### Qualité des sols

L'application de fumier, le travail réduit et les cultures de couverture agissent en synergie sur le maintien de la structure du sol (N'Dayegamiye et Anger, 1990) et le niveau de matière organique. D'ailleurs, le bilan humique d'une monoculture de maïs, de pomme de terre et même d'une rotation maïs-soya est déficitaire, sauf lorsque les parcelles sont fertilisées avec du fumier de bovin (Giroux *et al.*, 2005).

#### Qualité de l'eau

L'ajout de fumier et la rotations des cultures forment une combinaison favorable. Grande *et al.* (2005 et 2005a) ont noté une diminution du ruissellement et des pertes de sédiments, de phosphore total et de phosphore réactif dissous avec l'ajout de fumier en présence de résidus de culture. L'ensemencement d'une culture de couverture, comme *Tifolium pratense L.*, en combinaison avec l'épandage de fumier réduit les charges de phosphore total et de matières en suspension exportées vers les cours d'eau (Kleinman *et al.*, 2005). En revanche, l'application de fumier de bovin masque l'effet bénéfique de l'engrais vert en raison de sa teneur élevée en phosphore soluble. Sans ajout de fumier, les pertes de phosphore dissous sont similaires pour les parcelles avec et sans culture de couverture.

La gestion optimale de la fertilisation (incluant le bilan azoté) en combinaison avec un bon choix de rotations et le travail réduit permet de diminuer les risques de lessivage des nitrates (Power *et al.*, 2001). Dans un système de rotation maïs-soya en travail réduit, l'implantation du seigle après le soya a permis de réduire l'érosion à 0,5 t/ha au lieu de 7,8 t/ha (Shipitalo et Edwards, 1998). D'après Meissner *et al.* (2002), la réduction de la fertilisation minérale doit être combinée à des rotations afin de réduire la contamination de la nappe d'eau souterraine.

La combinaison du travail réduit du sol, de la gestion optimale de la fertilisation et de la présence des cultures de couverture peut limiter le lessivage des nitrates (Beaudoin *et al.*, 2005). Le fractionnement de la fertilisation combiné à l'implantation d'engrais vert dans le cycle des rotations réduit les risques de contamination de l'eau. Le fait de synchroniser les apports azotés avec le prélèvement des cultures diminue la quantité d'azote résiduel après la récolte. La performance d'un engrais vert à capter les nutriments est donc supérieure avec le fractionnement des apports azotés, qu'il s'agisse d'engrais de synthèse ou de lisier (Ball-Coelho *et al.*, 2004).

Anderson (2005) émet l'hypothèse que les rotations peuvent induire des effets synergiques sur l'efficacité de l'utilisation de l'eau et des nutriments et par conséquent sur la croissance des cultures subséquentes. Comparé à une monoculture de maïs ou de soya, les rotations soya-maïs et maïs-soya augmentent respectivement la capacité d'absorption du maïs et l'efficacité d'absorption du soya. La synergie est spécifique à chacune des espèces impliquées dans les rotations et se manifeste à long terme. Cette synergie se traduit par une optimisation de la

croissance des végétaux et une réduction des risques de perte. Selon les scénarios de rotations et les précipitations, des effets antagonistes peuvent se manifester, principalement au niveau de la productivité (Tanaka *et al.*, 2005). L'impact des scénarios de rotation sur les rendements est mieux étudié que les effets sur la qualité de l'eau et des sols. La diversification des cultures dans l'espace (cultures intercalaires et polycultures) représente un potentiel intéressant, mais elle demeure une pratique complexe et peu étudiée.

L'intégration d'une légumineuse dans un système de rotation offre l'avantage de fixer l'azote et de le rendre disponible pour la culture suivante. Par exemple, le trèfle implanté après la récolte du blé augmente la disponibilité de l'azote d'environ 25 % dans un système de rotation blé-maïs (Vyn *et al.*, 2000). Ces auteurs ont noté une diminution de l'azote résiduel dans le sol, ce qui réduit les risques de lessivage de cet élément. Hao *et al.* (2001) ont constaté que les rendements étaient supérieurs avec l'intégration d'une légumineuse dans les rotations. L'augmentation des rendements est favorable puisque plus d'azote est prélevé et que les risques de perte vers le milieu aquatique sont moindres.

La minéralisation de la matière organique par les microorganismes du sol est bénéfique pour l'environnement dans la mesure où les éléments libérés sont prélevés par une culture. À titre d'exemple, les mycorhizes favorisent la nutrition en phosphore. Actuellement, le potentiel de minéralisation du phosphore organique n'est pas considéré dans les grilles de fertilisation au Québec. On peut donc croire que certaines rotations des cultures avec l'adoption du semis direct peuvent contribuer à réduire la dose de phosphore nécessaire à la croissance des cultures.

Massicote *et al.* (2000) rapportent les résultats d'une étude réalisée en Montérégie par Leroux *et al.* (1998) où la biomasse microbienne ainsi que le potentiel et la longueur du mycélium mycorhizien d'une rotation maïs-soya entre un travail conventionnel et un travail réduit étaient comparés. Les résultats sur un loam sableux montrent une biomasse microbienne plus élevée en culture sur billons pour les deux premières couches de sol (0-10 cm: 285 mg C/kg sol, 10-20cm: 340 mg C/kg sol) relativement au travail conventionnel (0-10 cm: < 200 mg C/kg sol, 10-20cm: 270 mg C/kg sol). De plus, les sols en culture sur billons présentaient une augmentation de 30,2 % du potentiel mycorhizien et de 14,6 % de la longueur du mycélium. Ces champignons, en plus de favoriser le recyclage des éléments nutritifs, contribuent à la stabilité structurale des sols et à la dégradation des pesticides (Massicote *et al.*, 2000).

### Qualité de l'air

Les systèmes qui intègrent des légumineuses émettent moins d'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O) annuellement que ceux utilisant des engrais minéraux (Gregorich *et al.*, 2005). Il faut garder à l'esprit que la fertilisation azotée, en combinaison avec les rotations des cultures incluant des cultures de couverture, permet d'augmenter la biomasse et de séquestrer plus de CO<sub>2</sub>, en plus de fournir de l'azote à la culture subséquente. Ainsi, le sol a besoin d'une quantité moindre d'azote pour supporter la production suivante. Pour la nutrition azotée, l'emploi des légumineuses dans les rotations doit être privilégié au dépend des engrais minéraux.

Rochette et Janzen (2005) soulignent par ailleurs que l'émission par les N<sub>2</sub>O en culture de légumineuses est en grande partie attribuable aux exsudats racinaires, pendant la saison de croissance, et à la décomposition des résidus après la récolte, plutôt qu'à la fixation symbiotique de l'azote proprement dite.



### 3.2.2 Combinaisons de PGB : Couvert végétal et protection des cultures

Le choix des scénarios de rotation constitue un défi pour la gestion des agroécosystèmes car plusieurs composantes de production et tous les éléments de l'écosystème peuvent être affectés.

Cette section inclut les combinaisons entre les cultures sur résidus, les rotations des cultures et la lutte intégrée. Comme certains effets des cultures sur résidus sont similaires aux rotations des cultures, des études relatives à la culture sur résidus sont citées dans cette section. Les cultures sur résidus, qui incluent le semis direct, le travail réduit du sol (absence de labour) et la culture sur billon, sont des pratiques souvent associées à la rotation des cultures.

Dresser un portrait global des effets combinés des pratiques de conservation et des éléments de gestion de la lutte intégrée est une tâche ardue compte tenu des interactions complexes et spécifiques. Pour déterminer la nature des impacts des combinaisons de PGB, il est impératif d'étudier chacune des combinaisons entre les différents éléments de gestion, en relation avec les facteurs climatiques et biophysiques. Néanmoins, la combinaison entre les éléments de gestion de la protection des cultures et les rotations des cultures apparaît bénéfique pour la qualité de l'eau car moins de pesticides sont épandus. De plus, cette combinaison facilite la lutte biologique contre les ennemis des cultures en diversifiant les espèces présentes dans le champ.

Le but de la revue de littérature n'étant pas de décrire exhaustivement les effets potentiels de toutes les associations, seuls les principaux éléments de gestion sont abordés. Les concepts de gestion sont commentés en incluant, dans les sections suivantes, des exemples sur les maladies et les insectes ainsi que sur les plantes nuisibles.

#### Effets des combinaisons sur les maladies et les insectes

La modification des dates de semis, les rotations des cultures, la sélection de cultivars résistants, la réduction de la densité de plantation sont des toutes des pratiques bénéfiques permettant de réduire l'incidence des maladies (Krupinsky *et al.*, 2002). La réduction de la densité de la plantation permet de réduire l'humidité et freine le développement de certaines maladies. Notons que la réduction de la densité de plantation n'est pas souhaitable lorsque la présence des plantes nuisibles est problématique. Une forte densité de plantation favorise la compétition au détriment des plantes nuisibles (Anderson, 2005).

Peters *et al.* (2003) ont mesuré l'influence de divers scénarios de rotations avec du trèfle et de l'orge en cultures de pomme de terre (tableau 17). Avec les rotations de 3 ans, le travail réduit a interagi significativement pour réduire les dommages causés par la fusariose et la gale argentée. Avec le travail conventionnel, les rotations de 3 ans n'ont pas contribué à réduire l'expression des symptômes de ces deux maladies. Comparativement aux rotations de 2 ans, les rotations de 3 ans ont permis de diminuer l'incidence de *Rhizoctonia solani* et *Phytophthora erythroseptica*, peu importe le type de travail du sol (données non présentées). Les auteurs concluent que les rotations de 3 ans et le travail réduit stimulent l'activité antibiotique des microorganismes de la rhizosphère et des bactéries endophytiques des racines. Le travail réduit et des rotations spécifiques ont donc une action conjointe positive pour contrer le développement de certaines maladies de la pomme de terre. La diminution des doses ou du nombre d'épandages constitue une diminution à la source des risques de contamination par les pesticides.

L'application de fumiers ou de compost, l'enfouissement d'engrais verts, la présence de paillis et l'instauration de rotations peuvent aussi contribuer au développement des populations microbiennes bénéfiques dans le sol. En stimulant la vie microbienne et la biodiversité du sol, ces pratiques altèrent les effets pathogéniques. La compétition pour les nutriments, la production d'agents antibiotiques et l'induction de résistances systémiques constituent les principaux mécanismes par lesquels les pratiques de conservation agissent sur la phytoprotection (Sturz et Christie, 2003).

**Tableau 17 - Expressions des symptômes de la fusariose et de la gale argentée à la surface des tubercules de pommes de terre selon 2 types de rotation et 2 modes de travail du sol (conventionnel vs réduit)**

Rotations	% moyen des symptômes à la surface des tubercules			
	Travail du sol conventionnel		Travail réduit	
	Fusariosea ( <i>Fusarium spp.</i> )	Gale argentée ( <i>H. solani</i> )	Fusariosea ( <i>Fusarium spp.</i> )	Gale argentée ( <i>H. solani</i> )
2 ans (orge de printemps/p.de t.)	2,2a	3,0a	2,1a	3,3a
2 ans (orge, trèfle / trèfle / p.de t.)	2,3a	3,5a	1,6b	2,2b

Des lettres différentes indiquent des différences significativement différentes (P = 0,05)

Adapté de Peters *et al.* (2003)

L'application de fumiers ou de compost, l'enfouissement d'engrais verts, la présence de paillis et l'instauration de rotations peuvent aussi contribuer au développement des populations microbiennes bénéfiques dans le sol. En stimulant la vie microbienne et la biodiversité du sol, ces pratiques altèrent les effets pathogéniques. La compétition pour les nutriments, la production d'agents antibiotiques et l'induction de résistances systémiques constituent les principaux mécanismes par lesquels les pratiques de conservation agissent sur la phytoprotection (Sturz et Christie, 2003).

L'interdépendance qui existe entre les différents organismes de l'écosystème édaphique se manifeste par des interactions métabiotiques (Waid, 1999). En d'autres mots, la niche écologique et la chaîne alimentaire de certains microorganismes dépendent de l'activité des autres microorganismes. D'après cet auteur, les pratiques culturales telles le travail réduit, les cultures de couverture ou l'ajout de fumier constituent des techniques métabiotiques qui favorisent la biodiversité et les fonctions potentielles des microorganismes (recyclage des éléments nutritifs, résistance aux pestes des cultures, aération du sol, etc.). En contrepartie, le travail intensif du sol et l'adoption de monocultures réduisent la biodiversité et les fonctions métabiotiques du système (réduction des mycorhizes (Kabir, 2005) et d'invertébrés). La présence de végétation ou de résidus de culture entraîne donc des effets métabiotiques, potentiellement bénéfiques pour la lutte contre les ennemis des cultures.

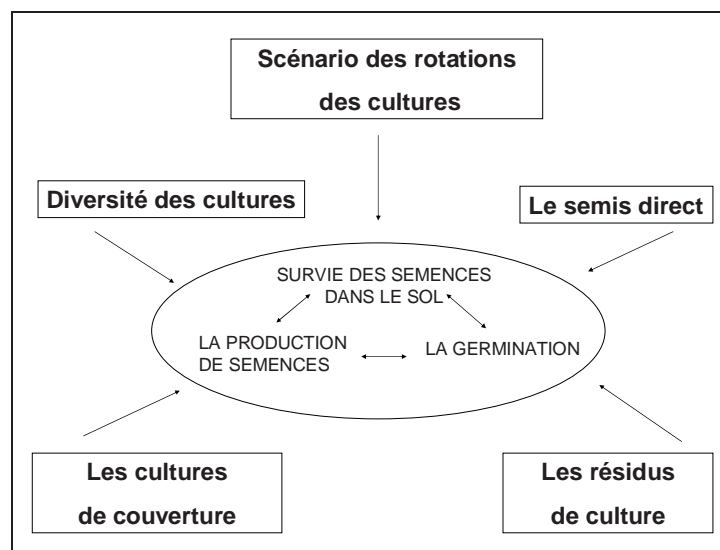
Peachey *et al.* (2002) ont étudié l'influence du type de travail de sol et des cultures de couverture sur la dynamique des populations de prédateurs. La combinaison a influencé positivement les populations de prédateurs mais, en revanche, les proies étaient aussi plus abondantes. Les auteurs concluent donc que l'absence de corrélation entre l'augmentation des prédateurs et la diminution des ravageurs s'explique par l'augmentation des proies. Dans ce cas, l'absence de labour a augmenté les populations de ravageurs (*Scutigerella immaculata*

(Newport)) puisque la perturbation du sol par le labour détruit la niche écologique et restreint le transport des prédateurs.

Précisons que la dynamique entre la vie microbienne et la décomposition des résidus est complexe et peu connue; les interactions sont spécifiques à chaque type de résidu et dépendantes de plusieurs facteurs. Par exemple, les cultures de couverture ou leur résidu peuvent abriter des espèces d'arthropodes qui ravagent les cultures et d'autres qui sont des prédateurs (Bugg, 1991). Les conditions propices à la biodiversité microbienne, comme le travail réduit, l'ajout de fumier, la présence de culture de couverture ou les rotations, favorisent les populations de prédateurs, de proies et de ravageurs. En plus des pratiques culturales et des caractéristiques intrinsèques des microorganismes, les interactions entre les populations de prédateurs, de proies et de ravageurs dépendent de plusieurs autres facteurs bio-physiques (précipitations, type de sol, température, etc.) qui conditionnent la chaîne alimentaire et les niches écologiques.

#### Effets combinés sur les plantes nuisibles

Anderson (2005) a développé une approche multi-tactique qui intègre plusieurs éléments de gestion écologique des plantes nuisibles annuelles (figure 14). Plusieurs PGB font partie intégrante de cette nouvelle approche. Les objectifs de cette approche sont de favoriser l'épuisement naturel de la réserve de semences de plantes nuisibles dans le sol, réduire la germination et limiter la production de semences par les plantes nuisibles. Dans certains cas, par exemple lors d'une rotation orge-fourrage, il y a plus de plantes nuisibles, mais le bénéfice de la rotation sur la productivité compense la compétition accrue par les plantes nuisibles (Stevenson *et al.*, 1998).



Adapté d'Anderson (2005)

**Figure 14 - Approche multi-tactique affectant la dynamique des populations de plantes nuisibles annuelles**

Idéalement, la planification des rotations doit être basée sur l'implantation de cultures complémentaires quant à leur période de croissance (une culture principale avec implantation d'une culture de couverture dans la même année). Le but étant d'apporter au sol une

couverture pendant une plus longue période afin de limiter la germination et la croissance des plantes nuisibles. De plus, une culture qui peut être ensemencée tardivement élargit la fenêtre d'intervention pour effectuer une lutte (mécanique ou chimique) contre les plantes nuisibles. À l'échelle de la ferme, la rotation d'une céréale avec une culture en rang (légumes par exemple) réduit à long terme les populations de mauvaises herbes (Melander *et al.*, 2005). La pression de sélection est différente en raison de la diversification des espèces de plantes nuisibles. Dans la même logique, l'intégration des légumineuses dans les rotations est aussi un moyen efficace pour contrôler la réserve de semences des plantes nuisibles (Bellinder *et al.*, 2004) ainsi que la croissance et la densité des plantes nuisibles (Fisk *et al.*, 2001). La présence d'une culture de couverture améliore aussi la qualité de l'eau de surface en captant l'eau de ruissellement tout en réduisant les risques de contamination des eaux de surface par les herbicides.

En semis direct, l'approche multi-tactique s'est traduite par une diminution de l'utilisation des pesticides de 50 %. La culture sur billons avec application d'herbicides en bandes permet aussi de réduire l'épandage d'herbicide d'environ la moitié (CDAQ et MAPAQ, 2005). Idéalement, les herbicides sont appliqués en post-levée afin de réduire les risques de pertes et d'obtenir une meilleure efficacité. Précisons qu'une plus faible densité de plantes nuisibles augmente l'efficacité des herbicides. D'après cette logique, l'approche multi-tactique facilite l'application de doses réduites car l'efficacité des herbicides est supérieure.

Tel que mentionné précédemment, une faible densité de plantation peut réduire le développement de certaines maladies. (Krupinsky *et al.*, 2002). Dès lors, le contrôle des plantes nuisibles peut devenir problématique. Varier la densité de plantation peut avoir des effets négatifs soit sur le développement des maladies (surtout en semis direct), soit sur l'infestation des plantes nuisibles.

Il est possible de réduire de 60 % la quantité d'herbicides utilisée dans le maïs-grain, sans affecter le rendement, avec l'application d'herbicides en bandes, en combinaison avec 2 sarclages sélectifs sur toute la surface (Leblanc *et al.*, 1995). Le sarclage, l'application en bandes des herbicides et la présence d'une culture de couverture constitue une combinaison bénéfiques pour le contrôle des adventices (Teasdale et Rosecrance, 2003). La combinaison d'une culture de couverture avec une application en post-levée peut éliminer l'utilisation d'herbicides résiduels. En réduisant les herbicides rémanents dans le sol, les cultures subséquentes dans la rotation sont moins sensibles à la phytotoxicité potentielle (Raymond-Marie Duchesne, communications personnelle, 16 mars 2006).

L'efficacité des herbicides peut être affectée par la présence de résidus non enfouis dans le sol. Les résidus laissés au sol peuvent intercepter les herbicides et réduire l'efficacité du produit (Fawcett *et al.*, 1994; Teasdale et Rosecrance, 2003; Nazarko *et al.*, 2005). Les herbicides sont alors dégradés ou se volatilisent si aucune précipitation ne survient après les épandages. Les précipitations peuvent faire pénétrer les herbicides dans le sol et les faire réagir avec les plantes nuisibles. Toutefois, si le sol est saturé ou peu perméable, une précipitation importante peut mener à un ruissellement plus important des herbicides en travail réduit. Cependant, les études effectuées sous pluie naturelle n'ont pas démontré une augmentation des pertes de pesticides dans l'eau de surface avec le travail réduit.

Teasdale *et al.* (2005) stipulent qu'il existe une synergie entre la présence de résidus et l'efficacité des herbicides, en dépit du fait que les résidus peuvent intercepter les herbicides et réduire leur activité. Par ailleurs, les résidus conservent l'humidité du sol et peuvent aussi favoriser l'émergence de mauvaises herbes. Plusieurs facteurs influencent cette action

conjointe : la proportion de résidus et la quantité d'herbicide, mais aussi le type de mauvaises herbes, le type de résidus, le type d'herbicide, les conditions climatiques, la banque de semences dans le sol, etc.

On remarque à la figure 15a que la présence de résidus ayant reçu de faible taux de métolachlore favorise l'émergence de l'amarante hybride. L'émergence décroît rapidement avec l'augmentation de la biomasse de résidus. La synergie se manifeste avec des taux de métolachlore plus élevés. Par exemple, avec 500 g/m<sup>2</sup> de résidus, l'émergence est réduite de 13 % alors que 10 g/ha de métolachlore réduit l'émergence de 16 %. En combinant les deux pratiques, on obtient une réduction de l'émergence de 86 %. Ce phénomène de synergie se traduit par une diminution des doses d'herbicide requises pour contrôler l'émergence des adventices. Le mécanisme responsable de la synergie serait relié à l'étiollement des plants d'amarante hybride en présence des résidus; l'étiollement épuise l'énergie des plants et limitent leur capacité à dégrader le métolachlore (Teasdale *et al.*, 2005). Ainsi, l'activité de l'herbicide est supérieure avec une quantité croissante de résidus (figure 15b). Cette action combinée représente un potentiel intéressant pour les grandes cultures en semis direct si on considère l'effet allélopathique et la densité des résidus.

En semis direct, si le sarclage et l'application d'herbicides est localisée en bande, l'utilisation des herbicides peut être inférieure (Swanton *et al.*, 2006). Ces auteurs ont aussi constaté une différence dans la pression de sélection lorsque le blé est intégré à rotation de maïs et soya, ce qui contribue à augmenter la diversité des espèces de plantes nuisibles.

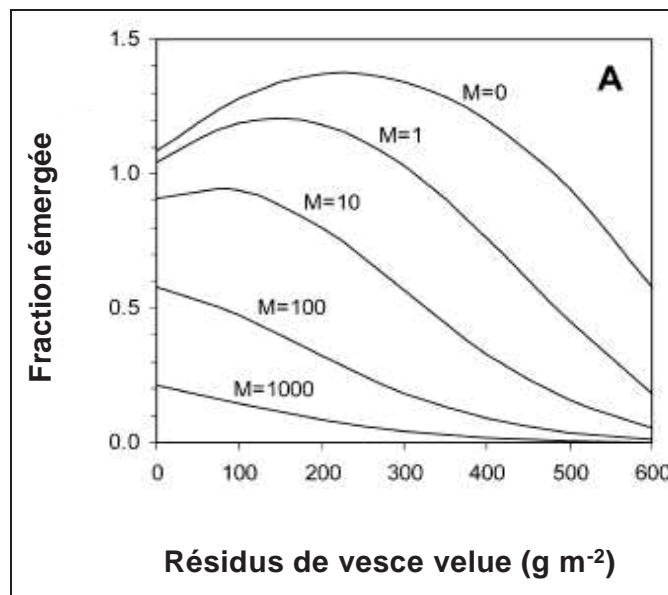
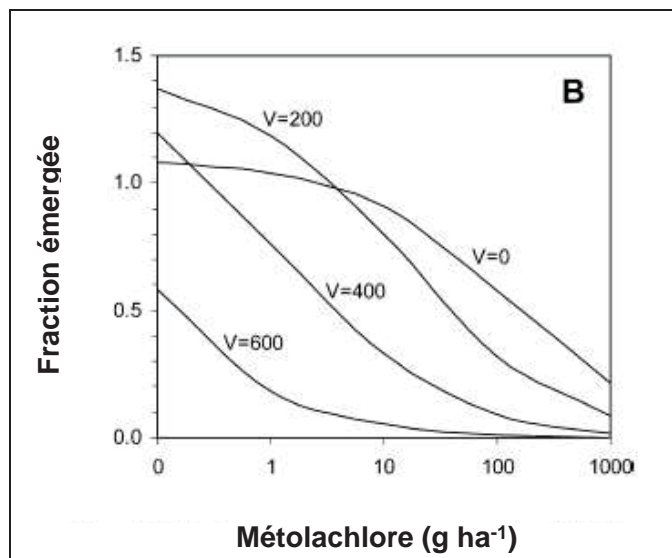


Figure 15a - Prédiction de l'émergence de l'amarante hybride en fonction de (A) la biomasse des résidus de vesce velue pour divers taux de métolachlore et (B) la concentration en métolachlore pour divers taux de résidus



M : taux de métolachlore (g/ha) – V : résidus de vesce velue (g/m<sup>2</sup>)  
Adapté de Teasdale *et al.* (2005)

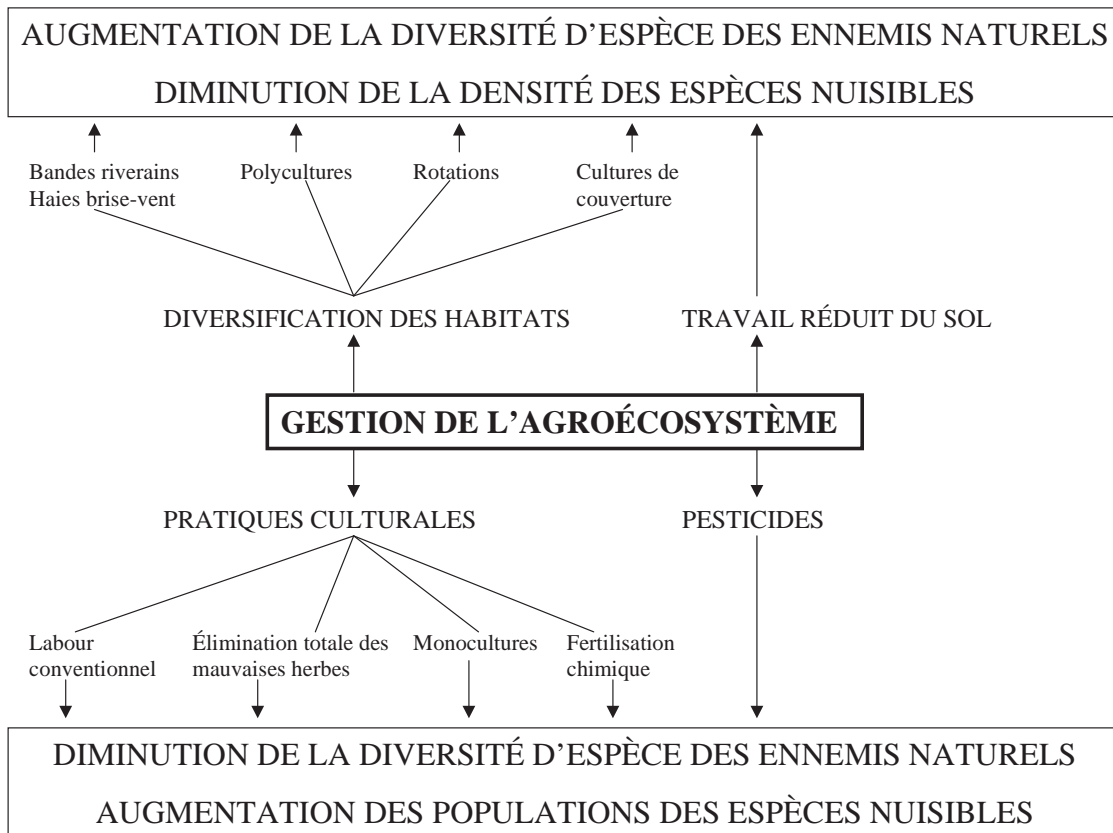
**Figure 15b - Prédiction de l'émergence de l'amarante hybride en fonction de (A) la biomasse des résidus de vesce velue pour divers taux de métolachlore et (B) la concentration en métolachlore pour divers taux de résidus**

### Biodiversité

Peu d'études abordent les effets de la diversification des cultures sur l'abondance et l'efficacité des ennemis naturels des cultures. Il est pourtant reconnu que la biodiversité des agroécosystèmes stimule les populations d'ennemis naturels (ou prédateurs) et favorise la résistance aux insectes ravageurs (Altieri, 1999). La figure 13 démontre l'importance de la diversification des habitats et des pratiques culturales sur la densité des populations de ravageurs.

Selon Altieri (1999), le potentiel d'un agroécosystème à abriter des ravageurs est faible si les critères suivants sont respectés:

- Diversité d'espèces dans le temps et dans l'espace;
- Discontinuité des monocultures dans le temps (rotations, cultivars à maturité variable);
- Structure du paysage en mosaïque;
- Présence d'espèces vivaces;
- Densité élevée de la culture;
- Diversité génétique.



Adapté d'Altieri (1999)

Figure 13 - Effets des pratiques culturales sur la biodiversité des ennemis naturels et sur l'abondance des insectes ravageurs

D'après les constats de Marshall *et al.*(2001, 2003), il est évident que les pratiques culturales qui favorisent la diversité, comme le travail réduit, les rotations ou les cultures de couverture, enrichissent la biodiversité d'insectes et d'oiseaux . Avec une densité et une diversité accrue d'insectes, la présence d'insectes bénéfiques (pollinisateurs, prédateurs, phytophages des plantes nuisibles) est plus probable. Les oiseaux ou les oisillons se nourrissent aussi de graines, mais leur régime alimentaire peut aussi être constitué d'insectes. Ces interrelations soulignent la pertinence d'adopter une approche systémique dans la gestion des agroécosystèmes. Elles mettent aussi en évidence l'impact des PGB sur la biodiversité et leur potentiel de réduction de l'application de pesticides. Le contrôle écologique des ennemis des cultures par l'augmentation et la diversification des populations de prédateurs naturels comme les oiseaux ou les insectes est cependant un domaine encore trop peu étudié.

### 3.2.3 Combinaisons de PGB : Couvert végétal et Élevages

L'utilisation des cultures de couverture comme pâturage ou plantes fourragères constitue une pratique attrayante économiquement pour les producteurs (Gardner et Faulkner, 1991). Cependant, cela nécessite une approche holistique et plus de recherche pour favoriser l'application pratique et inciter son adoption auprès des producteurs.

### 3.2.4 Combinaisons de PGB : Couvert végétal et aménagement du parcellaire

#### Qualité des sols

Comme les cultures de couverture, les haies brise-vent contrent l'érosion éolienne. Les premières protègent les agrégats et augmentent la résistance du sol à l'érosion en augmentant la stabilité structurale (Lal *et al.*, 1991). Les secondes réduisent la vélocité du vent et l'incidence de ce dernier sur l'érosion des sols (Brandle *et al.*, 2004). La combinaison de ces deux PGB est encore plus bénéfique lorsque le travail réduit lui est associé puisque les résidus peuvent aussi ralentir la vitesse du vent (Lindwall *et al.*, 2003).

#### Qualité de l'eau

Les cultures de couverture, le travail réduit et les haies brise-vent sont tous favorables à la conservation de l'eau. En effet, lorsque l'incidence du vent sur le sol est moindre, l'évaporation du sol est réduite. De plus, la réduction du vent à la hauteur des cultures permet de réduire l'évapotranspiration des plantes (Lindwall *et al.*, 2003).

Dans une étude sur l'effet des bandes riveraines et des pratiques de conservation des sols sur les engrais exportés aux cours d'eau à l'échelle du bassin versant, Franti *et al.* (2004) ont évalué les quantités de sédiments et de nutriments à l'exutoire de deux bassins adjacents (un bassin témoin et un bassin intervention de 141 et 165 ha). Ces auteurs ont mis en place dans le bassin intervention 0,8 km (longueur) de bandes engazonnées, 0,8 km (longueur) de bandes arborescentes, du maïs en mosaïque, des rotations maïs-fève-luzerne, des cultures en terrasses et des voies d'eau engazonnées. Après deux ans, les exportations de sédiments étaient réduites de 97 % et les pertes de phosphore de 96 %. Une technique de séparation a permis d'évaluer l'efficacité relative de chacune des pratiques mises en œuvre dans le bassin ayant subi les interventions. Les résultats ont montré que les pratiques de conservation (cultures sur billons et rotations) et les bandes filtrantes étaient respectivement responsables de 83 et 14 % de la réduction de l'exportation des sédiments. Pour le phosphore, les pratiques de conservation et les bandes filtrantes ont entraîné des réductions de 79 et 17 %, respectivement. Bien que ces résultats semblent excessifs, ils montrent néanmoins l'importance des bandes enherbées sur la réduction de la pollution diffuse.

En Angleterre, Leeds-Harrison *et al.* (1996) ont comparé les effets de l'aménagement de bandes riveraines sur trois paires de bassins versants (bassins versants jumeaux). Les résultats n'ont cependant pas montré une amélioration notable de la qualité de l'eau au niveau des sédiments ou du phosphore. Néanmoins, en observant la qualité des échantillons avant et après le passage du ruissellement dans les bandes filtrantes, les auteurs ont pu constater un effet significatif de la zone tampon. Malgré cette amélioration de la qualité du ruissellement, le cours d'eau demeurait toujours significativement pollué. Les auteurs concluent que les concentrations à l'exutoire des bassins étaient dues aux réserves de sédiments et de contaminants provenant des berges ou du lit des cours d'eau. Ils avancent l'hypothèse que ces réserves doivent être épuisées avant que l'effet de l'aménagement puisse se faire sentir. Ce phénomène souligne donc l'importance de mettre en place des pratiques qui réduisent à la source l'exportation des contaminants. Couplées à des mesures de conservation des sols au champ (travail réduit, rotations et cultures de couverture), les bandes riveraines ont une efficacité de filtration plus grande et leur effet sur la qualité du milieu aquatique est d'autant plus marqué.



## Combinaisons de PGB incluant des PGB du couvert végétal - Synthèse-

### *Qualité des sols*

La combinaison du travail réduit et des rotations incluant des engrais verts a un effet positif sur le bilan humique du sol dont elle favorise la stabilité structurale et la résistance à l'érosion. Les aménagements du parcellaire combinés aux rotations réduisent également l'érosion.

### *Qualité de l'eau*

Combinés à la rotation des cultures, le fractionnement des doses d'engrais, la fixation symbiotique et les mycorhizes augmentent l'efficacité de la nutrition des végétaux. L'amélioration de la nutrition des végétaux a des répercussions sur les reliquats d'azote dans le sol après les récoltes et par conséquent, réduit les risques de lessivage de l'azote. Le concept de rejet moyen pondéré permet de répartir le risque dans le temps et l'espace. L'ajout de fumier sur des cultures de couverture peut aussi améliorer la qualité des sols et réduit par conséquent les risques d'érosion hydrique. Les rotations des cultures associées aux haies brise-vent favorisent la conservation de l'eau.

Généralement, l'adoption du travail réduit et des rotations en association avec les méthodes de lutte contre les adventices est bénéfique. Comme dans la lutte contre les insectes et les maladies, l'utilisation de plusieurs méthodes (approche multi-tactique) est à privilégier. La diversification des rotations modifie la pression de sélection et favorise la répression des adventices. La diversité des plantes nuisibles favorise la présence d'insectes et d'oiseaux ayant le potentiel d'exercer un contrôle naturel des ennemis des cultures. En associant aux cultures de couverture des doses réduites d'herbicides ou des applications en bandes, on réduit les risques de perte. Même s'ils peuvent intercepter les herbicides, les résidus ont un effet allélopathique potentiellement intéressant. Selon les doses d'herbicides et la quantité de résidus, il peut même y avoir un effet synergique.

Les rotations constituent des éléments favorables dans la lutte intégrée contre les maladies et les insectes. Avec le travail réduit, elles facilitent la suppression de certaines maladies. En association avec les cultures de couvertures et selon certains scénarios, elle présentent également un potentiel intéressant pour la lutte intégrée. Cependant, peu d'études documentent l'influence du travail du sol en combinaison avec les rotations et les cultures de couverture. Les interactions complexes entre les microorganismes du sol et leur fonction écologique sur le contrôle des ennemis des cultures sont peu connues et peu étudiées.

### *Qualité de l'air*

La fertilisation azotée, en combinaison avec la rotation des cultures incluant des cultures de couverture, permet d'augmenter la biomasse et de séquestrer plus de CO<sub>2</sub>, en plus de fournir de l'azote à la culture subséquente.

### *Biodiversité*

Tout en limitant les exportations de contaminants et de sédiments, l'association rotation des cultures/bandes riveraines rétablit la qualité de l'habitat aquatique. La combinaison apport de fumier/rotation des cultures favorise quant à elle la biodiversité microbienne.

### *Implications*

Une attention particulière doit être apportée aux scénarios de rotation pour éviter les effets phytotoxiques des résidus de culture sur les cultures subséquentes et optimiser la lutte contre les ennemis des cultures. L'approche multi-tactique représente un potentiel intéressant.

### 3.3 PGB de la fertilisation

#### 3.3.1 Combinaisons de PGB : Fertilisation et la protection des cultures

##### Qualité de l'eau

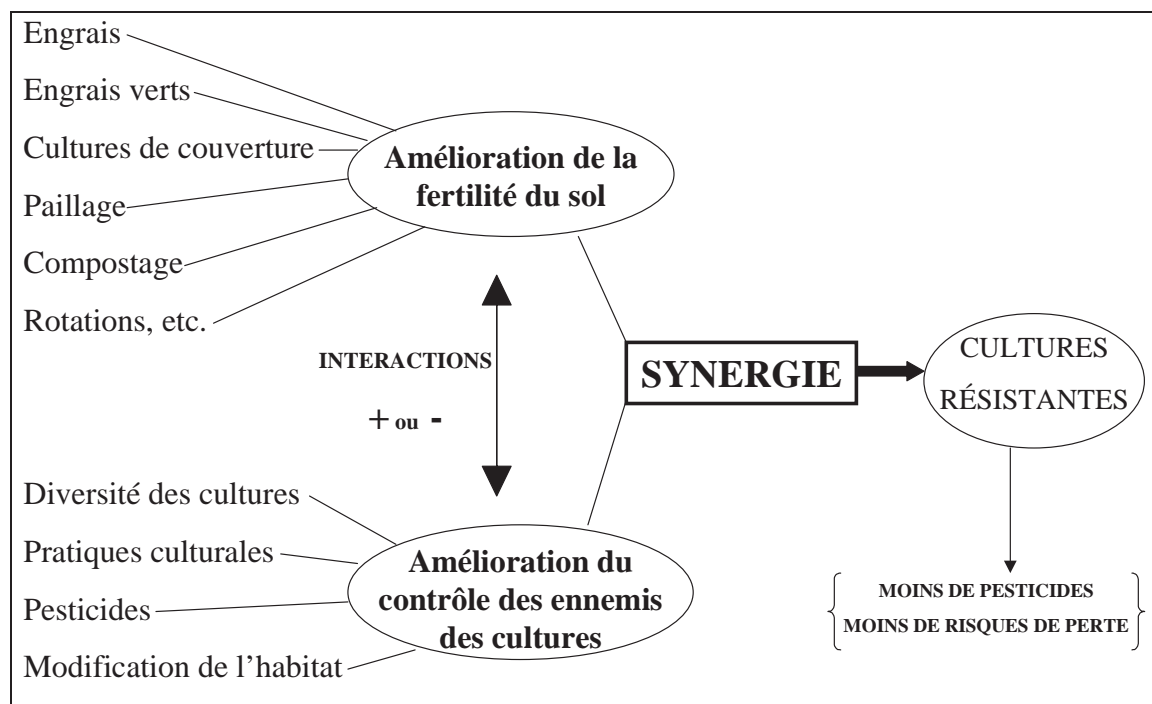
Pour qu'une culture utilise efficacement l'eau et la lumière, la fertilisation optimale est indispensable. Or, la croissance optimale d'une culture signifie qu'elle est plus vigoureuse et compétitive pour les ressources. Le positionnement des engrais, la période d'application et le type d'engrais peut favoriser la croissance des cultures au détriment des plantes nuisibles (Nazarko *et al.*, 2005). L'application en bande réduit la disponibilité des engrais (organique ou minéral) pour les mauvaises herbes de l'entre-rang (Douville, 2002; Melander *et al.*, 2005) alors que les engrais minéraux rapidement disponibles favorisent la croissance des plantes nuisibles. Le fractionnement des doses limite la disponibilité des éléments nutritifs pour les plantes nuisibles (Douville, 2002). D'après ces mêmes auteurs, l'utilisation des engrais organiques est bénéfique en raison de la libération plus lente des éléments nutritifs comparativement aux engrais minéraux. Le retard dans la disponibilité des éléments nutritifs se manifeste par un délai dans l'émergence et altère la dynamique des populations d'adventices.

En revanche, la surfertilisation peut nuire à la compétitivité des cultures. La fertilisation azotée dans le chou a augmenté le pourcentage de fruits affectés par la fausse arpenreuse du chou (*Trichoplusia ni*) (Roberts et Cartwright, 1991). La teneur du feuillage en éléments nutritifs influence la susceptibilité des plantes aux insectes ravageurs. La réponse morphologique suite à la fertilisation se traduit par des modifications du taux de croissance, de la période de maturité ainsi que de l'épaisseur et de la dureté de l'épicuticule (Altieri et Nicholls, 2003). La résistance des cultures peut aussi affecter le potentiel de récupération après une infestation d'insectes herbivores. La fertilisation organique semble être bénéfique sur la résistance des plantes en raison d'une teneur en  $\text{NO}_3^-$  moins élevée dans le feuillage (Altieri et Nicholls, 2003). De même, une surfertilisation peut causer un déséquilibre nutritionnel qui rend la culture moins résistante.

La synergie qui découle de la combinaison de la gestion optimale de la fertilisation et de la gestion intégrée des ennemis des cultures est schématisée à la figure 16. La rotation des cultures, les cultures de couverture ainsi que les pratiques de fertilisation optimale améliorent la fertilité du sol en apportant de la matière organique ainsi qu'en stimulant la vie microbienne. Par différentes pratiques culturales (polycultures, lutte intégrée, etc.), la gestion des ennemis des cultures est améliorée. Ces deux catégories de PGB agissent en synergie pour augmenter la résistance des cultures aux insectes ravageurs, ce qui se traduit par une réduction de l'utilisation des pesticides et des risques de perte. Inversement, une culture qui résiste bien à l'invasion d'insectes peut croître adéquatement et utiliser les engrais de façon optimale, ce qui réduit aussi les risques de perte en éléments nutritifs.

Dans la région des Prairies canadiennes, deux tiers des superficies est cultivé en travail réduit et la moitié de cette superficie est sous semis direct. Une étude dans les Prairies canadiennes a permis de déterminer l'influence de plusieurs méthodes de gestion des plantes nuisibles en semis direct (Blackshaw *et al.*, 2005). Retarder le semis d'un mois, augmenter la densité de plantation à 150 % (par rapport à la densité recommandée) et épandre les engrais au printemps a permis de réduire la biomasse de plantes nuisibles (tableau 18 et 19). Réduire la dose d'herbicide à 50 % de la dose recommandée n'a pas contribué à augmenter la biomasse produite sauf pour une année dans le canola (tableau 19). La date d'ensemencement et la

densité de semis interagissent pour réduire la biomasse de plantes nuisibles. Augmenter la densité de plantation a réduit la présence des adventices seulement lorsque l'ensemencement est effectué en avril. D'après Melander *et al.* (2005), l'augmentation de la densité d'ensemencement, la localisation des engrais et le sarclage mécanique sont aussi efficaces que les traitements conventionnels avec les herbicides.



Adapté d'Altieri et Nicholls (2003)

Figure 16 - Synergie potentielle entre la gestion optimale de la fertilisation et la gestion intégrée des ennemis des cultures

Les mêmes relations existent concernant la banque de semences des plantes nuisibles, à l'exception de la dose d'engrais (figure 17). Sur un des sites (Lethbridge) la diminution de la dose d'engrais n'a eu aucune influence significative. En revanche, sur l'autre site (Scott), la réduction de la dose d'engrais de moitié a permis d'enrichir la banque de semences d'adventices dans sol après les quatre années de l'expérience.

**Tableau 18 - Effets de la date d'ensemencement, de la densité de semis, de la période de fertilisation et de la dose d'herbicide sur la biomasse des plantes nuisibles (g/m<sup>2</sup>) dans une culture de blé**

	Lethbridge				Scott			
	1998	1999	2000	2001	1999	2000	2001	2002
Date d'ensemencement								
Avril	a84a	14a	12a	24a	69a	32a	6a	17a
Mai	38b	6b	17a	3b	31b	13b	1b	11a
Densité de semis								
100 %	58a	14a	20a	20a	63a	25a	5a	21a
150 %	52a	7b	8b	6b	35b	20a	2b	7b
Période de fertilisation								
Automne	44a	11a	18a	15a	50a	28a	5a	20a
Printemps	66a	10a	10b	11a	48a	17b	2b	7b
Dose d'herbicide								
50 %	9b	9a	11a	14a	16b	6b	4a	16a
b100 %	129a	11a	6a	12a	84a	40a	2a	11a

a Les données suivies par une même lettre au sein d'un même traitement, d'un même emplacement et d'une même année ne sont pas significativement différentes (0,05).

b Pour la 1<sup>ère</sup> année (1998) à Lethbridge et les 2 premières années à Scott (1999 et 2000), aucun herbicide n'a été appliqué. Étant donné la sévère compétition des plantes nuisibles, la pleine dose (100 %) a été appliquée les années suivantes afin de permettre l'expression des effets des autres traitements

Adapté de Blackshaw *et al.* (2005)

**Tableau 19 - Effets de la date d'ensemencement, de la densité de semis, de la période de fertilisation et de la dose d'herbicide sur la biomasse des plantes nuisibles (g/m<sup>2</sup>) dans une culture de canola**

	Lethbridge				Scott		
	1998	1999	2000	2001	1999	2000	2001
Date d'ensemencement							
Avril	a54a	32a	52a	47a	81a	162a	14a
Mai	52a	8b	8b	21b	84a	104b	7b
Densité de semis							
100 %	63a	29a	43a	44a	103a	165a	11a
150 %	43a	18b	18b	24b	64b	103b	10a
Période de fertilisation							
Automne	59a	28a	33a	39a	99a	143a	15a
Printemps	46a	12b	28a	27b	66b	124a	7b
Dose d'herbicide							
50 %	13b	7b	28a	38a	18b	20b	13a
b100 %	123a	33a	32a	30a	150a	255a	9a

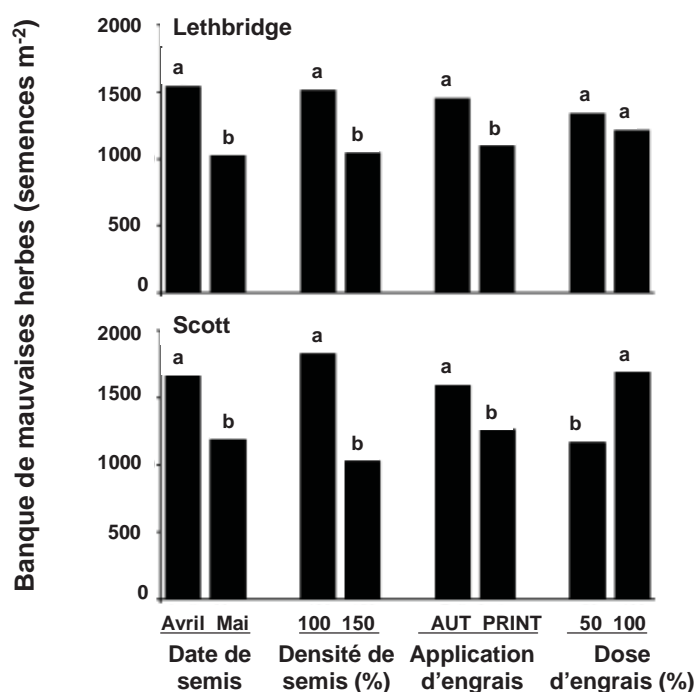
a Les données suivies par une même lettre au sein d'un même traitement, d'un même emplacement et d'une même année ne sont pas significativement différentes (0,05).

b Pour la 1<sup>ère</sup> année (1998) à Lethbridge et les 2 premières années à Scott (1999 et 2000), aucun herbicide n'a été appliqué. Étant donné la sévère compétition des plantes nuisibles, la pleine dose (100 %) a été appliquée les années suivantes afin de permettre l'expression des effets des autres traitements.

Adapté de Blackshaw *et al.* (2005)

Il est intéressant de noter que l'augmentation de la densité d'ensemencement en combinaison avec l'application des engrais au printemps se reflète par des effets antagonistes sur la quantité de semences dans le sol après 4 ans. La densité d'ensemencement de 150 % a réduit le nombre de semence dans le sol de 31 et 44 % pour Lethbridge et Scott respectivement. La fertilisation au printemps a réduit le nombre de semence dans le sol de 24 et 21 % pour Lethbridge et Scott respectivement. En combinant ces deux pratiques, les auteurs ont obtenu des réductions de 38% à Lethbridge et de 49 % à Scott. En se référant à la définition d'antagonisme, on a bel et bien une réduction de l'efficacité des pratiques lorsque celles-ci sont combinées comparativement à leur efficacité individuelle. Toutefois, malgré l'antagonisme de la combinaison, elle s'avère tout de même positive puisque globalement, la banque de semences s'est appauvrit.

Les auteurs ont remarqué que retarder l'ensemencement d'un mois pour le canola n'est pas acceptable au niveau des rendements. Même si la densité élevée d'ensemencement n'a pas affecté les rendements, des précautions doivent être prises afin d'éviter la prolifération des maladies et des insectes. L'air circule moins bien lorsque la densité d'ensemencement est plus élevée.



Densité de semis et dose d'engrais : en % des valeurs recommandées.  
 Pour un même traitement sur un même site, la différence entre les barres ayant la même lettre n'est pas significative (0,05).

Adapté de Blackshaw *et al.* (2005)

**Figure 17 - Effets de la date d'ensemencement, de la densité de semis, de la période de fertilisation et de la dose d'herbicide sur les semences de mauvaises herbes dans le sol après les 4 ans de l'étude à Lethbridge et Scott**

### 3.3.2 Combinaisons de PGB : Fertilisation et élevage

#### Qualité de l'eau

La combinaison de l'entreposage et/ou du traitement avec la gestion optimale de la fertilisation est bénéfique. La teneur en pathogènes et en eau est réduite alors que le contenu en éléments nutritifs est amélioré. Si les modalités optimales d'épandage sont respectées, les risques de perte sont amoindris puisque pour un même volume d'engrais de ferme épandu, la teneur en eau et en pathogènes est inférieure alors que la valeur fertilisante est supérieure. Le traitement des fumiers comme la séparation de phase améliore les valeurs fertilisantes en concentrant le phosphore dans la phase solide et en augmentant la siccité du produit épandu (Martin *et al.*, 2003). Parallèlement, les rejets de phosphore et d'azote peuvent être contrôlés par la régulation de l'alimentation (Turgeon *et al.*, 2002). Encore une fois, en respectant les modalités optimales d'épandage, le risque de contamination est moindre. En combinant ces PGB aux bandes riveraines, le risque de transport des pathogènes est d'autant plus limité que la quantité de pathogènes à la source est diminuée.

Le pâturage intensif (CRAAQ, 2000) et le retrait des animaux (Byers *et al.*, 2005) du cours d'eau réduit les risques de contamination. De ce fait, les pratiques optimales d'épandage interagissent positivement sur la qualité de l'eau.

L'ajout répété de fumier augmente la solubilité du phosphore dans les sols et augmente par conséquent les risques de transfert vers les cours d'eau (Simard *et al.*, 2001). Le type de fumier de même que la gestion des déjections influencent le statut du phosphore dans les sols. Un sol ayant reçu du fumier à long terme et soumis à des inondations occasionnelles est plus à risque que si des engrais minéraux sont épandus (Simard *et al.*, 2001).

### 3.3.3 Combinaisons de PGB : Fertilisation et aménagements du parcellaire

#### Qualité de l'eau

Le respect des modalités optimales d'épandage minimise considérablement l'exportation de sédiments et de contaminants hors des champs et réduit d'autant plus la pression sur les aménagements mis en place. Toutefois, si une pluie survient après un épandage, peu importe les modalités d'épandage employées, le risque de contamination est accru. Dans ce contexte, la présence d'aménagements, tels que les bandes riveraines ou les avaloirs peuvent constituer une seconde ligne de défense contre le ruissellement et l'érosion. En réduisant les exportations d'éléments nutritifs et de microorganismes, la gestion optimale de la fertilisation augmente ainsi l'efficacité des aménagements du parcellaire.

Quelques études à l'échelle du bassin-versant ont été effectuées afin de déterminer l'effet des zones tampons sur la qualité de l'eau de zones agricoles. Même si la plupart des études recensées confirment l'effet bénéfique des bandes tampons, il reste difficile d'évaluer leur effet par rapport aux autres PGB pouvant être mises en place dans le bassin. D'ailleurs, c'est généralement suite à une série d'interventions effectuées à l'intérieur d'un bassin versant que l'effet des PGB est estimé.

Dans le bassin versant du Ruisseau aux Castors, Michaud (2004) a évalué, sur une période d'environ quatre ans (1999-2003), l'effet de la mise en place de structures de captage et de bandes riveraines associées à une mise à jour des programmes et des modes de gestion des engrais de ferme sur les exportations de phosphore. Sur ce bassin, 35 embouchures de fossés

ont été fermées par des structures de captage, 4 kilomètres de bandes riveraines ont été implantés et une cinquantaine de foyers d'érosion ont été stabilisés (figure 18). De plus, les épandages des engrais de ferme ont été modifiés afin de les ajuster aux besoins agronomiques des cultures.

Malgré une augmentation de 9 % de l'importance des superficies en cultures annuelles au détriment des cultures fourragères dans les rotations des cultures du bassin versant, cette étude a mis en évidence une réduction de 30 et 20 % des concentrations en phosphore total (PTOT), en période de crue<sup>18</sup>. C'est d'ailleurs pendant les périodes de crue que la majorité des exportations de phosphore sont observées. Les diminutions en phosphore soluble (PRS) sont quant à elles moins prononcées<sup>19</sup>. Pour les matières en suspension (MES), seules les données de 1999-2001 sont significatives. Les interventions agroenvironnementales ont réduit l'exportation des MES d'environ 30 % (tableau 20).

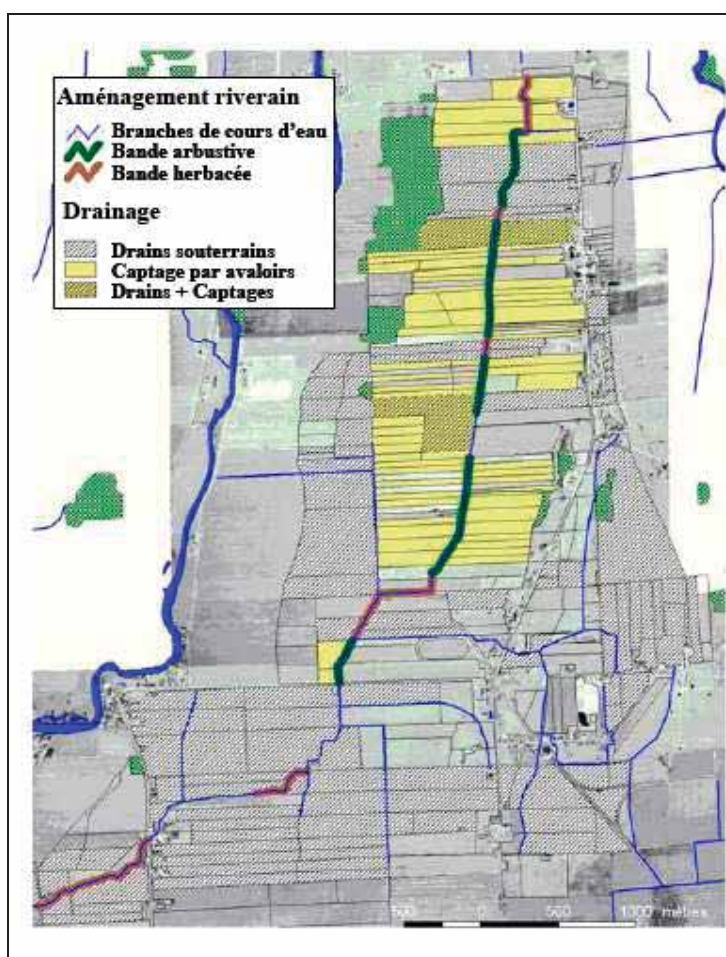


Figure 18 - Cartographie des aménagements réalisés sur le bassin versant du ruisseau au Castor

<sup>18</sup> Réduction de 318  $\mu\text{g/L}$  de PTOT (période de référence en 1997-1999) à 223  $\mu\text{g/L}$  et 253  $\mu\text{g/L}$  au cours des périodes suivant les interventions agroenvironnementales (1999-2001 et 2001-2003).

<sup>19</sup> Alors que la concentration moyenne de l'année de référence était de 108  $\mu\text{g/L}$ , celle de 1999-2001 est de 23% plus basses (81  $\mu\text{g/L}$ ). La concentration moyenne pour la période 2001-2003 (94  $\mu\text{g/L}$ ) n'est pas significativement différente.

**Tableau 20 - Moyennes des concentrations en phosphore total, en phosphore réactif soluble, en matières en suspension et en calcium en solution**

Période (Oct-Sept.)	PTOT <sup>(1)</sup> (ug L-1)	PRS (ug L-1)	MES (mg L-1)
1997-1999	318 a	108 a	140 a
1999-2001	223 b	81 b	98 b
2001-2003	253 b	94 ab	156 a

(1) Les moyennes suivies d'une lettre différente sont significativement différentes au seuil de 5%.

Moyennes ajustées au modèle de covariance pour un débit de pointe moyen de 4,0 mm/j  
Tiré de Michaud (2004)

Selon l'auteur, la diminution des concentrations en phosphore total, sur une base comparative pondérée pour le débit du ruisseau, est attribuable aux interventions qui ont pour effet de réduire l'amplitude des crues et de briser la connectivité des champs au réseau hydrographique. Toutefois, il reste difficile de discerner les effets des PGB sur la dynamique du P, que ce soit ceux des aménagements du parcellaire ou ceux du changement des pratiques de fertilisation.

Suivant cette logique, la présence d'une bande riveraine peut limiter la contamination microbienne provenant de l'épandage de fumier (Atwill *et al.*, 2002). Par contre, une autre étude n'a pas pu mettre en évidence une réduction des populations de coliformes fécaux suite à l'implantation d'une bande riveraine (Fajardo *et al.*, 2001).

### **Combinaisons de PGB incluant des PGB du couvert végétal -Synthèse-**

#### *Qualité de l'eau*

La gestion optimale de la fertilisation, associée ou non au pâturage intensif ou au retrait des animaux du cours d'eau, augmente l'efficacité des aménagements du parcellaire et réduit les risques de contamination en azote, en phosphore et en microorganismes pathogènes. La fertilisation adéquate des cultures augmente la résistance des plantes aux ennemis des cultures. De plus, les engrais de ferme jouent un rôle dans la résistance des cultures. La fertilisation optimale et la lutte intégrée contre les ennemis des cultures agissent en synergie pour réduire les risques de contamination de l'eau par les produits phytosanitaires.

Depuis les dernières années, la capacité d'entreposage des structures a augmenté. Les risques de débordements, responsables de contaminations ponctuelles, sont réduits et les restrictions d'épandage en raison du manque d'espace d'entreposage sont moindres. La régie alimentaire peut aussi réduire les rejets d'azote et de phosphore dans les déjections en optimisant la conversion alimentaire.

#### *Synthèse (suite)*



#### *Qualité de l'air*

Lorsque l'entreposage adéquat des fumiers est combiné à différents traitements (compostage, séparation de phase, digestion), la qualité de l'air est améliorée. Une meilleure conversion alimentaire réduit pour sa part l'émission d'odeurs.

#### *Implications*

Les modalités optimales d'épandage doivent être respectées, mais le choix de la période d'épandage en fonction des précipitations est crucial pour préserver la qualité de l'eau.

L'amélioration de la conversion alimentaire doit être prioritaire dans les systèmes de production animale. Éviter la surfertilisation, car elle réduit la résistance des cultures aux parasites.

### **3.4 PGB de la protection des cultures**

#### **3.4.1 Combinaisons de PGB : Protection des cultures et élevages**

##### Qualité de l'eau

Les effets de la gestion des élevages interreliés à ceux de la lutte antiparasitaire ne sont pas aisés à cerner. On peut cependant soulever les craintes qu'ont certains cultivateurs face à la possibilité de contaminer leurs champs avec des plantes nuisibles contenues dans les fumiers ou les lisiers épandus. Quelques études ont en effet démontré la survie des semences de plantes nuisibles après un parcours dans le tube digestif des animaux et un séjour dans les fumiers (Besson *et al.*, 1986; Courtney, 1973; Harmon et Kleim, 1934, cité par Cloutier *et al.*, 2000). Ce phénomène pourrait peut-être mener à une plus grande utilisation d'herbicides et augmenter les risques de contamination. Toujours est-il qu'aucune étude n'a établi cette relation.

Cloutier *et al.* (2000) ont voulu déterminer si le lisier de porc contenait des semences de plantes nuisibles et connaître la durée de survie des semences dans le lisier. Les auteurs ont immergé dans du lisier des sacs de nylon contenant quatre espèces de mauvaises herbes (*Amaranthus retroflexus* L., *Chenopodium album* L., *Setaria pumila* et *Echinochloa crus-galli* (L.)) pendant des périodes de 1, 2, 3 et 4 mois. Les résultats ont démontré que le lisier échantillonné à la ferme pendant la période printanière ne contenait pas de semences de plantes nuisibles. Les fosses à lisier ne semblent donc pas poser un risque de contamination des cultures par les espèces non désirables. Toutefois, les auteurs soulignent le risque de contamination des lagunes à lisier par les plantes poussant sur le pourtour des lagunes. Quant à la survie des semences de plantes nuisibles dans les lisiers, les résultats montrent une faible survie des semences après deux mois d'immersion dans le lisier et une survie nulle après trois mois (tableau 21). La faible survie des semences dans le lisier serait due aux conditions anaérobies du milieu ainsi qu'à l'activité microbiologique (Rimovsky et Sverakova, 1993, cité par Cloutier *et al.*, 2000). Le risque de propagation des plantes nuisibles par l'application de lisier est donc minime.

**Tableau 21 - Pourcentage de semences de plantes nuisibles viables après une immersion dans une lagune ou une fosse à lisier**

Nb de mois	Amaranthus retroflexus		Chenopodium album		Setaria pumila		Echinochloa crusgalli	
	Lisier	Contrôle	Lisier	Contrôle	Lisier	Contrôle	Lisier	Contrôle
	a %							
1	34-77 (3-10)	57-83 (7-14)	2-8 (1-9)	15-36 (1-4)	0-12 (4-18)	54-95 (0-6)	0-2 (3-16)	24-91 (0-11)
2	1-11 (1-13)	26-91 (1-4)	0.3-1 (0-1)	18-27 (0-1)	0-1 (2)	55-97 (1-4)	0-0.3 (0-1)	26-92 (1-8)
3	0	34-88 (1-7)	0	12-18 (1-7)	0	42-98 (2-11)	0	32-92 (1-3)
4	0	28-94 (4-6)	0	11-20 (1-4)	0	61-94 (4-6)	0	28-85 (1-4)

a Représente la moyenne de deux échantillons de 100 graines (l'écart-type figure entre les parenthèses).

Adapté de Cloutier *et al.* (2000)

Selon Leblanc *et al.*, (2000), la levée des plantes nuisibles était moins grande avec l'application du lisier comparativement à un engrais minéral. La teneur en acides gras inhiberait la germination et la présence d'azote sous forme organique retarderait la disponibilité au détriment des plantes nuisibles. Par contre, autour des fosses ou des lagons, l'élimination des adventices est importante car ces dernières peuvent contaminer le lisier (Cloutier *et al.*, 2000). Il est intéressant de noter que dans une prairie, il y a une diminution graduelle de la diversité des adventices avec les années (Maryse Leblanc, communications personnelles, 13 mars 2006). La prairie réduit la banque d'annuelles qui sont surtout à la surface. Par ailleurs, le fumier liquide peut favoriser certaines adventices alors que le compostage permet d'éliminer efficacement les semences de plantes nuisibles (Douville, 2002).

### Biodiversité

La réduction des quantités de pesticides épandues associée au pâturage intensif ainsi qu'à d'autres mesures de réduction à la source de pathogènes ou nutriment (alimentation, entreposage, traitement) favorise la biodiversité aquatique en augmentant la performance des bandes riveraines.

### **Combinaison de PGB incluant des PGB de protection des cultures -Synthèse-**

#### *Qualité de l'eau*

Les fumiers peuvent parfois être une source de semences de plantes nuisibles et augmenter indirectement l'utilisation de pesticides et les risques de contamination de l'eau. Cette relation n'est pas prouvée.

#### *Biodiversité*

La réduction des quantités de pesticides épandues, associée au pâturage intensif ainsi qu'à d'autres mesures de réduction à la source de pathogènes ou nutriment (alimentation, entreposage, traitement), favorise la biodiversité aquatique tout en augmentant la performance des bandes riveraines.

### 3.4.2 Combinaisons de PGB : Protection des cultures et aménagements du parcellaire

#### Qualité de l'eau

La lutte intégrée permet d'abaisser les doses de pesticides appliquées, ce qui réduit les risques de contamination. La présence de bandes riveraines favorise l'épuration des pesticides contenus dans le ruissellement par les processus d'infiltration ou de précipitations des pesticides adsorbés sur les colloïdes. Parce que moins de pesticides atteignent la bande riveraine, la probabilité que les pesticides soient filtrés par la bande est supérieure.

#### Biodiversité

En combinaison avec les pratiques de conservation et la lutte intégrée, la bande riveraine favorise la création d'habitat pour la faune et la flore. Si moins de contaminant est acheminé vers la bande riveraine, celle-ci pourra les filtrer plus efficacement. Or, dans une optique de biodiversité, la bande riveraine encourage aussi la qualité de l'habitat aquatique (Damboise *et al.*, 2001). Ce rôle des bandes riveraines est accentué par l'application des pratiques de conservation et de la lutte intégrée qui abaissent la quantité de contaminants transportée par le ruissellement. La contamination de l'habitat aquatique est donc amoindrie avec l'adoption de ces PGB.

L'ajout d'engrais et l'utilisation des pesticides peuvent nuire à la biodiversité du pourtour des champs (Marshall, 2005). À la biodiversité des plantes localisées au pourtour des champs est associée une diversité des insectes prédateurs et parasitoïdes (Olfert *et al.*, 2005). En dépit des connaissances actuelles sur la présence d'arthropodes bénéfiques dans le pourtour des parcelles et de leur migration potentielle dans les parcelles, la compréhension de ce phénomène demeure partielle. Le pourtour des parcelles peut aussi représenter un risque pour la migration des pathogènes (Bailey et Gossen, 2005). Selon ces auteurs, la combinaison de plusieurs PGB relatives à la lutte contre les maladies est profitable pour réduire les risques d'infestation pathogénique tout en maintenant la biodiversité du pourtour des parcelles.

Plusieurs auteurs s'accordent pour affirmer que les haies brise-vent constituent un habitat intéressant pour les prédateurs et favorisent la biodiversité (Bundle, 2004; Marshall, 2005). D'ailleurs, Clark *et al.* (2005) suggèrent que les bandes riveraines devraient comportées des espèces ligneuses. Les caractéristiques inhérentes aux bandes arborées protègent et favorisent la biodiversité des espèces terrestres. De plus, en réduisant la vitesse du vent, les lisières arborées limitent le transport des pathogènes (inoculum bactériens ou fongiques) fixés sur les particules de sols érodés vers d'autres parcelles (Bundle, 2004). La dissémination des maladies est ainsi limitée.

### 3.5 PGB des élevages et des effluents

#### 3.5.1 Combinaisons de PGB : Élevage et aménagements du parcellaire

##### Qualité de l'eau

Le choix de la régie animale (le type d'animal, la nutrition animale, l'entreposage et/ou les traitements des fumiers) influence la composition des fumiers et lisiers ainsi que la solubilité des éléments nutritifs. La régie des pâturages, qui inclut le choix de la zone par la mise en place de clôtures, de la densité et du type d'animaux, influence aussi la quantité de déjections et donc la quantité d'éléments fertilisants et de pathogènes laissés au sol. Ces conditions aux pâturages

ont des répercussions sur les quantités de sédiments et de nutriments, ce qui affectent l'efficacité des aménagements hydro-agricoles comme les bandes riveraines. En évitant le surpâturage, le pâturage intensif offre une meilleure couverture du sol et réduit les risques de ruissellement et d'érosion (CRAAQ, 2000).

Jokela *et al.* (2004) rapportent les résultats d'études de suivi de la qualité de l'eau sur une période de dix ans, effectuées dans deux bassins versant au Vermont (Meals, 1990; VT RCWP Coord. Comm., 1991; Meals, 1996). Dans ces bassins, les PGB mise en place incluait des systèmes d'entreposage du fumier ainsi que des structures de contrôle du ruissellement en provenance des aires d'exercice extérieures et des laiteries de ferme. Alors que les résultats ont montré une réduction significative des concentrations et des charges de sédiments et de bactéries au cours d'eau, les concentrations et les charges de phosphore n'ont pas significativement diminué, malgré l'efficacité de ces aménagements à l'échelle de la parcelle. Les bénéfices d'une combinaison peuvent donc se manifester à l'échelle du parcellaire sans qu'ils n'apparaissent à l'échelle du bassin versant en raison d'un effet de décalage. Dans un bassin, abaisser la teneur des sols en phosphore nécessite une longue période de temps.

Fajardo *et al.* (2001) ont constaté une réduction de la concentration en  $\text{NO}_3^-$  du ruissellement grâce aux bandes riveraines localisées près de tas de fumier. D'après la même logique, les enclos d'hivernage peuvent être une source de contamination ponctuelle d'azote, de phosphore et de microorganismes pathogènes. L'ajout de litière de paille et de copeaux de bois, en combinaison avec une bande enherbée, a permis de réduire de moitié les exportations d'azote et de phosphore total (Pelletier *et al.*, 2003). La présence des bandes enherbées a réduit considérablement la migration des coliformes fécaux vers les eaux de surface et souterraine, sans toutefois atteindre une efficacité de 100 %. Les auteurs émettent certaines recommandations telles le déplacement des enclos d'hivernage pour éviter l'accumulation du phosphore et le nivellement de la surface afin de d'obtenir un écoulement uniforme vers les bandes enherbées. Si le déplacement des enclos est complexe, il est préférable d'imperméabiliser le sol sous les enclos pour diriger l'eau vers les bandes enherbées.

### Qualité de l'air

Les haies brise-vent ou les bandes riveraines arborées, tout comme la saine gestion des élevages (alimentation, entreposage des fumiers, pâturages intensifs) agissent indépendamment sur la réduction des odeurs.

### Biodiversité

Indirectement, le pâturage intensif et les aménagements hydro-agricoles comme les haies brise-vent ou les bandes riveraines interagissent pour enrichir la biodiversité et prévenir la contamination des habitats aquatiques. En effet, le pâturage intensif encourage la dissémination d'espèces moins compétitives (AAC: [http://www.agr.gc.ca/pfra/biodiversity/grazing\\_f.htm](http://www.agr.gc.ca/pfra/biodiversity/grazing_f.htm)) et comparativement aux terres cultivées, les pâturages abritent davantage de nids (Poulin *et al.*, 2005). De la même façon, les bandes riveraines et les haies brise-vent constituent un habitat intéressant pour les animaux (Deschênes *et al.*, 1999; Paquet et Maisonneuve, 2004; Altieri, 1999; Gratton, 1999; Clark *et al.*, 2005) et contribuent à la diversification des espèces végétales sur le territoire (Brandle, 2004; Marshall, 2005). En réduisant l'exportation de sédiments et de contaminants vers le cours d'eau, le pâturage intensif, au même titre que le travail réduit (Yates *et al.*, 2006), interagit avec les bandes riveraines pour améliorer la qualité de l'habitat aquatique.

## Combinaison de PGB de l'élevage et d'aménagement du parcellaire -Synthèse-

### *Qualité de l'eau*

La gestion des élevages et les aménagements agricoles interagissent de façon indirecte. La régulation des élevages et des pâturages ainsi que l'entreposage adéquat des fumiers réduisent les risques de contamination microbienne et améliorent l'efficacité des aménagements du parcellaire. De plus, la végétation riveraine (surtout arborée), en combinaison avec l'application de pesticides à l'aide de buses à faible dérive, a la capacité de contrôler l'émission des aérosols de pesticides et de réduire la contamination des cours d'eau.

### *Qualité de l'air*

Les aménagements comme les haies brise-vent ou les bandes riveraines arborées, comme la saine gestion des élevages (alimentation, entreposage des fumiers, pâturages intensifs) contribuent à l'amélioration de la qualité de l'air. Ces PGB interagissent indirectement sur la réduction des odeurs.

### *Biodiversité*

La réduction de l'émission de contaminants à la source (pâturage intensif, entreposage ou traitement des fumiers, régulation alimentaire, retrait des animaux des cours d'eau, gestion des enclos d'hivernage) améliore l'efficacité des aménagements du parcellaire. Cette combinaison peut aussi augmenter la biodiversité aquatique. En dépit de la croyance que les bandes riveraines abritent des ennemis des cultures, la plupart des études soutiennent que la biodiversité favorise la lutte biologique par des ennemis naturels.

### 3.6 Les PGB et l'agriculture de précision

L'*agriculture de précision* prend en compte l'hétérogénéité intra-parcellaire et met à profit les techniques de la géomatique pour améliorer les rendements, grâce notamment à un meilleur dosage des engrais. La *conservation de précision*, quant à elle, est définie comme l'ensemble des technologies et de procédures visant la mise en place des PGB, ou pratiques de conservation, en intégrant la variabilité spatiale et temporelle des systèmes naturels et agricoles (Berry *et al.*, 2003, cité par Delgado *et al.*, 2005). Dans ce nouveau domaine, l'accent est mis sur la connectivité entre les cycles et les flux d'énergie, de matériaux, de produits chimiques et d'eau afin de réduire les impacts environnementaux, le transport et la contamination de l'eau tout en intégrant des pratiques qui maximisent la conservation et la productivité (Delgado *et al.*, 2005). Parce qu'il contribue aussi à la conservation de l'eau et des sols des écosystèmes naturels, ce domaine d'étude a une portée plus large que l'agriculture de précision.

Plusieurs études sur la *conservation de précision* existent. Le «*Journal of Soil and Water Conservation*» (Vol. 60, No.6, 2005) propose d'ailleurs 16 articles dédiés à ce sujet. Ces articles discutent de l'intégration de la variabilité spatiale et temporelle des systèmes naturels et agricoles et des liens spatiaux de l'échelle du champ à celle du bassin versant. Les concepts de la conservation de précision et ses applications à la gestion des systèmes de conservation des sols et de l'eau sont aussi abordés. On y discute également des théories qui sous-tendent les concepts de patrons spatiaux de l'érosion, leurs effets sur les rendements et les méthodes permettant d'améliorer l'efficacité des pratiques de gestion du paysage. Plusieurs exemples d'application sont présentés.

#### Qualité de l'eau

Les applications de l'agriculture ou de la conservation de précision ont longtemps été axées sur l'application variable d'éléments nutritifs et de pesticides à l'intérieur des champs. Ainsi, Delgado *et al.* (2005) ont étudié le potentiel d'application de l'azote adapté à des *zones de gestion spécifiques* afin de réduire le lessivage des nitrates ( $\text{NO}_3^-$ ). Les zones de gestion spécifiques ont été délimitées à l'aide de photographies aériennes, de la topographie et de l'expérience de gestion de la variabilité des sols des producteurs. Pendant deux saisons de croissance, les auteurs ont comparé les effets de deux modes d'application de l'azote (application uniforme *vs* application variable selon des zones de gestion spécifiques et une division matricielle du parcellaire agricole). Les taux de lessivage des  $\text{NO}_3^-$  étaient variables selon les zones de gestion spécifiques et plus élevés dans les zones de faible productivité. Selon les auteurs, les zones de faible productivité seraient un bon indicateur du potentiel de lessivage des  $\text{NO}_3^-$ . À des taux d'application d'azote de plus en plus élevés, les aires de faible productivité perdent plus de  $\text{NO}_3^-$  par lessivage. Puisque d'autres facteurs que l'azote limitent les rendements, appliquer l'azote en fonction des rendements maximums possibles serait une meilleure stratégie pour maximiser les rendements et réduire le lessivage des  $\text{NO}_3^-$ . En utilisant des taux d'application variables selon les zones de gestion spécifiques, les auteurs concluent que les pertes de  $\text{NO}_3^-$  pourraient être réduites de près de 25 %. Évidemment, les PGB qui réduisent le lessivage des  $\text{NO}_3^-$  (fractionnement, respect des modalités d'épandage optimales, cultures de couverture, etc.) auront un impact d'autant plus grand sur la qualité de l'eau qu'elles seront utilisées en combinaison avec la fertilisation de précision.

Sadler *et al.* (2005) ont évalué les possibilités de conservation de l'eau et des nutriments en utilisant l'*irrigation de précision*. Quoique le terme *irrigation de précision* invoque une quantité précise d'eau, appliquée à la bonne période mais de façon uniforme (Evans *et al.*, 2000), Sadler et ses

collaborateurs ont inclus la notion de capacité spatiale variable à ce concept, i.e. une quantité d'eau variable selon la localisation dans le champ. En modifiant l'équipement actuel d'irrigation, il devient alors possible de ne plus irriguer les zones qui ne sont pas en cultures (affleurements rocheux, zones non cultivables, plans d'eau, routes, etc.) ou de diminuer et d'augmenter les quantités d'eau irriguée pour certaines zones. L'irrigation de précision utilise 8 à 20 % moins d'eau que l'irrigation conventionnelle. En plus d'économiser l'eau, elle permet de mieux contrôler l'état de saturation des sols et d'éviter ainsi des pertes de rendements. La gestion spatiale de l'eau contribue également à intégrer de la variabilité spatiale du système sols-plantes et augmente donc l'efficacité d'utilisation de l'eau et permet aussi réduire le potentiel de lessivage des  $\text{NO}_3^-$ .

Les mêmes auteurs citent une étude effectuée dans le bassin de la rivière Columbia qui montre que les parties basses du territoire agissent comme principales sources de percolation et de lessivage des nutriments vers l'aquifère profond. La gestion précise de l'eau et des produits chimiques agricoles à l'intérieur de petites portions du champ peut avoir un impact important sur la réduction de la pollution des aquifères (Sadler *et al.*, 2005). Éviter la saturation des sols contribue à diminuer les risques d'érosion et d'exportation des éléments nutritifs en surface ainsi que les risques de maladies, plus particulièrement les infections fongiques.

### Qualité de l'air

Dans les prairies canadiennes, Pennock (2005) a proposé d'utiliser une des multiples techniques de segmentation du paysage (Pennock, 2003; MacMillan *et al.*, 2000; Florinsky *et al.*, 2002) pour gérer simultanément la séquestration du carbone et les émissions de  $\text{N}_2\text{O}$ . La technique est basée sur des observations terrain qui ont fait ressortir des dynamiques fort différentes entre les processus qui gèrent la séquestration du carbone et les émissions  $\text{N}_2\text{O}$ . Sous végétation naturelle, les stocks de carbone du sol sont sensiblement les mêmes selon les différentes positions du paysage. En milieu agricole toutefois, l'érosion transporte le carbone organique des horizons supérieurs du sol riches en carbone vers les positions plus basses. Pennock (2003) a observé un contenu en carbone variant de 55.3 Mg/ha pour les hauts de pente convexe à 100.9 Mg/ha pour les dépressions et passant par 89.5 Mg/ha pour les bas de pente concaves. L'implantation de PGB telles que les cultures de couverture protège non seulement les sols de l'érosion, mais favorise le maintien et la séquestration du carbone dans les zones plus sujettes à l'érosion.

Les émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  résultent d'une suite complexe de processus où l'action des bactéries intervient et où l'importance relative des processus spécifiques varie selon le type d'utilisation du sol (Wrage *et al.*, 2001). Ces processus dépendent de facteurs climatiques ainsi que de la disponibilité en oxygène, en azote minéral et en carbone organique dans les sols. Dans les sols cultivés, le facteur majeur de contrôle des émissions de  $\text{N}_2\text{O}$  est la teneur en oxygène des sols car des émissions accrues de  $\text{N}_2\text{O}$  se produisent sous conditions anaérobies. Souvent, on se réfère plutôt à la teneur des sols en eau. Des émissions accrues sont généralement observées lorsque 60 à 90 % des espaces interstitiels sont remplis d'eau.

Le patron de distribution de la teneur en eau des sols et des émissions d'azote dépend nettement de la position dans le paysage. Les émissions des zones plus humides, comme les bas de pente concaves, sont systématiquement plus élevées que celles observées sur les hauts de pente convexes. Les auteurs proposent donc d'instaurer des PGB selon la position dans le paysage. L'établissement de cultures sur résidus sur les hauts de pentes convexes aurait pour effet de maximiser la séquestration du carbone. Les zones de faibles rendements situées en position élevée pourraient être en cultures herbagères pérennes ou en cultures à rotations

courtes qui favorisent l'accumulation de carbone dans le sol. L'établissement ou la restauration de bandes riveraines et de zones humides dans les positions basses favoriserait l'accumulation de carbone tout en réduisant les émissions de  $N_2O$ . Toutefois, ceci pourrait entraîner une hausse des émissions de  $CH_4$ . Finalement, l'application de l'azote à taux variables dans les positions basses assurerait une meilleure efficacité des engrais et réduirait les émissions.

### Qualité des sols

D'autres pratiques de conservation de précision visent à réduire l'érosion, et conséquemment les pertes de nutriment en surface. Ainsi, Mueller *et al.* (2005) ont utilisé des informations spatiales précises et la technique de régressions séquentielles multiples et logistiques afin d'améliorer la résolution spatiale des cartes pédologiques qui fournissent une information sur la localisation des zones érodées. Des attributs de terrains (pente, longueur de pente, indice d'humidité), la réflectance (visible, rouge, infrarouge) et la conductivité électrique des sols ont été utilisés comme variables de régression. Les cartes de probabilité d'érosion produites en utilisant des cartes au 1: 15840 coïncidaient bien avec les limites des cartes pédologiques au 1: 3700. Ces nouvelles cartes produites peuvent ensuite être utilisées afin de planifier de façon efficace et économique les pratiques de gestion bénéfiques.

Au Québec, la technologie GPS est notamment utilisée afin de créer des modèles numériques d'altitude de précision qui servent à guider le nivellement des terres (Rivest, 2003) ainsi que pour l'aménagement de structures agricoles. Cette technique a aussi été utilisée afin d'identifier les patrons d'écoulement de l'eau au niveau des champs (Deslandes *et al.*, 2002). Par ailleurs, en connaissant les superficies de drainage, la conservation de précision peut aussi servir à mieux positionner et dimensionner les structures de contrôle du ruissellement et de l'érosion, telles que les avaloirs, les tranchées filtrantes et les voies d'eau engazonnées.

Le risque environnemental associé aux épandages dépend non seulement de la source des contaminants, mais aussi des facteurs qui en régissent le transport. Il est donc important de connaître l'hydroactivité du parcellaire afin de pouvoir bien cibler les zones à risque (Giroux *et al.*, 2003a). La conservation de précision est un outil de gestion à fort potentiel.

Les structures de captage du ruissellement, des sédiments et des éléments nutritifs, comme les bandes enherbées ou les bandes riveraines, sont conçues avec une largeur uniforme. Cependant, l'analyse spatiale des conditions au champ, particulièrement la topographie, indique que le ruissellement se concentre généralement vers certaines zones du champ plutôt que de se distribuer uniformément sur la bande riveraine. L'efficacité de celle-ci est donc diminuée. En utilisant des techniques et de l'information spatiale précise (topographie, localisation des cours d'eau, sols, pratiques culturales) à l'échelle intra-parcellaire, Dosskey *et al.* (2005) ont proposé une méthode qui permet de construire des zones tampons de largeurs variables afin d'en maximiser l'efficacité. Les résultats d'une modélisation effectuée à partir de données de quatre fermes au Nebraska ont démontré, pour un événement ayant une période de récurrence de 10 ans, des augmentations de rétention des sédiments variant de 7 à 56 % lorsque des zones tampons de largeurs variables étaient utilisées.

En résumé, l'agriculture ou la conservation de précision n'est pas une pratique de gestion bénéfique en soi, mais elle constitue un ensemble de données et de techniques qui permettent d'appliquer les PGB de manière plus précise afin d'en tirer le maximum de bénéfices. La conservation de précision augmente la performance de plusieurs PGB à l'égard de la qualité de l'eau, des sols, de l'air et de la biodiversité. Néanmoins, les coûts de cette technologie demeurent élevés.



## 4 SYNTHÈSE DES EFFETS DE COMBINAISON DE PGB ET SCHÉMA DÉCISIONNEL

### 4.1 Synthèse des effets sur le milieu des combinaisons de PGB

Les quatre tableaux suivants (22a à 22d) présentent, de façon très synthétique, les effets de combinaisons de PGB (entre catégories) sur les quatre enjeux environnementaux ciblés. Ils complètent les tableaux 3a à 3d (section 1.3, méthodologie) en précisant quelles sont les priorités concernées par des effets d'interaction positifs ou par des effets potentiellement négatifs.

Compte tenu de la complexité des interactions en jeu, tributaires rappelons-le des nombreux facteurs biophysiques et climatiques du milieu, et de la littérature somme toute limitée sur le sujet, cette synthèse est indicative et à bien des égards imprécise.

#### Effets sur la qualité des sols (structure, fertilité)

Parce qu'elles contribuent de façon durable à la bonne structure et à la fertilité des sols agricoles, tout en protégeant ceux-ci des risques d'érosion, les PGB judicieusement combinées du travail du sol, du couvert végétal et de la fertilisation (surtout avec les engrais de ferme) constituent les meilleurs atouts de l'agriculteur. Des aménagements particuliers du parcellaires permettent en outre de prévenir l'érosion éolienne ou hydrique et de diminuer le ruissellement vers les cours d'eau. La biodiversité du sol fertile et bien structuré favorise par ailleurs la résistance naturelle des cultures aux maladies.

#### Effets sur la qualité de l'eau

Indissociable de la qualité des sols et des interventions agricole en amont, la qualité de l'eau repose sur la réduction à la source des contaminants (N, P, pesticides) et sur la limitation de leur transport hors parcelle (lessivage, érosion mécanique, hydrique et éolienne). Là encore, les combinaisons de PGB (travail du sol, couvert végétal, fertilisation, protection des cultures, élevage et effluents) sont tout à fait indiquées. Les PGB d'aménagement du parcellaire forment par ailleurs un dispositif complémentaire de protection des cours d'eau indispensables.

L'augmentation éventuelle des pertes de phosphore (par ruissellement) ou de nitrates et de pesticides (par lessivage) dans certains cas (PGB du travail du sol et semis direct en particulier) doit être évaluée en fonction des gains environnementaux réalisés par ailleurs.

#### Effets sur la qualité de l'air (GES, Odeurs)

Parmi les trois principaux gaz à effet de serre (GES) émis par la production agricole, l'**oxyde nitreux** ( $N_2O$ ) est le plus puissant en terme de réchauffement de la planète (310 fois plus que le  $CO_2$ ). Il provient de la dénitrification, dans le sol, des nitrites ( $NO_2^-$ ) ou des nitrates ( $NO_3^-$ ) dont les microorganismes (dénitrificateurs) utilisent les molécules d'oxygène pour leur respiration quand l'oxygène atmosphérique fait défaut. Ces conditions anaérobies peuvent être provoquées par la consommation accrue d'oxygène par les microorganismes lors d'une fertilisation organique. C'est aussi le cas lorsque le sol est temporairement ou plus longuement compacté ou saturé d'eau. Plus un sol est bien structuré donc bien aéré et bien drainé, moins les risques d'émission d'oxyde nitreux (à la suite d'une fertilisation ou non) seront importants. Ces émissions globales sont également restreintes par une diminution à la source des apports d'azote (engrais azotés).

## Tableaux 22a à 22c : Synthèse des effets potentiels des interactions entre catégories de PGB



Légende :		Effets combinés (additifs, antagonistes ou synergiques) potentiellement favorables. (Gain pour le milieu)
		Effets combinés (antagonistes) potentiellement défavorables. (Risque pour le milieu)
	↑	Augmente, stimule, favorise.
	↓	Diminue, freine.
	X	Bloque, détruit.

Tableau 22a - Effets sur la qualité des sols

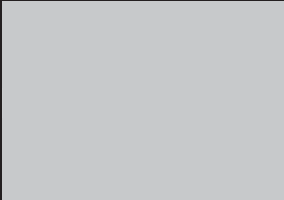
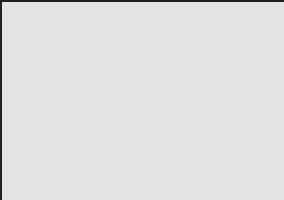
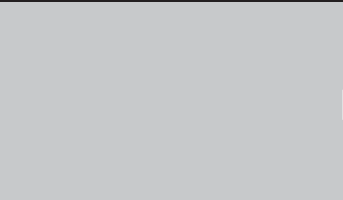

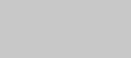


Catégories de PGB	Travail du sol	Couvert végétal	Fertilisation	Protection des cult.	Élevage et Effl.	Aménagement du parcellaire
TS		<ul style="list-style-type: none"> <li>- ↑ MO du sol</li> <li>- ↓ Érosion hydrique</li> <li>- ↓ Érosion éolienne</li> <li>- ↓ Érosion liée au travail du sol</li> <li>- ↑ Activité microbienne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ↑ MO du sol</li> <li>- ↓ Érosion hydrique</li> <li>- ↓ Érosion éolienne</li> <li>- ↓ Érosion liée au travail du sol</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>- ↓ Érosion hydrique et ↑ Infiltration de l'eau [<i>Avaloirs</i>]</li> <li>- ↓ Érosion éolienne [<i>Haies brise-vent</i>]</li> </ul>
CV			<ul style="list-style-type: none"> <li>- ↑ MO du sol et ↓ Lessivage</li> <li>[<i>Fumier × Prairies en rotation</i>] :</li> <li>- ↓ Érosion hydrique</li> <li>- ↓ Érosion éolienne</li> <li>- ↓ Érosion liée au travail du sol</li> </ul>			
F	[Incorporation fumier]et [Semis direct] sont incompatibles					
PC						
EE	[Incorporation fumier]et [Prairies ou Pâturages] sont incompatibles					
AP						

Tableau 22b - Effets sur la qualité de l'eau

Catégories de PGB	Travail du sol	Couvert végétal	Fertilisation	Protection des cultures	Élevage et effluents	Aménagement du parcellaire
TS		<ul style="list-style-type: none"> <li>- ↓ Pertes N</li> <li>- ↓ Pertes P</li> <li>- ↓ Pertes Pesticides</li> <li>- ↓ Pertes Pathogènes</li> <li>- ↓ MES</li> <li>- ↑ Conservation de l'eau</li> </ul>	<i>[Fumier × Semis direct] :</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ↓ Pertes N et ↓ Pertes P</li> <li>- ↓ Pertes Pesticides</li> <li>- ↓ Pertes Pathogènes</li> <li>- ↓ MES</li> <li>- ↑ Conservation de l'eau</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ↓ Pertes Pesticides</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- ↓ Pertes N</li> <li>- ↓ Pertes P</li> <li>- ↓ Pertes Pesticides</li> <li>- ↓ Pertes Pathogènes</li> <li>- ↓ MES</li> </ul>
CV	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ↑ Pertes N (nitrates)</li> <li>- ↑ Pertes P</li> <li>- ↑ Pertes Pesticides</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- ↓ Pertes N</li> <li>- ↓ Pertes P</li> <li>- ↓ Pertes Pesticides</li> <li>- ↓ Pertes Pathogènes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ↓ Pertes Pesticides</li> </ul>	<i>[Pâturages intensifs] :</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ↓ Pertes N</li> <li>- ↓ Pertes P</li> <li>- ↓ Pertes Pesticides</li> <li>- ↓ Pertes Pathogènes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ↓ Pertes N</li> <li>- ↓ Pertes P</li> <li>- ↓ Pertes Pesticides</li> <li>- ↓ Pertes Pathogènes</li> <li>- ↓ MES</li> </ul>
F	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ↑ Pertes N</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ↑ Pertes N</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>- ↓ Pertes Pesticides</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ↓ Pertes N</li> <li>- ↓ Pertes P</li> <li>- ↓ Pertes Pesticides</li> <li>- ↓ Pertes Pathogènes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ↓ Pertes N</li> <li>- ↓ Pertes P</li> <li>- ↓ Pertes Pesticides</li> <li>- ↓ Pertes Pathogènes</li> <li>- ↓ MES</li> </ul>
PC	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ↑ Pertes Pesticides</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ↑ Pertes Pesticides</li> </ul>				<ul style="list-style-type: none"> <li>- ↓ Pertes N et ↓ Pertes P</li> <li>- ↓ Pertes Pesticides</li> <li>- ↓ Pertes Pathogènes</li> <li>- ↓ MES</li> </ul>
EE	<i>[Pâturages intensifs] :</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ↑ Pertes N (nitrates)</li> <li>- ↑ Pertes P</li> <li>- ↑ Pertes Pesticides</li> </ul>	<i>[Pâturages intensifs] :</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ↑ Pertes N (nitrates)</li> <li>- ↑ Pertes Pesticides</li> </ul>				<i>[Pâturages intensifs] :</i> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ↓ Pertes N et ↓ Pertes P</li> <li>- ↓ Pertes Pesticides</li> <li>- ↓ Pertes Pathogènes</li> <li>- ↓ MES</li> </ul>
AP						

Tableau 22c - Effets sur la qualité de l'air

Catégories de PGB	Travail du sol	Couvert végétal	Fertilisation	Prot. cult.	Élevage et effluents	Amén. parc.
TS		- ↓ GES - ↓ Odeurs	- ↓ GES - ↓ Odeurs		- ↓ GES	
CV	- ↑ GES [ <i>Semis direct</i> ]		- ↓ GES - ↓ Odeurs			
F	- ↑ GES [ <i>Fumier</i> ]					
PC						
EE						
AP						

Tableau 22d - Effets sur la biodiversité

Catégories de PGB	Trav. du sol	Couvert végétal	Fert.	Protection des cultures	Élev.	Aménagement du parcellaire
TS		- ↑ Biodiversité		- ↑ Biodiversité		- ↑ Biodiversité
CV				- ↑ Biodiversité		- ↑ Biodiversité
F						- ↑ Biodiversité
PC						- ↑ Biodiversité
EE						- ↑ Biodiversité
AP						

Ainsi toutes les PGB qui contribuent à la structuration du sol (notamment par l'apport de matières organiques et la stimulation de l'activité biologique du sol) et à une gestion optimale de l'azote dans la rotation (fertilisation organique ou minérale raisonnée, valorisation optimale des engrais de ferme, cultures fixatrices d'azote) sont à prescrire.

Le **méthane** (CH<sub>4</sub>) (21 fois plus puissant que le CO<sub>2</sub>) provient essentiellement des animaux de ferme (fermentation entérique des ruminants) et de la décomposition anaérobie de leurs déjections. Les PGB permettant de contrôler des émissions agricole de CH<sub>4</sub> concernent principalement l'optimisation de l'alimentation et la valorisation du méthane.

Les émissions de **dioxyde de carbone** (CO<sub>2</sub>) d'origine agricole sont dues pour leur part à l'utilisation de combustibles fossiles ainsi qu'à la minéralisation de la matière organique (MO) du sol et des engrais organiques. Par la diminution du travail du sol (moins de passage de machinerie) et des apports de résidus qui compensent les pertes de MO (par oxydation normale lors de la mise en culture), les PGB du travail du sol sont particulièrement recommandées. Toutes les PGB contribuant à l'enrichissement du sol en MO (cultures sur résidus, engrais vert, fertilisation organique,...) ainsi qu'à la formation de biomasse (fertilisation optimale pour des rendements accrus, cultures intercalaires et dérobées,...) le sont aussi puisqu'elles permettent une séquestration (piégeage) du carbone dans le sol. À cet effet, le choix d'une bonne rotation (assurant un bilan humique positif) est donc primordial.

Pour ce qui est des odeurs, les PGB des élevages et des effluents<sup>20</sup> permettent de les diminuer à la source, alors que les PGB de la fertilisation (épandage approprié des engrais de ferme) et celle de l'aménagement du parcellaire (haies brise-vent) réduisent leur propagation. De toute évidence, ces deux modes de contrôle des odeurs gagnent à être combinés.

#### Effets sur la biodiversité

La qualité physique et chimique des sols et de l'eau favorise la biodiversité de ces milieux, dont elle est elle-même un facteur et un indicateur de santé. Ainsi toutes les combinaisons de PGB visant la qualité des sols et de l'eau contribueront à leur biodiversité. Les PGB d'aménagement du parcellaire (notamment les haies brise-vent ou les bandes riveraines boisées) offrent en outre un habitat précieux à bon nombre d'espèces.

Ces tableaux de synthèse peuvent orienter la réflexion, mais en aucun cas se substituer au jugement professionnel du conseiller et du producteur agricole. Ceux-ci sont en effet les mieux placés pour évaluer les gains et les risques associés à toute combinaison de PGB, en prenant en considération les spécificités des environnements technico-économique et biophysique de l'entreprise agricole. Toutefois, le choix d'une combinaison de PGB<sup>21</sup> et de mesures de mitigation éventuelles doit se situer dans la perspective plus large du territoire agricole (à l'échelle par exemple d'un bassin versant) et s'appuyer sur un schéma décisionnel plus global.

---

<sup>20</sup> Parmi ces PGB figurent notamment : la régie des effluents sous forme solide plutôt que sous forme liquide, l'amélioration de l'alimentation et le traitement *ad hoc* des déjections.

<sup>21</sup> Idéalement, une combinaison devrait inclure autant de catégories de PGB (et de PGB parmi ces catégories) qu'il est souhaitable. D'ailleurs, logiquement, l'activité agricole ne pourra vraiment être qualifiée de durable que lorsqu'elle reposera exclusivement sur des PGB.

## 4.2 Schéma décisionnel en vue de l'implantation de combinaisons de PGB

Tout comme les bonnes habitudes de vie (alimentation, exercice, suivi médical, ...) sont garantes de la santé de l'individu et par conséquent de celle de la communauté dans son ensemble, les PGB contribuent à une agriculture durable tant au niveau de l'exploitation que d'un territoire plus vaste.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, toutes les combinaisons de PGB techniquement possibles sont *a priori* bénéfiques, puisque plusieurs « bonnes habitudes » valent toujours mieux qu'une. Par contre, il est impossible d'établir de façon précise et constante les effets de ces combinaisons sur quelque indicateur donné de la qualité du milieu. En effet, l'impact de PGB sur le milieu dépend des très nombreux facteurs biophysiques et technico-économiques, propres au paysage, à l'exploitation agricole, voire à une parcelle donnée. De la même manière, un même traitement médical ou régime alimentaire ne serait pas approprié à tous les patients atteints d'une même maladie ou en bonne santé.

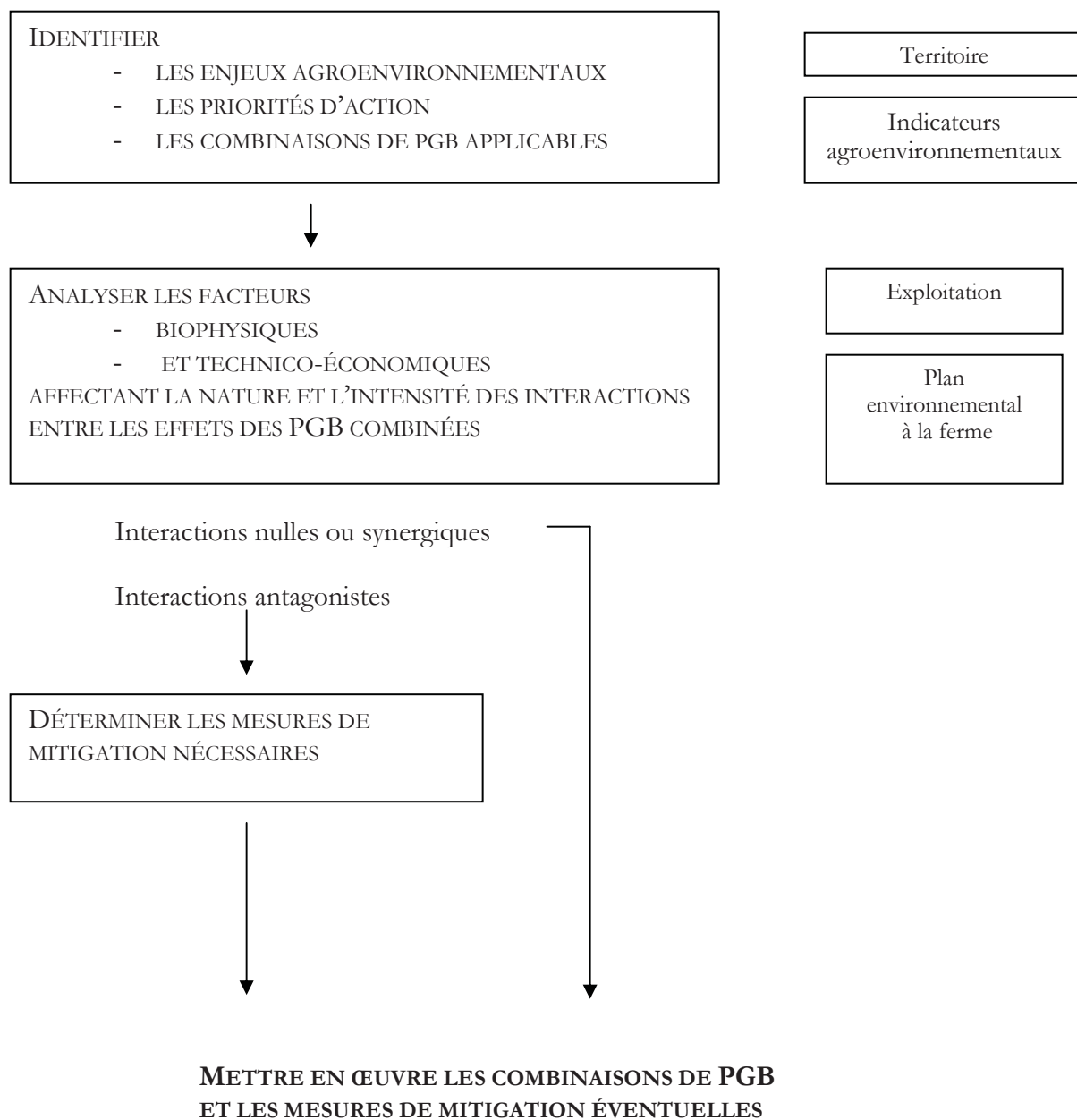
Dans un contexte opérationnel d'intervention agroenvironnementale, la prise en compte des effets combinés de PGB est pertinente et répond essentiellement aux trois objectifs suivants :

- Encourager l'adoption de combinaisons de PGB dont les effets sont additifs, voire préférentiellement synergiques;
- Proposer des mesures de mitigation pour les combinaisons de PGB dont les effets sont potentiellement antagonistes tout en ayant toutefois un effet combiné globalement positif sur le milieu;
- Décourager l'adoption de combinaisons de PGB dont les effets antagonistes auraient un impact global négatif.

En appui au processus décisionnel menant au choix des combinaisons optimales de PGB, nous proposons une démarche en trois étapes principales (figure 19) :

- Identifier à l'échelle du territoire visé les enjeux environnementaux, les priorités d'action, de même que les combinaisons de PGB favorables aux priorités d'action ciblées;
- Analyser les facteurs biophysiques et technico-économiques jouant un rôle déterminant sur la nature et l'intensité des interactions entre les effets des PGB;
- Déterminer les mesures de mitigations à prendre lors de la mise en œuvre des combinaisons de PGB, de façon à limiter l'impact d'effets antagonistes éventuels. Notons que ces mesures de mitigations permettent d'optimiser l'effet global des combinaisons de PGB dont les effets pourraient être antagonistes vis-à-vis d'un ou de plusieurs indicateurs.

Figure 19 - Schéma décisionnel



### Prioriser les enjeux environnementaux

Les priorités d'action relatives aux grands enjeux de l'agroécosystème durable (la qualité des sols, la qualité des eaux de surface et souterraines, la qualité de l'air et la biodiversité) et ciblées pour le territoire d'intérêt constituent les premières balises dans l'analyse de la faisabilité environnementale des combinaisons de PGB. Bien que la présente revue de littérature mette en relief que les effets combinés des PGB peuvent être considérés, *a priori*, comme positifs à l'égard d'un ou plusieurs enjeux environnementaux, elle souligne aussi que *ces effets sont variables selon l'enjeu environnemental concerné*. Ce constat s'applique particulièrement aux enjeux de qualité de l'eau et met par exemple en opposition l'enjeu de conservation de l'eau de surface avec celui de la protection de la nappe d'eau souterraine, de même que les enjeux liés à la mobilité de l'azote avec ceux de la mobilité du phosphore. Ainsi, une combinaison de PGB pourrait contribuer à prévenir l'eutrophisation des plans d'eau, mais risquer de favoriser la migration des nitrates vers la nappe souterraine. Le tableau 22b met en relief les combinaisons de PGB susceptibles de présenter un risque d'interaction négative à l'égard d'un ou de plusieurs enjeux prioritaires de la qualité de l'eau en milieu agricole. La migration vers les cours d'eau du phosphore, le lessivage des nitrates vers l'aquifère et le transport de pesticides dans l'eau de surface constituent les trois enjeux les plus susceptibles d'influencer la faisabilité environnementale des combinaisons de PGB.

Les enjeux de biodiversité ou de qualité des sols sont d'emblée exclus de cette problématique d'effets « à géométrie variable » de combinaisons de PGB. En effet, on ne retrouve pas de cas dans la littérature où la mise en œuvre de combinaisons de PGB ciblées dans la présente étude auraient des effets systématiquement négatifs sur la qualité du sol et la biodiversité du milieu. En ce qui a trait à la qualité de l'air, la seule interaction qui pose un réel dilemme est le couplage de la culture sans labour avec l'application d'engrais de ferme (tableau 22c). Dans l'axe de la problématique des gaz à effet de serre (GES), le principal facteur déterminant serait cependant d'ordre climatique. Dans l'est du pays principalement, l'humidité accrue du sol résultant d'une couverture de résidus de culture plus abondante risque d'accentuer le processus de dénitrification de l'azote. Aussi, la question demeure entière, à savoir dans quelle mesure l'accroissement de la dénitrification surpasse l'effet de la séquestration du carbone associée à la culture sans labour dans le bilan global des émissions de GES. Dans l'ouest du pays, la séquestration du carbone associée aux façons culturales réduites demeurerait avantageuse au plan de la réduction de l'émission de GES, compte tenu des processus de dénitrification relativement moins actifs en raison d'un climat plus sec.

L'identification d'effets négatifs potentiels de combinaisons de PGB relève donc, en amont du processus décisionnel, d'une priorisation des enjeux de qualité de l'eau à l'échelle du territoire, logiquement celle du bassin versant. On ne saurait par exemple exclure la combinaison de pratiques culturales anti-érosives dans un cadre d'intervention ciblée sur l'eutrophisation du milieu aquatique, sous prétexte d'un risque marginal de mobilisation de nitrates vers l'aquifère. Ces priorités agroenvironnementales sont généralement bien établies dans les différentes régions canadiennes et reposent sur la mise en relation d'indicateurs de la pression exercée par les systèmes de production agricole avec les critères de qualité du milieu aquatique ou terrestre, actuellement ou éventuellement précisés par des normes. Les indicateurs agroenvironnementaux développés (ou en phase de développement) à l'échelle canadienne relatifs aux intrants d'éléments nutritifs et de pesticides, à la qualité du sol, à la qualité de l'eau, à l'émission de GES et à la biodiversité (MacRae *et al.*, 2000), constituent un outil de première ligne dans l'identification des priorités d'action environnementale en milieu rural. De la même façon, les rapports de la qualité des écosystèmes aquatiques mis à jour par les équipes gouvernementales



fédérale et provinciales constituent des bases de référence privilégiées et complémentaires aux indicateurs de pression agroenvironnementale, dans la priorisation des enjeux de qualité de l'eau en bassins versants ruraux.

### **Analyser les facteurs de risques biophysiques et technico-économiques**

Un autre constat émergeant de la présente revue de littérature scientifique est que l'effet global des PGB sur un **enjeu environnemental donné** demeure largement influencé par différents facteurs liés aux propriétés biophysiques du paysage et aux particularités des systèmes de production agricole. Un facteur biophysique important à considérer, par exemple, est le taux de richesse du sol en nutriments, qui aura un effet déterminant sur l'efficacité des pratiques culturales anti-érosives à réduire l'exportation de phosphore vers les cours d'eau. De la même façon, les propriétés physiques du sol auront un effet déterminant sur l'importance du transport préférentiel de nitrates, de microbes pathogènes et de pesticides vers les drains souterrains, puis le réseau hydrographique. Compte tenu de l'échelle relativement fine de la variabilité spatiale des propriétés des sols ou des pratiques agricoles, il convient d'analyser la faisabilité des combinaisons de PGB pour un enjeu environnemental donné à l'échelle de l'exploitation agricole. Les plans d'accompagnement agroenvironnementaux (PAA) mis en œuvre sur les fermes canadiennes s'inscrivent dans cette approche diagnostique qui prend en compte les particularités de l'environnement biophysique et du système de production de l'entreprise agricole (MAPAQ et AAC, 2005).

Le tableau 23 propose dix facteurs de risque à prendre en considération dans l'analyse des effets d'une combinaison de pratiques de gestion bénéfiques sur la qualité de l'eau. L'ensemble constitue une grille d'évaluation des risques potentiels associés aux combinaisons de groupes de PGB à l'égard des enjeux de la qualité de l'eau identifiées dans le tableaux 22b. Les facteurs proposés appartiennent à deux catégories d'information. Les facteurs liés aux propriétés hydro-pédologiques du paysage représentent en quelque sorte les **facteurs naturels de vulnérabilité du territoire** à la mobilité diffuse de l'azote, du phosphore et des pesticides. Leur distribution spatiale dépend en large partie des gradients géomorphologiques et pédogénétiques. À l'opposé, les **facteurs liés aux systèmes de production** sont relativement indépendants des gradients biophysiques. Essentiellement de nature anthropique, ils requièrent une appréciation spécifique à l'échelle de l'entreprise agricole. Le bilan d'apport en phosphore ou la richesse des sols en ce même élément, par exemple, reflètent essentiellement les pratiques de fertilisation historiques de l'exploitation agricole et demandent une représentation à l'échelle de la parcelle ou de la ferme. Dans une perspective plus large, les gradients observés dans les vocations agricoles du territoire sont influencés par les contraintes et les potentialités du paysage. Les secteurs intensifs de productions légumières et de pommes de terre, par exemple, sont associées d'emblée aux sols organiques et aux sols sableux profonds. La mobilité souterraine de contaminants y est une préoccupation environnementale plus qu'ailleurs, en raison de la nature peu filtrante des sols et les apports importants d'intrants phytosanitaires et de fertilisants minéraux. À l'inverse, des densités d'élevage élevées en paysages érosifs ou de faible perméabilité exigent des mesures de protection des eaux de surface.

Dans l'axe décisionnel de la détection de combinaisons à risque de PGB, il importe ainsi de conserver une perspective globale sur l'ensemble des facteurs de risques anthropiques et naturels à l'égard des priorités d'action environnementales définies pour le territoire donné. La liste de facteurs proposés au tableau 23 s'inspirent de l'état des connaissances actuelles à l'égard des facteurs déterminants des interactions de PGB. D'autres facteurs pourront éventuellement s'ajouter, sur la base de connaissances plus approfondies à l'égard des mécanismes complexes d'interaction entre les activités agricoles et la qualité de leur environnement biophysique. En

amont des facteurs individuels pris en considération, retenons d'abord le principe d'une approche agro-écosystémique, qui repose sur l'examen du milieu biophysique, des particularités des systèmes de production agricole et des enjeux environnementaux propres au territoire.

### **Considérer les mesures de mitigation dans la mise en œuvre des PGB)**

Suivant l'identification de conditions biophysiques ou technico-économiques à risque à l'égard d'un enjeu environnemental pertinent, il convient d'identifier les modalités de mise en œuvre des PGB qui permettent de se soustraire aux risques d'effets négatifs. Dans le cas où les mesures de mitigation ne permettent pas de se soustraire au risque d'effet négatif de la combinaison, on ne conservera qu'une seule PGB; celle qui présente le plus de potentiel à l'égard des enjeux environnementaux priorités. Le tableau 24 identifie quelques mesures de mitigation susceptibles d'atténuer les effets d'interaction indésirables, en raison des facteurs identifiés au tableau 23, ou tout simplement de rendre la combinaison de PGB retenue encore plus efficace d'un point de vue environnemental.

**Forte érosivité du relief.** Des pentes longues ou fortement inclinées favorisent la capacité de transport du ruissellement de surface et des taux d'érosion élevés. Les pratiques culturales anti-érosives sont ainsi à encourager. Le recours aux cultures de couverture pérennes sont aussi avantageuses au plan de la qualité des sols, mais requièrent un mode de destruction chimique en l'absence de labour à la charrue à corps. La forte vulnérabilité du parcellaire au ruissellement de surface et à l'érosion contribue alors à un risque accru d'exportation de pesticides. En combinaison avec les techniques de culture sur résidus, de même qu'en lutte intégrée des cultures, il y aurait ainsi avantage à recourir aux cultures de couverture annuelles, tel que les crucifères.

**Faible perméabilité du sol.** La faisabilité technico-économique de la culture sur résidus tend à diminuer sur les sols à texture lourde ou présentant un drainage déficient. Le recours à une culture de couverture, susceptible d'augmenter la masse de résidus présents à la surface du sol, ne facilitera pas, *a priori*, le ressuyage du sol au printemps. Il convient dès lors de favoriser le recours aux cultures de couverture suivant des cultures principales comportant peu de résidus de culture, comme le soya et le maïs-ensilage. Aussi, il convient de sélectionner des variétés hâtives, peu exigeantes en unités thermiques de façon à optimiser la faisabilité de la PGB. En ce qui a trait à la lutte intégrée en présence d'une abondante couche de résidus, le sarclage mécanique des mauvaises herbes ne sera possible qu'au prix d'un hachage énergétique des résidus de culture. Celui-ci sera réalisé de préférence au printemps, de façon à ne pas nuire au réchauffement printanier du sol, par nature relativement tardif en raison de faible perméabilité.

**Texture et matériel parental du sol propice à l'écoulement préférentiel.** Le semis direct demeure la pratique culturale anti-érosive la plus efficace. Elle présente toutefois un risque d'accentuer la mobilité du phosphore, des nitrates et des pesticides par les voies de l'écoulement préférentiel, via les macropores du sol, puis vers les drains souterrains. Les sols argileux, sensibles au développement de fentes de retrait, seraient plus vulnérables à ce phénomène, encore peu documenté au Canada. Le travail secondaire et ponctuel du sol offre la possibilité de perturber la continuité des macro-pores dans le profil cultural. Le recours aux légumineuses à titre de culture de couverture risque par ailleurs d'augmenter considérablement le bilan d'apport en azote en raison de la fixation symbiotique, puis le lessivage vers l'aquifère. La culture de couverture annuelle est alors préférable si la migration des nitrates constitue une priorité d'action environnementale.

**Hauteur de nappe élevée.**

Le drainage déficient en raison de la remontée de la nappe est associé aux mêmes limitations qu'en conditions de faible perméabilité du sol. Le conditionnement des résidus, le choix des variétés de culture principales et le recours à des cultures de couverture annuelles sont de nature à réduire les risques d'interactions négatives entre la culture sur résidus, la couverture de résidus et la lutte intégrée aux ennemis des cultures.

**Drainage souterrain.** De façon générale, le drainage souterrain est souhaitable à tous les égards. L'égouttement vient en tête de liste des facteurs limitants de la productivité des cultures dans l'Est du pays, alors que les zones de champs mal égouttées contribuent à la plus large part de la contamination diffuse des eaux de surface en bassins versants agricoles. Dans les territoires où la prévention de la mobilisation de l'azote et des pesticides vers l'aquifère ou le réseau hydrographique (via les drains) est un enjeu important, le drainage souterrain contrôlé permet de réduire la mobilité souterraine de ces éléments. Le choix de cultures de couverture, autres que légumineuses, et annuelles favorise par ailleurs la combinaison des PGB de protection des cultures (lutte intégrée), de culture sur résidus et de culture de couverture.

**Forte densité d'élevage** L'apport répété et à taux d'épandage élevé d'engrais de ferme contribuent à la stratification de l'enrichissement du sol en l'absence de travail du sol. Bien que la couverture de résidus contribue de façon fort efficace à la prévention de l'érosion, le ruissellement de surface s'enrichit considérablement au contact de la mince couche de sol fraîchement amendée qui interagit avec la lame d'eau à la surface du sol. Les résidus de culture accumulés près de la surface du sol contribuent aussi à l'enrichissement en phosphore biodisponible du ruissellement de surface. L'incorporation hâtive des engrais de ferme et des épandages en post-levée des cultures minimisent les risques de prise en charge des éléments nutritifs solubles par le ruissellement de surface.

**Bilan d'apport élevé.** Les mêmes facteurs de risques et mesures de mitigations associés aux fortes densité d'élevage s'appliquent aussi aux parcelles présentant un apport ponctuel élevé d'engrais de ferme. Notons qu'un sol présentant une richesse relativement basse en phosphore, peut contribuer de façon significative aux exportations diffuses de P, si la régie d'épandage expose l'amendement aux risques de ruissellement de surface. Encore ici, l'incorporation hâtive est de mise.

**Richesse des sols élevée.** L'efficacité d'une combinaison de PGB ciblées sur le contrôle de la mobilité du phosphore peut être compromise dans les cas où la régie historique des épandages d'engrais de ferme a conduit à un enrichissement excessif de la couche arable. Bien que les phénomènes naturels de rétroversion du phosphore dans la couche arable réduisent progressivement sa biodisponibilité, l'approfondissement du profil cultural au moyen de façons culturales profondes et ponctuelles est un moyen éprouvé d'abaisser rapidement la réactivité du P contenu dans la mince couche en surface du sol qui interagit avec le ruissellement de surface.

**Rotation des cultures.** De façon générale, la rotation longue comportant plusieurs saisons de graminées et de légumineuses fourragères demeure la meilleure « police d'assurance-qualité » des sols et de prévention de la contamination diffuse des eaux de surface. Aux propriétés anti-érosives des prairies s'ajoutent le conditionnement du profil cultural par les fourrages, des fenêtres d'épandage estivales et une rotation propice au contrôle des ennemis des cultures. Force est de constater cependant que les superficies en cultures fourragères pérennes sont en nette régression dans l'Est du pays, notamment au Québec, en réponse à divers incitatifs d'ordre socio-économiques. Dans une perspective agroenvironnementale, cette tendance

devrait motiver d'autant la progression des PGB dans les rotations courtes de cultures annuelles. En matière d'interaction de PGB, trois mesures de mitigation sont à considérer à l'égard de la mobilité des pesticides, soit le hachage des résidus de culture non labourés de façon à permettre le sarclage mécanique (IS x PC), le recours à des cultures de couverture annuelles de façon à limiter le recours au désherbage chimique et enfin la diversification et la succession rapides des cultures annuelles dans la rotation afin de briser le cycle des ennemis des cultures.

**Exigences phytosanitaires.** Certaines cultures, dont les productions légumières, la pomme de terre et certaines céréales, sont vulnérables à la présence de résidus de culture, qui constituent dans certains cas un vecteur de propagation de maladies et de ravageurs. En pratique de culture sans labour, il convient alors de privilégier une rotation courte qui tient compte des effets résiduels phytosanitaires associés aux résidus de culture. La sélection d'une culture de couverture annuelle aura aussi le mérite de concilier les principes de la lutte intégrée avec la culture sur résidus.

**Tableau 23 - Facteurs de risques à considérer dans l'analyse des effets d'une combinaison de PGB sur la qualité de l'eau**

Facteurs de risque	Paramètres de qualité de l'eau ( $P_{ES}$ , $N_S$ et $Pest_{ES}$ ) potentiellement affectés, selon différentes combinaisons de PGB							
	TS x CV			TS x F		TS x PC	CV x F	CV x PC
	$P_{ES}$	$N_S$	$Pest_{ES}$	$P_{ES}$	$N_S$	$Pest_{ES}$	$N_S$	$Pest_{ES}$
<b>Propriétés hydro-pédologiques du paysage</b>								
Forte érosivité du relief (pentes)	+	0	-	+	0	-	0	+
Faible perméabilité du sol	-	+	-	+	+	-	+	+
Texture et roche mère propice à l'écoulement préférentiel	-	-	-	-	-	-	-	-
Hauteur de la nappe élevée	-	+	-	+	+	-	+	+
Présence de drainage souterrain	+	-	-	+	-	-	-	-
<b>Particularités du système de production</b>								
Forte densité d'élevage	-	+	0	-	+	0	+	0
Bilan d'apport élevé en nutriments	-	+	0	-	+	0	+	0
Richesse des sols élevée	-	+	0	-	+	0	+	0
Dominance de cultures annuelles	+	+	-	+	+	-	+	-
Exigences phytosanitaires	0	0	-	0	0	-	0	-

**Légende:**

$P_{ES}$ ,  $N_S$  et  $Pest_{ES}$   
+, - ou 0

Teneurs en phosphore (P), azote (N) ou pesticides (Pest.) dans les eaux de surface (ES) ou souterraines (S).  
Effet potentiellement positif (+), négatif (-) ou nul du facteur de risque sur la combinaison de PGB.

**Tableau 24 – Mesures de mitigation à envisager dans la prévention des effets négatifs d'une combinaison de PGB à l'égard de la qualité de l'eau**

Facteurs de risque	Paramètres de qualité de l'eau (P <sub>ES</sub> , N <sub>S</sub> et Pest <sub>ES</sub> ) potentiellement affectés, selon différentes combinaisons de PGB							
	TS x CV			TS x F		TS x PC	CV x F	CV x PC
	P <sub>ES</sub>	N <sub>S</sub>	Pest <sub>ES</sub>	P <sub>ES</sub>	N <sub>S</sub>	Pest <sub>ES</sub>	N <sub>S</sub>	Pest <sub>ES</sub>
<b>Propriétés hydro-pédologiques du paysage</b>								
Forte érosivité du relief (pentes)	+	0	CC annuelles	+	0	Hachage	0	+
Faible perméabilité du sol	Applic.CC	+	CC annuelles	+	+	Hachage	+	+
Texture et roche mère propice à l'écoulement préférentiel	TS macro.	CV non-légum.	CC annuelles	TS macro.	TS macro.	TS macro.	CC non-légum.	TS macro.
Hauteur de la nappe élevée	Applic.CC	+	CC annuelles	+	+	Hachage	+	+
Présence de drainage souterrain	+	Contrôle de nappe	Contrôle de nappe	+	Contrôle de nappe	Contrôle de nappe	Contrôle de nappe	Contrôle de nappe
<b>Particularités du système de production</b>								
Forte densité d'élevage	Incorporation	+	0	Incorporation	+	0	+	0
Bilan d'apport élevé en nutriments	Incorporation	+	0	Incorporation	+	0	+	0
Richesse des sols élevée	TS strat.	+	0	TS strat.	+	0	+	0
Dominance de cultures annuelles	+	+	Hachage	+	+	Rotation courte	+	CV annuelles
Exigences phytosanitaires	0	0	CC annuelles	0	0	Rotation courte	0	CV annuelles

**Légende et description**

P <sub>ES</sub> , N <sub>S</sub> et Pest <sub>ES</sub>	Teneurs en phosphore (P), azote (N) ou pesticides (Pest.) dans les eaux de surface (ES) ou souterraines (S).
Applicabilité des CC	Favoriser le recours aux cultures de couverture (CC) sur le retour de cultures comportant peu de résidus (soya et maïs-ensilage par exemple). La surabondance de résidus de culture retarde le ressuyage du sol. Le choix de cultivars hâtifs, moins exigeants en unités thermiques, favorisera aussi la faisabilité des combinaisons de PGB.
CC annuelles	Favoriser le recours à des cultures de couverture annuelles qui ne requièrent pas de destruction au moyen d'herbicides.
CC non-légumineuses	Favoriser le recours à des cultures de couverture autres que des légumineuses de façon à ne pas accroître la charge d'azote résiduelle provenant de la fixation symbiotique.
TS macropores	Réaliser un travail secondaire et occasionnel du sol, sans inversion de la couche arable afin de briser la connectivité des macropores, tout en maintenant une couverture de résidus.
Incorporation	Favoriser l'incorporation hâtive des engrais de ferme au moyen du sarclage en post-levée dans les cultures en rangées (maïs) de façon à soustraire les engrais à l'action du ruissellement de surface suivant l'épandage. Pour les applications sur prairie recourir aux pendillards.
TS stratification	Réaliser ponctuellement un travail primaire des sols excessivement riches en P, comportant l'inversion de la couche arable. Au besoin, considérer l'approfondissement du profil cultural au moyen d'un labour profond associé à l'incorporation d'amendements organiques.
Contrôle de nappe	Considérer le drainage contrôlé pour les sols filtrants et sensibles à l'écoulement préférentiel. Le maintien d'une nappe plus élevée prévient en partie le lessivage des nutriments et pesticides solubles vers l'aquifère et les cours d'eau via les drains.
Hachage	Hacher les résidus de culture afin de faciliter le recours au désherbage mécanique.
Rotation courte	Privilégier la rotation courte en tenant compte des effets phytosanitaires résiduels associés aux résidus de culture.

## CONCLUSION

Cette revue de littérature fournit des références et des pistes de réflexion précieuses pour la poursuite de l'implantation des PGB dans nos systèmes de production agricole. Elle propose également une réflexion sur les effets combinés des PGB ainsi qu'un schéma décisionnel à suivre lors du choix et de la mise en œuvre de combinaisons de PGB. Il en ressort principalement les considérations et recommandations suivantes :

- L'étude des interactions entre les effets -sur le milieu- de différentes PGB appliquées conjointement n'est pas facile. En effet, les impacts propres à chaque PGB, comme les interactions entre ceux-ci, sont de nature souvent complexe. De plus, ces impacts ne se manifestent parfois qu'à long terme et sont influencés par de nombreux facteurs climatiques, biophysiques et propres au système de production. Rares sont d'ailleurs les études scientifiques qui portent spécifiquement sur des mesures de synergie ou d'antagonisme entre différentes PGB. Rares sont aussi celles qui adoptent une approche systémique; souvent les résultats de recherche sont présentés de façon fractionnée. Il apparaît nettement cependant que les combinaisons de PGB améliorent la performance environnementale générale des systèmes de production.
- De nombreux facteurs pédologiques et bioclimatiques interagissent entre eux ainsi que *sur les modalités (souvent interdépendantes) de mise en œuvre des PGB et de leurs impacts*. L'évaluation des combinaisons de PGB devrait donc toujours se faire dans une **perspective globale**, qui intègre la complexité de l'agroécosystème. En matière de préservation du milieu aquatique notamment, une pratique de gestion est bénéfique dans la mesure où elle favorise la réduction des contaminants à la source et où elle freine, voir empêche, leur transport vers les cours d'eau. Et dans ce but, plusieurs PGB vaudront toujours mieux qu'une. Ainsi, rappelons qu'il serait absurde de recommander une combinaison de PGB, aussi « bonne » soit-elle (semis direct associé à une judicieuse rotation des cultures, par exemple), si par ailleurs la fertilisation minérale ou organique n'est pas optimisée et si le champ s'érode le long du cours d'eau!
- Dans un contexte donné, la « meilleure combinaison » de PGB sera celle qui, *globalement, à long terme* et en fonction des diverses contraintes existantes, contribuera de façon optimale à la production durable de l'entreprise comme au développement durable de la région. Concrètement et pour l'essentiel, cela revient à veiller à la **qualité du sol agricole** (bonne structure et bon niveau de fertilité) et à **sa juste utilisation** selon son potentiel et sa localisation dans le paysage.
- Du point de vue pratique, le **jugement professionnel** constitue l'élément clé du succès de la mise en œuvre d'une ou de plusieurs PGB. Le producteur, ou son conseiller, doit avant tout poser un *bon diagnostic*, par rapport notamment à la fertilité générale du sol. De plus, il doit décider d'une PGB (ou mieux : d'une combinaison de PGB) en fonction d'un juste *pronostic* des interactions potentielles entre tous les éléments du système. Ceux-ci incluent les facteurs pédologiques et bioclimatiques, la culture à établir, les PGB envisagées et éventuellement les normes agroenvironnementales à respecter. En agroenvironnement, comme dans tout autre domaine complexe, l'expertise de professionnels bien informés est incontournable.

- En suivant le processus décisionnel proposé dans cette étude, le choix d'une combinaison de PGB tient compte non seulement des facteurs biophysiques et technico-économiques qui prévalent à l'échelle de l'exploitation, mais aussi des enjeux agroenvironnementaux et des priorités d'action établies (ou présentes) à l'échelle du territoire.

Enfin, comme les effets de l'application combinée de PGB méritent d'être plus documentés, pas seulement à l'échelle de la ferme mais aussi à l'échelle du **bassin versant**, il serait très pertinent de mettre à profit les données historiques de qualité de l'eau pour certains bassins versants agricoles bien documentés au plan agronomique et physiographique. Cela permettrait d'évaluer l'impact de différents scénarios de PGB au moyen de la modélisation hydrologique. Compte tenu des effets d'interactions potentiellement négatifs mis en relief dans la présente revue de littérature, les thématiques à privilégier seraient alors la mobilité des sédiments, de l'azote et du phosphore.



## RÉFÉRENCES

Abdin, O.A., X.M. Zhou, D. Cloutier, D.C. Coulman, M.A. Faris et D.L. Smith. 2000. Cover crop and interrow tillage for weed control in short season maize (*Zea mays*). *European Journal of Agronomy* 12: 93-102.

Administration du rétablissement agricole des Prairies, Agriculture et agroalimentaire Canada (AAC). Consulté en ligne: [http://www.agr.gc.ca/pfra/biodiversity/grazing\\_f.htm](http://www.agr.gc.ca/pfra/biodiversity/grazing_f.htm)  
<http://www.agr.gc.ca/pfra/land/shorelds.htm>

Agriculture and Agri-Food Canada. January 31, 2005. National Farm Stewardship Program – Beneficial Management Practice (Descriptions).

Agriculture et Agroalimentaire Canada. 2001. Rapport du Centre de recherches de Lethbridge : Les résidus de culture pourraient être un élément décisif dans la lutte contre les mauvaises herbes. Consulté en ligne: [http://res2.agr.ca/lethbridge/rep2001/rep0124\\_f.htm](http://res2.agr.ca/lethbridge/rep2001/rep0124_f.htm)

Alberta Agriculture, Food and Rural Development. 2000. Greenhouse Gas Emissions and Alberta's Cropping Industry - Things You Need to Know. Consulté en ligne: [http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/cl3010](http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/cl3010)

Al Hamdi, B., Inderjit, M. Olofsdotter et J.C. Streibig. 2001. Laboratory bioassay for phytotoxicity: an example from wheat straw. *Agronomy Journal* 93: 43-48.

Altieri, M.A. 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystem. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 74: 19-31.

Altieri, M.A. et C.I. Nicholls. 2003. Soil fertility management and insect pest : harmonizing soil and plant health in agroecosystem. *Soil & Tillage Research* 72: 203-211.

Anderson, D.L. et E.G. Flaig. 1995. Agricultural best management practices and surface water improvement and management. *Water Science and Technology* 31(8): 109-121.

Anderson, R.L.. 2005. A multi-tactic approach to manage weed population dynamics in crop rotations. *Agronomy Journal* 97: 1579-1583.

Anderson, R.L.. 2005. Are some synergistic to following crops ? *Agronomy Journal* 97: 7-10.

Atwill, E.R., L. Hou, B.M. Karle, T. Harter, K.W. Tate et R.A. Dahlgren. 2002. Transport of *Cryptosporidium parvum* oocysts through vegetated buffer strips and estimated filtration efficiency. *Applied and Environmental Microbiology* 68(11): 5517-5527.

Ball-Coelho, B.R., R.C. Roy et A.J. Bruin. 2004. Nitrate leaching as affected by liquid swine manure and cover cropping in sandy soil of Southwestern Ontario. *Canadian Journal of Soil Science* 84(2): 187-197.

Ball-Coelho, B.R., R.C. Roy et C.J. Swanton. 2000. Tillage and cover crop impacts on aggregation of a sandy soil. *Canadian Journal of Soil Science* 80: 363-366.

Bailey, K.L. et B.D. Gossen. 2005. Boundary areas and plant diseases. *In* Field boundary habitats: implications for weed, insect and disease management. Topics in Canadian weed science, volume 1 (A.G. Thomas, Ed.). Saint-Anne-de-Bellevue, Québec: Canadian Weed Science Society – Société canadienne de malherbologie. p. 165-169.

Beaudoin, N., J.K. Saad, C. Van Laethem, J.M. Machet, J. Maucorps et B. Mary. 2005. Nitrate leaching in intensive agriculture in northern France : effect of farming practices, soils and crop rotations. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 111: 292-310.

Beaulieu, R. 2001. Historique des travaux de drainage au Québec et état du réseau hydrographique. Présentation faite au Colloque régional sur les cours d'eau, le 9 décembre 1999, révisé le 25 mai 2001. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, direction régionale de la Montérégie-Ouest, bureau de Sainte-Martine. 12 p.

Bechmann, M.E., P.J.A. Kleinman, A.N. Sharpley et L.S. Saporito. 2005. Freeze-thaw effects on phosphorus loss in runoff from manured and catch-cropped soils. *Journal of Environmental Quality* 34: 2301-2309.

Bellinder, R.R., H.R. Dillard et D.A. Shah. 2004. Weed seedbank community responses to crop rotation schemes. *Crop Protection* 23: 95-101.

Belt, G.H., J. O'Laughlin et T. Merrill. 1992. Design of forest riparian buffer strips for the protection of water quality: analysis of scientific literature. University of Idaho. Idaho Forest Wildlife and Range Experiment Station.

Berg, W., R. Brunsch et I. Pazsicsky. 2006. Greenhouse gas emissions from covered slurry compared with uncovered during storage. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 112: 129-134.

Berry, J.R., J.A. Delgado, R. Khosla, F.J. Pierce. 2003. Precision conservation for environmental sustainability. *Journal of Soil and Water Conservation* 58(6): 332-339.

Bishop, P.L. W.D. Hively, J.R. Stedinger, M.R. Rafferty, J.L. Lojpersberger et J.A. Bloomfield. 2005. Multivariate analysis of paired watershed data to evaluate agricultural best management practice effects on stream water phosphorus. *Journal of Environmental Quality* 34: 1087-1101.

Besson, J.M., R. Schmitt, V. Lehmann et M. Soder. 1986. Differences in germination behaviour of weed seeds following treatment with slurry which had been stored, aerated or fermented for methane production (en allemand). *Mitteilungen für die Schweizerische Landwirtschaft* 35: 73-83. (de CAB Abstract)

Bissonnette, N., D.A. Angers, R.R. Simard et J. Lafond. 2001. Interactive effects of management practices on water-stable aggregation and organic matter of a Humic Gleysol. *Canadian Journal of Soil Science* 81: 545-551

Bjorneberg, D.L., D.L. Karlen, R.S. Kanwar et C.A. Cambardella. 1998. Alternative azote fertilizer management strategies effects on subsurface drain effluent and azote uptake. *Applied Engineering in Agriculture* 14(5): 469-473.

Blackshaw, R.E., H.J. Beckie, L.J. Molnar, T. Entz et J.R. Moyer. 2005. Combining agronomic practices and herbicides improves weed management in wheat-canola rotations within zero-tillage production systems. *Weed Science* 53: 528-535.

Bolinder, M.A., D.A. Angers, E.G. Gregorich et M.R. Carter. 1999. The response of soil quality indicators to conservation management. *Canadian Journal of Soil Science* 79(1): 37-45.

Bourne, J. 1997. Direct seeding – controlling wildlife damage in direct seeding systems. Agdex 519-16, Alberta agriculture, food and rural development. Consulté en ligne : [http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/agdex3475?opendocument](http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/agdex3475?opendocument)

Brandle, J.R., L. Hodges et X.H. Zhou. 2004. Windbreaks in North American agriculture systems. *Agroforestry Systems* 61: 65-78.

Bugg, R.L. 1991. Cover crops and control of arthropod pests in agriculture. *In* W.L. Hargrove (ed.) *Cover crops for clean water*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa. p. 157-163.

Byers, H.L., M.L. Cabrera, M.K. Matthews, D.H. Franklin, J.G. Andrae, D.E. Radcliffe, M.A. McCann, H.A. Kuykendall, C.S. Hoveland et V.H. Calvert II. 2005. Phosphorus, sediment, and *Escherichia coli* loads in unfenced streams of the Georgia Piedmont, USA. *Journal of Environmental Quality* 34: 2293-2300.

Carter, M.R. 2005. Long-term tillage effects on cool-season soybean in rotation with barley, soil properties and carbon and nitrogen storage for fine sandy loams in the humid climate of Atlantic Canada. *Soil & Tillage Research* 81: 109-120.

Casey, R.E. et S.J. Klaine. 2001. Nutrient attenuation by a riparian wetland during natural and artificial runoff events. *Journal of Environmental Quality* 30: 1720-1731.

Catt, J.A., K.R. Howse, D.G. Christian, P.W. Lane, G.L. Harris et M.J. Goss. 2000. Assessment of tillage strategies to decrease nitrate leaching in the Brimstone farm experiment, Oxfordshire, UK. *Soil and Tillage Research* 53(3-4): 185-200.

CCSE (Centre de conservation des sols et de l'eau de l'Est du Canada). Date inconnue. Les bandes riveraines et la qualité de l'eau : une revue de littérature. Consulté en ligne: <http://www.ccse-swcc.nb.ca/index2.cfm?title=4&lg=fr>

CCSE (Centre de conservation des sols et de l'eau de l'Est du Canada). Date inconnue. La rotation des cultures: l'avenir de l'industrie de la pomme de terre au Canada atlantique. Consulté en ligne: <http://www.ccse-swcc.nb.ca/publications/francais/rotation.pdf>

Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). 2000. Guide des pratiques de conservation en grandes cultures. Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ). 520 p.

Cermak, J.D., J.E. Gilley, B. Eghball et B.J. Wienhold. 2004. Leaching and sorption of nitrogen and phosphorus by crop residue. *Transactions of the ASAE* 47(1) : 113-118.

Chantigny, M. et D. Angers. 2005. Activité microbiologique et qualité des sols : quoi de neuf sous nos pieds ? Colloque en agroenvironnement «Des outils d'intervention à notre échelle». Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. Drummondville (QC), 23 février 2005. 10 p.

Chantigny, M., D.A. Angers, D. Prévost, L.-P. Vézina et F.-P. Chalifour. 1997. Soil aggregation and fungal and bacterial biomass under annual and perennial cropping systems. *Soil Science Society of America Journal* 61: 262-267.

Chantigny, M.H., P. Rochette et D.A. Angers. 2001. Short-term C and azote dynamics in a soil amended with pig slurry and barley straw : a field experiment. *Canadian Journal of Soil Science* 81: 131-137.

Chantigny, M., M. Bolinder, D. Angers, R. Simard, P. Rochette, G. Bélanger, S. Beauchemin et D. Côté. 2001. Devenir agronomique et environnemental de l'azote (N), du phosphore (P) et de la matière organique suite au labour d'une prairie fertilisée avec du lisier de porc. Rapport final présenté à la Fédération des producteurs de porcs du Québec et à la Fédération des producteurs de cultures commerciales du Québec. 71 p.

Clapperton, J. 2000. Creating healthy productive soil habitat. Proceedings Direct Seeding Advantage, 2000. Alberta Reduced Tillage Linkages Library. Consulté en ligne : <http://www.reducedtillage.ca/Creating%20healthy%20productive%20soils.PDF>

Clark, R.G., C. Boutin, B. Jobin, D.J. Forsyth, D. Shutler, J.Y. Leeson, O. Olfert et A.G. Thomas. 2005. Living on the edge: Field boundary habitats, biodiversity and agriculture. *In* Field boundary habitats: implications for weed, insect and disease management. Topics in Canadian weed science, volume 1 (A.G. Thomas, Ed.). Saint-Anne-de-Bellevue, Québec: Canadian Weed Science Society – Société canadienne de malherbologie. p. 113-133.

Clausen, J.C., K. Guillard, C.M. Sigmund et K. Martin Dors. 2000. Water quality changes from riparian buffer restoration in Connecticut. *Journal of Environmental Quality* 29: 1751-1761.

Clemens, J., M. Trimborn, P. Weiland et B. Amon. 2006. Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 112: 171-177.

Cloutier, D.C., M.L. Leblanc et C. Côté. 2000. Weed seed contamination and survival in pig slurry. XI<sup>ème</sup> Colloque international sur la biologie des mauvaises herbes, 6-8 septembre 2000, Dijon, France.

Comis, D. 2005. Keeping nitrogen out of waterways. *Agricultural Research* 53(8): 16-17.

Comité d'experts en lutte intégrée. Consulté en ligne : <http://www.carc-crac.ca/french/ECIPM/ecipmf.htm>

Conseil pour le développement de l'agriculture du Québec (CDAQ) et Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). 2005. Réussir le semis direct et la culture sur billons. Fiche technique. 6 p. Consulté en ligne : [http://www.cdaq.qc.ca/content Documents/Doc\\_fiche3\\_Semis\\_direct.pdf](http://www.cdaq.qc.ca/content/Documents/Doc_fiche3_Semis_direct.pdf)

- Cook, M.G., P.G. Hunt, K.C. Stone et J.H. Canterbury. 1996. Reducing diffuse pollution through implementation of agricultural best management practices: A case study. *Water Science and Technology* 33(4-5): 191-196.
- Cook, R.J., W.F. Schillinger et N.W. Christensen. 2002. Rhizoctonia root rot and take-all of wheat in diverse direct-seed spring cropping systems. *Canadian Journal of Plant Pathology* 24(3): 349-358.
- Cook, R.J. et R.J. Veseth. 1991. Wheat health management. Plant Health Management Series. APS Press, St. Paul, USA.
- Cooper, L.M. 2003. Draft Guidance on Cumulative Effects Assessment of Plans, EPMG Occasional Paper 03/LMC/CEA, Imperial College London.
- Côté, D. 2004. Calendrier d'épandage des fumiers et des lisiers et minimisation du risque environnemental. Journée d'information des clubs conseils en agroenvironnement, 17 mars 2004, Québec. Présentation Power Point. Document interne. IRDA. 11 p.
- Côté, D., M. Giroux, A. N'dayegamiye et S.P. Guertin. 2004. Périodes d'épandage des engrais de ferme et risque environnemental. IRDA. Document interne. 12 p.
- Côté, D. 2006. Communication personnelle. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA).
- Côté, C., D.I. Massé et S. Quessy. 2006. Reduction of indicator and pathogenic microorganisms by psychrophilic anaerobic digestion in swine slurries. *Bioresource Technology* 97: 686-691.
- Côté, C. 2006. Communication personnelle. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA).
- Courtney, A.D. 1973. Wild oat seed survival in bedding, farmyard manure and slurry. *Agriculture in Northern Ireland* 47: 435-436.
- Coxworth, O. 1998. A review of nitrous oxide emissions from crop production systems, the effects of adoption of conservation tillage, and methods for the reduction of nitrous oxide emissions. Canadian Energy End-Use Data & Analysis Center (CAEEDAC), Department of Agricultural Economics, University of Saskatchewan. Consulté en ligne: <http://www.usask.ca/agriculture/caedac/dbases/coxworth2.html>
- Cullum, R.F., S.S. Knight, C.M. Cooper et S. Smith. 2005. Combined effects of best management practices on water quality in oxbow lakes from agricultural watersheds. *Soil & Tillage Research* (article in press).
- Dabney, S.M. 1998. Cover crop impacts on watershed hydrology. *Journal of Soil and Water Conservation* 53(3): 207-213.
- Damboise, J., R. Desjardins et J. L. Daigle. 2001. Design et efficacité des bandes riveraines. Colloque en agroenvironnement «L'agriculture et l'environnement en harmonie». IRDA-CRAAQ, Drummondville (QC), 21-22 novembre 2001. 26 p.

- Delabays, N. et G. Mermillod. 2002. Phénomènes d'allélopathie : premières observations au champ. *Revue suisse d'agriculture* 34(5): 231-237.
- Delgado, J.A., C.A. Cox, F.J. Pierce, M.G. Dosskey. 2005. Precision conservation in North America. *Journal of Soil and Water Conservation* 60(6): 340-341.
- DeRamus, H.A., T.C. Clement, D.D. Giampola et P.C. Dickison. 2003. Methane emissions of beef cattle on forages: efficiency of grazing management systems. *Journal of Environmental Quality* 32: 269-277.
- Derksen, D.A., R.L. Anderson, R.E. Blackshaw et B. Maxwell. 2002. Weed dynamics and management strategies for cropping systems in the northern Great Plains. *Agronomy Journal* 94: 174-185.
- Deschênes, M., L. Bélanger et J.-F. Giroux. 1999. Étude comparative de l'utilisation par les oiseaux de divers types de bandes riveraines en milieu agricole. Série de rapports techniques No 333. Service canadien de la faune, Région du Québec. 45 p.
- Desforges, J. 1996. Impacts des systèmes de culture sur les communautés lombriciennes. Mémoire de maîtrise. Université Laval, Québec, Canada.
- Deslandes J., A.R. Michaud, F. Bonn. 2002. Développement et validation d'indicateurs agroenvironnementaux associés aux pertes diffuses de phosphore dans le bassin-versant de la rivière aux Brochets. *Agrosol* 13: 111-123.
- Dhima, K.V., I.B. Vasilakoglou, I.G. Eleftherohorinos et A.S. Lithourgidis. 2006. Allelopathic potential of winter cereals and their cover crop mulch effect on grass weed suppression and corn development. *Crop Science* 46: 345-352.
- Dillaha, T.A. et S.P. Inandar. 1997. Buffer zones as sediment traps or sources. *In Buffer Zones : Their Processes and Potential in Water Protection*. N. E. Haycock *et al.* (ed.). p. 33-42.
- Diosma, G., M. Aulicino, H. Chidichimo, P. A. Balatti. 2006. Effect of N fertilization on microbial physiological profile of soils cultivated with wheat. *Soil & Tillage Research* (article in press).
- Dosskey, M.G., D.E. Eisenhauer, M.J. Helmers. 2005. Establishing conservation buffers using precision information. *Journal of Soil and Water Conservation* 58(6): 349-354.
- Dosskey, M.G., M.J. Helmers, D.E. Eisenhauer, T.G. Franti et K.D. Hoagland. 2002. Assessment of concentrated flow through riparian buffers. *Journal of Soil and Water Conservation* 57(6): 336-343.
- Douville, Y. 2002. Prévention des mauvaises herbes – Grandes cultures. Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec (MAPAQ).
- Duchemin, M. et R. Majdoub. 2004. Les bandes végétales filtrantes : de la parcelle au bassin versant. *Vecteur Environnement* 37(2): 36-50.

Duchesne, R.-M. 2006. Communication personnelle. Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec (MAPAQ).

Duguet, F., A. R. Michaud, J. Deslandes, R. Rivest et R. Lauzier. 2002. Gestion du ruissellement et de l'érosion pour limiter les pertes en phosphore en bassin versant agricole. *Agrosol* 13(2), pp.140-148

Dumas, C., É. Léger, J. Bourgeois et B. Tremblay. 2004. Le ruisseau du marais Noir : un modèle de gestion intégrée « faune-agriculture ». *Vecteur Environnement* 37(2): 67-72.

EPA. 2003. National management measures to control nonpoint pollution from agriculture. EPA 841-B-03-004. U.S Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC (USA).

EPA. 2003. National management measures to control non-point pollution from agriculture. EPA 841-B-03-004. U.S Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC (USA).

EPA. 2005. National Management Measures to Control Nonpoint Source Pollution from Forestry. EPA 841-B-05-001. U.S Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC.

Evans, R.G., G.W. Buchleiter, E.J. Sadler, B.A King et G.B Harting. 2000. Controls for precision irrigation with self-propelled systems. *In* Proceedings of the 4th Decennial National Irrigation Symposium. R. G. Evans, B. L. Benham and T.P. Trooien (Eds). American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, IL, États-Unis. p. 322-331.

Extension Toxicology Network (EXTOXNET). 1993. Movement of pesticides in the environment. Pesticide Management Education Program - Cornell University Cooperative Extension.

Consulté en ligne: <http://extoxnet.orst.edu/tibs/movement.htm>

Fajardo, J.J., J.W. Bauder et S.D. Cash. Managing nitrate and bacteria in runoff from livestock confinement areas with vegetative filter strips. *Journal of Soil and Water Conservation* 56(3): 185-191.

Fan, M.X., A.F. MacKenzie, M. Abbott et F. Cadrin. 1997. Denitrification estimates in monoculture and rotation corn as influenced by tillage and nitrogen fertilizer. *Canadian Journal of Soil Science* 77(3): 389-396.

Fawcett, R.S., B.R. Christensen et D.P. Tierney. 1994. The impact of conservation tillage on pesticide runoff into surface water: a review and analysis. *Journal of Soil and Water Conservation* 49(2): 126-135.

Fisk, J.W., O.B. Hesterman, A. Shrestha, J.J. Kells, R.R. Harwood, J.M. Squire et C.C. Sheaffer. 2001. Weed suppression by annual legume cover crops in no-tillage corn. *Agronomy Journal* 93: 319-325.

Florinsky, I.V., R.G. Eilers, G. Manning et L.G. Fuller. 2002. Prediction of soil properties by digital terrain modeling. *Environmental Modeling and Software* 17: 295-311.

Franti, T.G., M.C. McCullough, L.M. Stahr, M.G. Dosskey, D.D. Snow, R.F. Spalding et A.L. Boldt. 2004. Watershed scale impacts of buffers and upland conservation practices on agrochemical delivery to stream - Publication No. 701P0904. Proceedings of the 12-15 September - Conference self-sustaining solutions for streams, wetlands and watersheds (ASAE).

Franzluebbers, A.J. et F.M. Hons. 1996. Soil-profile distribution of primary and secondary plant-available nutrients under conventional and no tillage. *Soil & Tillage Research* 39(3-4): 229-239.

Gamache, P. 2004. Direct seeding and pest interactions. Reduced Tillage Linkages Library. Consulté en ligne : [http://www.reducedtillage.ca/DS\\_Pest\\_Interactions.PDF](http://www.reducedtillage.ca/DS_Pest_Interactions.PDF)

Gangbazo, G. 1991. Effets des évènements hydrologiques sur la perte d'azote et de phosphore suite à l'épandage de lisier de porc. Thèse présentée à l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-EAU), 324 p.

Gangbazo, G., C. Bernard et D. Côté. 1996. Effet de l'épandage du lisier de porc sur les eaux de ruissellement et de drainage. *Agrosol* 9(1): 46-51.

Gangbazo, G., A.R. Pesant, D. Côté, G.M. Barnett et D. Cluis. 1997. Spring runoff and drainage N and P losses from hog-manured corn. *J. of the Amer. Water Res. Assoc.* 33(2) : 405-411.

Gardner, J.C. et D.B. Faulkner. 1991. Use of cover crops with integrated crop-livestock production systems. In W.L. Hargrove (ed.) *Cover crops for clean water*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa. p. 185-191.

Gasser, M.O., M.R. Laverdière, R. Lagacé et J. Caron. 2000. Impact de la rotation pommes de terre-céréales avec apports de lisier sur le lessivage des nitrates et le bilan d'azote dans les sols sableux. Rapport de recherche présenté à la Fédération des producteurs de porcs du Québec et au Conseil canadien du porc.

Gasser, M.O., M.R. Laverdière, R. Lagacé, G. Barnett et J. Caron. 2000a. 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 porcs du Québec et au Conseil canadien du porc.

Gilbert, J. 2004. Crop diseases and reduced tillage. Direct Seeding Advantage Proceedings, 2004. Alberta Reduced Tillage Linkages Library. Consulté en ligne : <http://www.reducedtillage.ca/DSA/Gilbert%20Crop%20Diseases%20dsa%2004.pdf>

Ginting, D., J.F. Moncrief, S.C. Gupta et S.D. Evans. 1998a. Corn yield, runoff, and sediment losses from manure and tillage systems. *Journal of Environmental Quality* 27(6): 1396-1402.

Ginting, D., J.F. Moncrief, S.C. Gupta et S.D. Evans. 1998. Interaction between manure and tillage system on phosphorus uptake and runoff losses. *Journal of Environmental Quality* 27(6): 1403-1410.

Giroux, M et P. Enright. 2002. Concentrations et charges d'azote et de phosphore perdues dans les drains souterrains selon les cultures et les modes de fertilisation. Site de Saint-Lambert-de-



Lauzon. Cahiers de l'observatoire de la qualité des sols, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). 31 p.

Giroux, M. et T.S. Tran. 1996. Critères agronomiques et environnementaux liés à la disponibilité, la solubilité et la saturation en phosphore des sols agricoles du Québec. *Agrosol* 9(2): 51-57.

Giroux, M., A. N'dayegamiye et R. Royer. 2003a. Effets d'application de différents engrais organiques appliqués à l'automne et au printemps sur le rendement du maïs-ensilage, l'efficacité fertilisante de l'azote et le suivi de l'azote minéral dans les sols. Congrès de l'AQSSS, juin 2003, Sherbrooke. Présentation Power Point. Document interne. IRDA. 12 p.

Giroux, M., A.R. Michaud, C. Côté, N. Ziadi, S.P. Guertin et S. Quessy. 2003b. Stratégies de réduction à la ferme des risques environnementaux liés à la fertilisation avec des engrais de ferme. Colloque en agroenvironnement «La gestion des engrais organiques dans les régions à fortes concentrations animales». Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. Drummondville (QC), 13 novembre 2003. p. 73-100.

Giroux, M., M. Quénum et R. Royer. 2005. Influence des systèmes culturaux et des modes de fertilisation sur le bilan de la matière organique, du phosphore et du potassium, l'évolution de teneurs en éléments nutritifs des sols et les rendements des cultures. Cahiers de l'observatoire de la qualité des sols no 4, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement.

Giroux, M. 2006. Communication personnelle. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA).

Gitau, M.W., W.J. Gburek et A.R. Jarrett. 2005. A tool for estimating best management practice effectiveness for phosphorus pollution control. *Journal of Soil and Water Conservation* 60(1): 1-10.

Godbout, S., S.P. Lemay, R. Joncas, J.P. Larouche, D.Y. Martin, M. Leblanc, A. Marquis, J.F. Bernier, R.T. Zijlstra, E.M. Barber et D. Massé. 2000. Réduction des odeurs et des émissions gazeuses provenant des bâtiments porcins en utilisant une combinaison d'aspersion d'huile de canola et de diètes spécifiques. *Agrosol* 11(1) : 48-53.

Gorneau, W.S., T.G. Franti, B.L. Benham et S.D. Comfort. 2001. Reducing long-term atrazine runoff from south central Nebraska. *Transactions of the ASAE* 44(1): 45-52.

Goupil, J.-Y., 1995. Considérations d'ordre environnemental sur la bande riveraine de protection en milieu agricole. Ministère de l'Environnement et de la Faune, Québec, 45 p.

Goupil, Y. 1996. Document de réflexion sur la bande riveraine de protection. Ministère de l'environnement et de la faune du Québec. p. 40.

Grande J.D., K.G. Karthikeyan, P.S. Miller et J.M. Powell. 2005. Corn residue level and manure application timing effects on phosphorus losses in runoff. *Journal of Environmental Quality* 34: 1620-1631.

Grande J.D., K.G. Karthikeyan, P.S. Miller et J.M. Powell. 2005. Residue level and manure application timing effects on runoff and sediment losses. *Journal of Environmental Quality* 34: 1337-1346.

Grando, S. 1996. Effets de deux modes d'épandage de lisier de porc sur la qualité de l'eau de ruissellement. Mémoire de fin d'études, ENITA de Bordeaux, 64 p.

Gratton, L. 1989. L'utilisation des plantes ligneuses dans la stabilisation des berges en milieu agricole. Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche, Direction de la gestion des habitats (Québec), 61 p.

Gregorich, E.G., P. Rochette, A.J. VandenBygaart et D.A. Angers. 2005. Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada. *Soil and Tillage Research* 83(1): 53-72.

Guertin, S. et G. Barnett. 2001. Impact des systèmes et pratiques culturales sur la qualité de l'eau. Colloque en agroenvironnement «L'agriculture et l'environnement en harmonie». Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. Drummondville (QC), 21-22 novembre 2001. 10 p.

Guertin, S.P., G.M. Barnett, M. Giroux, A.F. Mackenzie, A. Pesant et L.E. Parent. 2000. Effet de pratiques culturales dans la culture de maïs, en terrain vallonné, sur les risques de contamination des eaux de ruissellement et de drainage. *Agrosol* 11(2): 107-113.

Hansen, E.M. et J. Djurhuus. 1997. Nitrate leaching as influenced by soil tillage and catch crop. *Soil & Tillage Research* 41: 203-219.

Hao, X., C. Chang, R.L. Conner et P. Bergen. 2001. Effect of minimum tillage and crop sequence on crop yield and quality under irrigation in a southern Alberta clay loam soil. *Soil & Tillage Research* 59: 45-55.

Harmon, G.W. et F.D. Kleim. 1934. The percentage and viability of weed seed recovered in the feces of farm animals and their longevity when buried in manure. *Journal of the American Society of Agronomy* 26: 762-767.

Helgason, B.L., H.H. Janzen, M. Chantigny, C. Drury, B.H. Ellert, E.G. Gregorich, R.L. Lemke, E. Patty, P. Rochette et C. Wagner-Riddle. 2005. Toward improve coefficients for predicting direct N<sub>2</sub>O emissions from soil in Canadian Agroecosystem. *Nutrient Cycling in Agroecosystem* 72(1): 87-99.

Hillbricht-Ilkowska, A., L. Ryszkowski et A.N. Sharpley. 1994. Phosphorus transfers and landscape structure: riparian sites and diversified land use patterns. *SCOPE 54 -Phosphorus in the Global Environment - Transfers, Cycles and Management*. Scientific Committee On Problems of the Environment (SCOPE), 1996. Wiley eds. Edited by Holm Tiessen.

Hirschi, M., R. Frazee, G. Czapar et D. Peterson. 1997. 60 ways farmers can protect surface water. North Central Regional Extension Publication 589, Information Technology and Communication Services, College of Agricultural, Consumer and Environmental Sciences, University of Illinois, Urbana- Champaign, IL, USA. 317 p.

<http://www.thisland.uiuc.edu/60ways/60ways.html>

- Isensee, A.R. et A.M. Sadeghi. 1993. Impact of tillage practice on runoff and pesticide transport. *Journal of Soil and Water Conservation* 48(6): 523-527.
- Isensee, A.R., R.G. Nash et C.S. Helling. 1990. Effect of conventional vs. no-tillage on pesticide leaching to shallow groundwater. *Journal of Environmental Quality* 19(3): 434-440.
- Isse, A.A., A.F. MacKenzie, K. Stewart, D.C. Cloutier et D.L. Smith. 1999. Cover crops and nutrient retention for subsequent sweet corn production. *Agronomy Journal* 91: 934-939.
- Johnson, N.C., J.H. Graham et F.A. Smith. 1997. Functioning of mycorrhizal associations along the mutualism-parasitism continuum. *New Phytologist* 135: 575-586.
- Jokela, W.E., J.C. Clausen, D.W. Meals et A.N. Sharpley. 2004. Effectiveness of agricultural best management practices in reducing phosphorus loading to Lake Champlain. Dans: *Lake Champlain. Partnerships and research in the new millenium*. T.O. Manley, P.L. Manley et T.B. Mihuc Eds. Kluwer Academic/Plenum Publishers, new York, États-Unis.
- Jokela, W.E., J.W. Hugues, D. Tobi et D.W. Meals. 1999. Managed vegetative riparian buffers to control phosphore runoff losses from corn fields. *Agronomy Abstract. Amer. Soc. Agron., Madison, WI, États-Unis*. p. 286.
- Kabir, Z. 2005. Tillage or no-tillage : impact on mycorrhizae. *Canadian Journal of Plant Science* 85: 23-29.
- Katsvairo, T.W. et W.J. Cox. 2000. Tillage x rotation x management interactions in corn. *Agronomy Journal* 92: 493-500.
- Katsvairo, T.W., W.J. Cox et H. van Es. 2002. Tillage and rotation effects on soil physical characteristics. *Agronomy Journal* 94: 299-304.
- Kerle, E.A., J.J. Jenkins et P.A. Vogue. 1996. Understanding pesticide persistence and mobility for groundwater and surface water protection. Document EM 8561, Oregon State University Extension Service, Oregon, USA.
- Kern, J.D. et M.L. Wolfe. 2005. Cover crop / dairy manure management systems : water quality and soil system impacts. *Transactions of the ASAE* 48(4): 1333-1341.
- Kleinman, P.J.A., P. Salon, A.N. Sharpley et L.S. Saporito. 2005. Effect of cover crops established at time of corn planting on phosphorus runoff from soils before and after dairy manure application. *Journal of Soil and Water Conservation* 60(6): 311-322.
- Klik, A., A.S. Zartl et J. Rosner. 2001. Tillage effects on soil erosion, nutrient, and pesticide transport. *In Soil Erosion Research for the 21st Century, Proc. Int. Symp. (3-5 January 2001, Honolulu, HI, USA)*. Eds. J. C. Ascough II and D. C. Flanagan. St-Joseph, MI : ASAE.701P0007. p. 71-74.
- Koro, N., C. Bernard et M.R. Laverdière. 1995. Contrôle du ruissellement, de l'érosion et des pertes de phosphore par les résidus de culture, sous pluie simulée. *Étude et Gestion des Sols* 2(3): 173-182.

Kronvang, B., M. Bechmann, H. Lundekvam, H. Behrendt, G.H. Rubæk, O.F. Schoumans, N. Syversen, H.E. Andersen et C.C. Hoffmann. 2005. Phosphorus losses from agricultural areas in river basins: effects and uncertainties of targeted mitigation measures. *Journal of Environmental Quality* 34: 2129-2144.

Krupinsky, J.M., D.L. Tanaka, M.T. Lares et S.D. Merrill. 2004. Leaf spot diseases of barley and spring wheat as influenced by preceding crops. *Agronomy Journal* 96: 259-266.

Krupinsky, J.M., K.L. Bailey, M.P. McMullen, B.D. Gossen et T.K. Turkington. 2002. Managing plant disease risk in diversified cropping systems. *Agronomy Journal* 94: 198-209.

Krutz, L.J., S.A. Senseman, R.M. Zablotowicz et M.A. Matocha. 2005. Reducing herbicide runoff from agricultural fields with vegetative filter strips : a review. *Weed Science* 53: 353-367.

La Flamme, C., P. Enright et C. Madramootoo. 2004. Sediment and nutrient removal efficiencies in a constructed wetland in southern Quebec. 2004 ASAE/CSAE Annual International Meeting, Ottawa (Ontario), Canada. 1-4 août 2004. 14 p.

Lal, R., E. Regnier, D.J. Eckert, W.M. Edwards et R. Hammond. 1991. Expectations of cover crops for sustainable agriculture. *In* W.L. Hargrove (ed.) *Cover crops for clean water*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa. p. 1-11.

Langdale, G.W., R.L. Blevins, D.L. Karlen, D.K. McCool, M.A. Nearing, E.L. Skidmore, A.W. Thomas, D.D. Tyler et J.R. Williams. 1991. Cover crop effects on soil erosion by wind and water. *In* W.L. Hargrove (ed.) *Cover crops for clean water*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa. p. 15-22.

Leblanc, M. L., D. C. Cloutier et C. Côté. 2000. Effect of Pig Application on Weed Emergence. *Ann. Assoc. Fr. Prot. Pl.* 11: 81-88.

Leblanc, M., D.C. Cloutier et G. D. Leroux. 1995. Réduction de l'utilisation des herbicides dans le maïs-grain par une application d'herbicides en bandes combinée à des sarclages mécaniques. *Weed Research* 35: 511-522.

Leblanc, M., D.C. Cloutier, G.D. Leroux et C. Hamel. 1998. Facteurs impliqués dans la levée des mauvaises herbes au champ. *Phytoprotection* 79: 111-127.

Leblanc, M.L. et D.C. Cloutier. 1996. Effet de la technique du faux-semis sur la levée des adventices annuelles. Xe colloque international sur la biologie des mauvaises herbes, Dijon, septembre 1996, pp 29-34.

Leblanc, M.L., D.C. Cloutier et G.D. Leroux. 1993. Évaluation des sarclages et des cultures intercalaires comme méthodes alternatives de désherbage dans le maïs-grain. *In*: J.-M. Thomas (Ed.) *Maîtrise des adventices par voie non-chimique*. Comm. 4e Conf. Int. I.F.O.A.M. Dijon (France) 5-9 juillet 1993. p. 263-267.

Leblanc, M.L., D.C. Cloutier et G.D. Leroux. 1993. Évaluation des sarclages et des cultures intercalaires comme méthodes alternatives de désherbage dans le maïs-grain. In: J.-M. Thomas (Ed.) Maîtrise des adventices par voie non-chimique. Comm. 4e Conf. Int. I.F.O.A.M. Dijon (France) 5-9 juillet 1993. p. 263-267.

Leblanc, M.L., G. Breton, D. Cloutier, J. Boisclair, G. Moreau et J. Brodeur. 2003. Validation de techniques de lutte alternative contre les insectes et les mauvaises herbes dans le maïs sucré. Stratégie phytosanitaire/SLV 2000, IRDA-2-MSU-02-126, 48 p.

Leblanc, M. 2006. Communication personnelle. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA).

Leeds-Harrison, P.B., J.N. Quinton, M. J. Walker, K.S. Harrison, D.J. Gowing, S.F. Tyrrel, J. Morris, J. Mills et T. Harrod. 1996. Buffer zones in headwater catchments. School of Agriculture and the environment, Silsoe, Beds (UK).

Consulté en ligne: <http://www.silsoe.cranfield.ac.uk/iwe/projects/bzp/>

Lemke, R.L., R.C. Izaurralde, M. Nyborg, et E.D. Solberg. 1999. Tillage and N-source influence soil-emitted nitrous oxide in the Alberta Parkland region. Canadian Journal of Soil Science 79(1): 15–24.

Lemke, R. 2003. No-till, carbon sequestration, and nitrous oxide emissions. Direct Seeding Advantage Proceedings, 2003. Alberta Reduced Tillage Linkages Library. Consulté en ligne: <http://www.reducedtillage.ca/No%20Till%20Carbon%20Sequestration%20Nov%2003%20DSA.PDF>

Lemunyon, J.L. 1991. Grass species influence on the fate of nitrogen entrapped in vegetated filter strips. University of Rhodes Islands, États-Unis.

Leng, R.A. Quantitative ruminant nutrition: a green science. 1993. Australian Journal of Agricultural Research 44: 363-380.

Leroux, G.D., Simard, R.R., Vanasse, A., 1998. Étude multidisciplinaire pour la mise au point d'une méthode de lutte intégrée incluant des pratiques de phytoprotection et de régie, utilisant moins de pesticides dans cultures qui requièrent des mesures intensives de phytoprotection. Projet no. 14-41696815-079 réalisé dans le cadre de l'entente auxiliaire Canada-Québec pour un environnement durable en agriculture. 72 p.

Lindwall, W., B. McConkey, C. Campbell et G. Lafond. 2003. 20 years of conservation tillage: what have we learned ? 20<sup>th</sup> Annual Meeting of Alberta Conservation Tillage Society (ACTS). Consulté en ligne: <http://www.reducedtillage.ca/20yearsct.pdf>

Linn, D.M., and J.W. Doran. 1984. Effect of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils. Soil Science Society of America Journal 48: 1267–1272.

Lowrance, R., S. Dabney et R. Schultz. 2002. Improving water and soil quality with conservation buffers. Journal of Soil and Water Conservation 57(2): A36-A43.

MacDonald, L.H. 2000. Evaluating and Managing Cumulative Effect : Process and Constraints. Environmental Management 26(3): 299-315.

MacKenzie, A.F., M.X. Fan et F. Cadrin. 1997. Nitrous oxide emission as affected by tillage, corn-soybean-alfalfa rotations and nitrogen fertilization. *Canadian Journal of Soil Science* 77(2): 145-152.

MacMillan, R.A., W.W. Pettapiece, S.C. Nolan et T.W. Goddard. 2000. A Generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. *Fuzzy Sets and Systems* 113: 81-109.

MacRae, T., C.A.S. Smith et L.J. Gregorich (éd). 2000 *L'agriculture écologiquement durable au Canada : rapport sur le Projet des indicateurs agroenvironnementaux*, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa (Ontario).

Majdoub, R., C. Côté, M. Labidi, K. Guay et M. Généreux. 2003. Revue de littérature : Impact de l'utilisation des engrais de ferme sur la qualité microbiologique de l'eau souterraine. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) et le Ministère de l'agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec (MAPAQ). 125 p.

Majdoub, R., C. Côté et M. Duchemin. 2004. Risque de contamination microbiologique des eaux souterraines et mesures préventives à adopter. *Vecteur Environnement* 37(2): 61-66.

Malhi, S.S., R. Lemke, Z.H. Wang et B.S. Chhabra. 2006. Tillage, nitrogen and crop residue effects on crop yield, nutrient uptake, soil quality, and greenhouse gas emissions. *Soil & Tillage Research* (article in press).

Malone, R.W., M.J. Shipitalo, R.D. Wauchope et H. Sumner. 2005. Residual and contact herbicide transport through field lysimeters via preferential flow. *Journal of Environmental Quality* 33: 2141-2148.

Malone, R.W., S. Logsdon, M.J. Shipitalo, J. Weatherington-Rice, L. Ahuja et L. Ma. 2003. Tillage effect on macroporosity and herbicide transport in percolate. *Geoderma* 116(1-2): 191 - 215.

Mamo, M., D. Grinting, W.C. Zanner, D.L. MaCallister, R.R. Renken et C.A. Shapiro. 2005. Phosphorus stratification and potential for runoff loss following long term manure application. *Journal of Soil and Water Conservation* 60(5): 243-250.

MAPAQ. 1998. *La lutte intégrée, tout le monde y gagne*. Dépliant du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) dans le cadre de la Stratégie phytosanitaire.

MAPAQ et AAC. 2005. Guide d'élaboration du PAA à l'intention des agronomes. <http://www.mapaq.gouv.qc.ca/Fr/Productions/Agroenvironnement/mesuresappui/planaccompagnement/documentation/>

Marineau, A. 1999. Rôles et fonctions des bandes riveraines sur l'entomofaune. Concours de rédaction scientifiques – Premier Prix. *Antennae*, 6(3).

Consulté en ligne : [www.seq.qc.ca/antennae/archives/v6n3p5.htm](http://www.seq.qc.ca/antennae/archives/v6n3p5.htm)

- Marshall, E.J.P., V.K. Brown, N.D. Boatman, P.J.W. Lutman, G.R. Squire et L.K. Ward. 2003. Weed Research 43: 77-89.
- Marshall, E.J.P, V. Brown, N. Boatman, P. Lutman et G. Squire. 2001. The impact of herbicide on weed abundance and biodiversity. PN0940. A report for the UK Pesticide Safety Directorate. IACR-Long Ashton Research Station, UK.
- Marshall, E.J.P. 2005. Field margins in northern Europe: integrating agricultural, environmental and biodiversity functions. *In* Field boundary habitats: implications for weed, insect and disease management. Topics in Canadian weed science, volume 1 (A.G. Thomas, Ed.). Saint-Anne-de-Bellevue, Québec: Canadian Weed Science Society – Société canadienne de malherbologie. p. 39-67.
- Martin, D.-Y., F. Pouliot et D. Potvin. 2003. La séparation de phase, un incontournable. Colloque en agroenvironnement «La gestion des engrais organiques dans les régions à fortes concentrations animales». Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. Drummondville (QC), 13 novembre 2003. p. 101-127.
- Massicote, D., D. Angers, Y. Bédard, P. Chouinard, M. Laverdière, G. Mehuys et L. Robert. 2000. Guide des pratiques de conservation en grandes cultures. Impacts sur les propriétés du sol, les cultures et l'environnement. Publication du CRAAQ, QC., Canada, p. 14.
- Maurer-Troxler, C., A. Chervet, L. Ramseier et W.G. Sturny. 2006. Biologie du sol après 10 ans de semis direct ou de labour. Revue suisse d'agriculture 38(2): 89-94.
- McDowell, L.L. et K.C. McGregor. 1984. Plant nutrient losses in runoff from tillage corn. Soil & Tillage Research 4: 79-91.
- Meals, D.W. 1996. Watershed-scale response to agricultural diffuse pollution control programs in Vermont, USA. Water Science and Technology 33(4-5): 197-204.
- Meals, D.W. 1990. LaPlatte River watershed water quality monitoring and analysis program: comprehensive final report. Program report no.12. Vermont Water Resources Research Center, University of Vermont, Burlington, VT, États-Unis.
- Meissner, R., J. Seeger et H. Rupp. 2002. Effects of agricultural land use changes on diffuse pollution of water resources. Irrigation and Drainage 51: 119-127.
- Melander, B., I.A. Rasmussen et P. Bàrberi. 2005. Integrating physical and cultural methods of weed control – examples from European research. Weed Science 53: 369-381.
- Merril, S.D., J.M. Krupinsky, D.L. Tanaka et R.L. Anderson. 2006. Soil coverage by residue as affected by ten crop species under no-till in the Northern Great Plains. Journal of Soil and Water Conservation 61(1): 7-13.
- Meyer, L.D., S.M. Dabney, C.E. Murphree, W.C. Harmon et E.H. Grissinger. 1999. Crop production systems to control erosion and reduce runoff from upland silty soils. Transactions of the ASAE 42(6): 1645-1652.

Michaud, A.R. 2004. Indicateurs agroenvironnementaux adaptés à la gestion de projets ciblés sur la prévention de la pollution diffuse par le phosphore. Thèse de doctorat, Université Laval, Québec (QC), Canada.

Michaud, A., J. Deslandes et J. Desjardins. 2004. Rapport final : Réseau d'actions concertées en bassins versants agricoles, Projet de recherche et de développement présenté au Fonds d'action québécois pour le développement durable et son partenaire financier le gouvernement du Québec (Projet no. 212), IRDA, Québec, 100 p.

Michaud, A.R. et M.R. Laverdière. 2004. Effects of cropping, soil type and manure application on phosphorus export and bioavailability. *Canadian Journal of Soil Science*, 38: 295-305.

Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires Rurales de l'Ontario (MAAARO). 2002. Guide agronomique des grandes cultures. Publication 811F No d'agdex: 100.  
<http://www.omafra.gov.on.ca/french/crops/pub811/p811toc.html>

Mitsch, W.J. et J.G. Gosselinck. (1986). *In* Wetlands. Van Nostrand Reinhold New York. 538 p.

Monteny, G.-J., A. Bannink et D. Chadwick. 2006. Greenhouse gas abatement strategies for animal husbandry. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 112: 163-170.

Murphy, S.D., D.R. Clements, S. Belaoussoff, P.G. Kevan et C.J. Swanton. 2006. Promotion of weed species diversity with conservation tillage and crop rotation. *Weed Science* 54: 69-77.

Naderman, G.C. 1991. Effects of crop residue and tillage practices on water infiltration and crop production. *In* W.L. Hargrove (ed.) *Cover crops for clean water*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa. p. 23-24.

Nazarko, O.M., R.C. Van Acker et M.H. Entz. 2005. Strategies and tactics for herbicide use reduction in field crop in Canada : a review. *Canadian Journal of Plant Science* 85: 457-479.

N'Dayegamiye, A. et T.S . Tran. 2001. Effects of green manures on soil organic matter and wheat yields and azote nutrition. *Canadian Journal of Soil Science* 81: 371-382.

N'Dayegamiye, A., M. Giroux et R. Royer. 2004. Épandages d'automne et de printemps de divers fumiers et boues mixtes de papetières: rendements de maïs-ensilage, coefficient d'efficacité et accumulation de nitrates dans le sol. *Rapport de recherche 2001-2003*. IRDA.24 p.

N'Dayegamiye, A. et A. Vanasse. 2005. Impacts des régies agricoles sur la séquestration du carbone et de l'azote dans les sols pour réduire les émissions de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O). *Vecteur environnement* 38(6): 58-64.

N'Dayegamiye, A. et D.A. Angers. 1990. Effects of long-term cattle manure applications on physical and chemical properties of a Neubois silty loam cropped to corn. *Canadian Journal of Soil Science* 70: 259-262.

Olfert, O., H. Cárcamo et J. Pepper. 2005. Insect pests and arthropod diversity in field margins of western Canada. *In* *Field boundary habitats: implications for weed, insect and disease management*. Topics in Canadian weed science, volume 1 (A.G. Thomas, Ed.). Saint-Anne-de-



Bellevue, Québec: Canadian Weed Science Society – Société canadienne de malherbologie. p. 135-163.

Ordre des agronomes du Québec (OAQ). 2003. Ligne directrice de l'Ordre des agronomes du Québec sur la gestion des matières fertilisantes adoptée le 20 septembre 2003 et précisée le 1er octobre 2003. 9 p.

Paquet, B. et C. Maisonneuve. 2004. Fréquentation de la bande riveraine par la faune en milieu agricole : mythes et réalités. *Vecteur Environnement* 37(2): 73-77.

Patty, L., B. Réal et J.J. Gril. 1997. The use of grassed buffer strips to remove pesticides, nitrate and soluble phosphorus compounds from runoff water. *Pesticide Science* 49: 243-251.

Peachey, R.E., A. Moldenke, R.D. William, R. Berry, E. Ingham et E. Groth. 2002. Effect of cover crops and tillage system on symphytan (Symphylya : Scutigera immaculata, Newport) and Pergamasus quisquiliarum Canestrini (Acari : Mesostigmata) populations, and other soil organisms in agricultural soils. *Applied Soil Ecology* 21: 59-70.

Pelletier, F., S. Godbout et R. Joncas. 2004. Connaître et réduire les émissions de gaz, de poussières et d'odeurs reliées aux productions animales. Commission de génie agroalimentaire et de l'environnement, Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Québec.

Pelletier, F., R. Joncas et M. Côté. 2003. Étude environnementale des enclos d'hivernage de vache-veaux. Rapport final, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), 82 p.

Pennock, D.J. 2005. Precision Conservation for co-management of carbon and nitrogen on the Canadian prairies. *Journal of Soil and Water Conservation*, 60(6): 396-401.

Pennock, D.J. 2003b. Multi-site assessment of cultivation induced soil change using revised landform segmentation procedures. *Canadian Journal of Soil Science* 83: 565-580.

Peterjohn, W.T. et D.L. Correl. 1984. Nutrient dynamics in an agricultural watershed: Observations on the role of a riparian forest. *Ecology* 65: 1466-1475.

Peters, R.D., A.V. Sturz, M.R. Carter et J.B. Sanderson. 2003. Developing disease-suppressive soils through crop rotation and tillage management practices. *Soil and Tillage Research* 72(2): 181-192.

Peters, R.D., A.V. Sturz, M.R. Carter et J.B. Sanderson. 2005. Crop rotation can confer resistance to potatoes from *Phytophthora erythroseptica* attack. *Canadian Journal of Plant Science* 85: 523-528.

Pigeon, S. 2005. Rampes d'épandage. Plan des interventions agroenvironnementales de la Fédération des producteurs de porcs du Québec (FPPQ). Fiche technique N° 5.

Piovanelli, C., C. Gamba, G. Brandi, S. Simoncini et E. Batistoni. 2005. Tillage choices affect biochemical properties in the soil profile. *Soil and Tillage Research*, In Press, Corrected Proof, Available online 3 October 2005.

Poisson, D., E. Solberg et M. Hartman. 1996. Direct seeding - Soil fertility implications when converting to direct seeding. Agdex 519-10, Alberta Agriculture, Food and Rural Development. Consulté en ligne :

[http://www1.agric.gov.ab.ca/\\$department/deptdocs.nsf/all/agdex181/\\$file/519-10.pdf?OpenElement](http://www1.agric.gov.ab.ca/$department/deptdocs.nsf/all/agdex181/$file/519-10.pdf?OpenElement)

Pote, D.H., T.C. Daniel, D.J. Nichols, A.N. Sharpley, P.A. Moore, D.M. Miller et D.R. Edwards. 1999. Relationship between phosphorus levels in three ultisols and phosphorus concentrations in runoff. *J. Environ. Qual.* 28:170-175.

Poulin, R.G., L.D. Todd, K.M. Dohms, R.M. Brigham et T.I. Wellicome. 2005. Factors associated with nest- and roos-burrow selection by burrowing owls (*Ethene cunicularia*) on the Canadian prairies. *Canadian Journal of Zoology* 83: 1373-1380.

Pouliot, F. 2002. Les toitures sur les fosses à lisier: réduction des odeurs et des volumes. Plan des interventions agroenvironnementales de la Fédération des producteurs de porcs du Québec (FPPQ). Fiche technique N° 4.

Power, J.F., R. Wiese et D. Flowerday. 2001. Managing farming systems for nitrate control: a research review from management systems evaluation areas. *Journal of Environmental Quality* 30: 1866-1880.

Renschler, C.S. et T. Lee. 2005. Spatially distributed assessment of short- and long-term impacts of multiple best management practices in agricultural watersheds. *Journal of Soil and Water Conservation* 60(6): 446-456.

Richardson, C.J. 1985. Mechanisms controlling phosphorus retention capacity in freshwater wetlands. *Science* 228: 1424-1427.

Rimovsky, K. et J. Sverakova. 1993. Potencialni zaplevani pudy pri hnojeni kejdou prasat (Potential weed infestation of the soil at pig manuring). *Rostlinna Vyroba* 39: 31-39.

Rivest, R. 2005. La micro-topographie; Rendements accrus; Environnement protégé. *Producteur Plus* 14(2): 46-54.

Roberts, B.W. et B. Cartwright. 1991. Cover crop, nitrogen, and insect interactions. *In* W.L. Hargrove (ed.) *Cover crops for clean water*. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa. p. 164-165.

Rochette, P., D.A. Angers, M.H. Chantigny, N. Bertrand et D. Côté. 2004. Carbon dioxide and nitrous oxide emissions following fall and spring applications of pig slurry to an agricultural soil. *Canadian Journal of Soil Science* 68: 1410-1420.

Rochette, P., M.H. Chantigny, D.A. Angers, N. Bertrand et D. Côté. 2001. Ammonia volatilization and soil nitrogen dynamics following fall application of pig slurry on canola crop residues. *Canadian Journal of Soil Science* 81: 515-523.

P.Rochette and H. H. Janzen. 2005. Towards a revised coefficient for estimating N<sub>2</sub>O emissions from legumes. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* (2005) 73:171-179.

- Roulier, S. et N. Jarvis. 2003. Modeling macropore flow effects on pesticide leaching: inverse parameter estimation using microlysimeters. *Journal of Environmental Quality* 32: 2341-2353.
- Sainz Rosas, H.R., H.E. Echeverría et L.I. Picone. 2001. Denitrification in maize under no-tillage. *Soil Science Society of America Journal* 65: 1314-1323.
- Sexton, A.M., A Shirmohammadi, H. Montas et T.J. Gish. 2000. Pesticide loss in surface runoff under various tillage and pesticide formulation conditions. 2000 ASAE Annual International Meeting, Milwaukee, Wisconsin, USA, 9-12 July 2000. American Society of Agricultural Engineers, St Joseph (USA). p. 1-10.
- Sharpley, A., T.C. Daniels, J.T. Sims et D.H. Pote. 1996. Determining environmentally sound soil phosphorus level. *Journal of Soil and Water Conservation* 51(2): 160-166.
- Shipitalo, M .J. et W.M. Edwards. 1998. Runoff and erosion control with conservation tillage and reduced-input practices on cropped watersheds. *Soil & Tillage Research* 46: 1-12.
- Shipitalo, M.J., W.A. Dick et W.M. Edwards. 2000. Conservation tillage and macropore factors that affect water movement and the fate of chemicals. *Soil and Tillage Research* 53(3-4) : 167-183.
- Simard, R.R., S. Beauchemin, I. Royer et G.M. Barnett. 2001 .Long-term manure impact on soil nutrient status and surface water quality. Proceedings of the Livestock Options for the Future Conference, Winnipeg, MB, 25-27 juin, 2001.
- Simeral, K.D. 1998. Using constructed wetlands for removing contaminants from livestock wastewater. Ohio State University, Columbus (OH), États-Unis.
- Singh, B. et S.S. Malhi. 2006. Response of soil physical properties to tillage and residue management on two soils in a cool temperate environment. *Soil & Tillage Research* 85: 143-153.
- Soon, Y.K. et M.A. Arshad. 2004. Tillage, crop residue and crop sequence effects on nitrogen availability in a legume-based cropping system. *Canadian Journal of Soil Science* 84: 421-430.
- Soon, Y.K., H.W. Klein-Gebbinck et M.A. Arshad. 2005. Residue management and crop sequence effects on yield and brown girdling root rot of canola. *Canadian Journal of Plant Science* 85: 67-72.
- Staver, K.W. et R.B. Brinsfield. 1998. Using cereal grain winter cover crops to reduce groundwater nitrate contamination in the mid-Atlantic coastal plain. *Journal of Soil and Water Conservation* 55(3) : 230-240.
- Steinert, K. 2005. Konservierende bodenbearbeitung auf einem hochleistungsstandort in der hildesheimer börde: kraftstoffverbrauch hat sich halbiert. *Landwirtschaft ohne Pflug* 3: 4-9.
- Stevenson, F.C., A. Legere, R.R. Simard, D.A. Angers, D. Pageau et J. Lafond. 1998. Manure, tillage, and crop rotation: effects on residual weed interference in spring barley cropping systems. *Agronomy Journal* 90(4): 496-504.

Stoddard, C.S., J.H. Grove, M.S. Coyne et W.O. Thom. 2005. Fertilizer, tillage, and dairy manure contributions to nitrate and herbicide leaching. *Journal of Environmental Quality*. 34(4): 1354-1362.

Strebel, O., W.H.M. Duynisveld et J. Böttcher. 1989. Nitrate pollution of groundwater in western Europe. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 26: 189-214.

Strock, J.S., P.M. Porter et M.P. Russelle. 2004. Cover cropping to reduce nitrate loss through subsurface drainage in the northern U.S. corn belt. *Journal of Environmental Quality* 33: 1010-1016.

Sturz, A.V. et B.R. Christie. 2003. Beneficial microbial allelopathies in the root zone : the management of soil quality and plant disease with rhizobacteria. *Soil & Tillage Research* 72: 107-123.

Swanton, C.J., B.D. Booth, D.R. Clements et A. Shrestha. 2006. Management in a modified no-tillage corn-soybean-wheat rotation influences weed population and community dynamics. *Weed Science* 54 : 47-58.

Tanaka, D.L., R.L. Anderson et S.C. Rao. 2005. Crop sequencing to improve use of precipitation and synergize crop growth. *Agronomy Journal* 97: 385-390.

Teasdale, J.R. et R.C. Rosecrance. 2003. Mechanical versus herbicidal strategies for killing a hairy vetch cover crop and controlling weeds in minimum-tillage corn production. *American Journal of Alternative Agriculture* 18(2): 95-102.

Teasdale, J.R., P. Pillai et R.T. Collins. 2005. Synergism between cover crop residue and herbicide activity on emergence and early growth of weeds. *Weed Science* 53: 521-527.

Thibodeau, S. et O. Ménard. 1993. Pratiques agricoles de conservation ; ce qu'elles sont, ce qu'elles font, ce qu'elles valent . Colloque sur la gestion de l'eau : « L'eau de demain, quel héritage laisserons-nous ? » Conseil des productions végétales du Québec inc. (CPVQ). p. 139-154.

Tisdall, J.M. et J.M. Oades. 1982. Organic matter and water stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science* 33: 141-163.

Turgeon, M.-J., 2002. Régie alimentaire pour réduire les rejets d'azote et de phosphore. Plan des interventions agroenvironnementales de la Fédération des producteurs de porcs du Québec (FPPQ). Fiche technique N° 2.

Tyson, T.W. 1996. Constructed wetlands for animal waste treatment. Auburn (AB): Alabama Cooperative Extension System, AL, États-Unis.

Consulté en ligne : <http://www.aces.edu/pubs/docs/A/ANR-0965/>

Uusi-Kämpfä, J., B. Braskerud, H. Jansson, N. Syverson et R. Uusilato. 2000. Buffer zones and constructed wetlands as filters for agricultural phosphorus. *Journal of Environmental Quality* 29: 151-158.

Vallières, D. 2005. Bandes enherbées étroites et travail réduit de sol pour contrôler la pollution diffuse en milieu agricole. Colloque en agroenvironnement «Des outils d'intervention à notre

échelle». Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. Drummondville (QC), 23-24 fév. 2005. 9 p.

Vézina, A. 2005. Des haies brise-vent autour des bâtiments d'élevage et des cours d'exercice: de la planification à l'entretien. Fédération des producteurs de porcs du Québec.

VT RCWP Coordinating Committee. 1991. St. Albans Bay Rural Clean Water program, final report. 1991. Vermont Water Resources Research Center, University of Vermont, Burlington, VT, É.-U.

Vullioud, P., J.-A. Neyroud et E. Mercier. 2006. Résultats de 35 ans de culture sans labour à Changins: II. Évolution des propriétés du sol. *Revue suisse d'agriculture* 38(1): 1-16.

Vullioud, P., N. Delabeys, P. Frey et E. Mercier. 2006a. Résultats de 35 ans de culture sans labour à Changins: III. Mauvaises herbes, maladies fongiques et ravageurs. *Revue suisse d'agriculture* 38(2): 81 - 87.

Vyn, T.J., J.G. Faber, K.J. Janovicek et E.G. Beauchamp. 2000. Cover crop effects on nitrogen availability to corn following wheat. *Agronomy Journal* 92: 915-924.

Waddell, J.T. et R.R. Weil. 2005. Effects of fertilizer placement on solute leaching under ridge tillage and no tillage. *Soil & Tillage Research* (article in press).

Waid, J.S. 1999. Does soil biodiversity depend upon metabiotic activity and influences ? *Applied Soil Ecology* 13: 151-158.

Walter, M.F., T.L. Richard, P.D. Robillard et R. Muck. 1987. Manure management with conservation tillage. *In* Effects of conservation tillage on groundwater quality: nitrates and pesticides. T.J. Logan *et al.*, eds. Chelsea, MI : Lewis Publishers. p. 253-270.

Wolf, T.M., A.J. Cessna, B.C. Caldwell et J.L. Pederson. 2005. Riparian vegetation reduces spray drift deposition into water bodies. *In* Field boundary habitats: implications for weed, insect and disease management. Topics in Canadian weed science, volume 1 (A.G. Thomas, Ed.). Saint-Anne-de-Bellevue, Québec: Canadian Weed Science Society – Société canadienne de malherbologie. p. 201-212.

Working Group on Synergy in Complex Mixtures, Harvard School of Public Health (HSPH). 1986. Synergy: positive interaction among chemicals in mixtures. *Journal of Pesticide Reform*, Summer.

Worsham, A.D. 1991. Role of cover crops in weed management and water quality. *In* W.L. Hargrove (ed.) Cover crops for clean water. Soil and Water Conservation Society, Ankeny, Iowa. p. 141-145.

Wrage, N., G.L. Velthof, M.L. van Beusichem et O. Oenema. 2001. Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide. *Soil Biology and Biochemistry* 33: 1723-1732.

Yates, A.G., R.C. Bailey et J.A. Schwindt. 2006. No-till cultivation improves stream ecosystem quality. *Journal of Soil and Water Conservation* 6(1): 14-19.

Zentner, R.P., B.G. McConkey, C.A. Campbell, F.B. Dyck et F. Selles. 1996. Economics of conservation tillage in the semiarid prairie. *Canadian Journal of Plant Science* 76: 697-705.

Zentner, R.P., D.D. Wall, C.N. Nagy, E.G. Smith, D.L. Young, P.R. Miller, C.A. Campbell, B.G. McConkey, S.A. Brandt, G.P. Lafond, A.M. Johnston et D.A. Derksen. 2002. Economics of crop diversification and soil tillage opportunities in the Canadian Prairies. *Agronomy Journal* 94: 216-230.

Zhao, S.L., S.C. Gupta, D.R. Huggins et J.F. Moncrief. 2001. Tillage and nutrient source effects on surface and subsurface water quality at corn planting. *Journal of Environmental Quality* 30: 998-1008.

Zhu, Y., R.H. Fox et J.D. Toth. 2003. Tillage effect of nitrate leaching measured by pan and wick lysimeters. *Soil Science Society of America Journal* 67(5): 1517-1523.

## ANNEXES

### Annexe 1 : Les PGB du Programme national de gérance agroenvironnementale (PNGA) et les six catégories de PGB retenues pour l'étude.

No	DESCRIPTION DU GROUPE	CODE	DESCRIPTION DE LA PGB	CATÉGORIE*
01	Amélioration des installations de stockage et de manutention	101	Entreposage accru pour respecter les restrictions d'épandage l'hiver (y compris l'entreposage satellite)	EE
		102	Amélioration des installations afin de prévenir les risques de contamination de l'eau (fuites, déversement)	EE
		103	Couvercle pour l'entreposage du lisier servant à réduire les odeurs et les émissions de gaz à effet de serre	EE
		104	Systèmes de confinement du fumier solide (incluant des couvercles)	EE
		105	Évaluation et surveillance de l'infrastructure existante d'entreposage du fumier	EE
02	Traitement des fumiers	201	Systèmes d'épuration des déchets, systèmes de récupération des éléments nutritifs	EE
03	Application de fumiers	301	Spécialisation/modification de l'équipement pour améliorer l'épandage	F
04	Amélioration des bâtiments	401	Meilleure efficacité des dispositifs d'abreuvement du bétail ainsi que des systèmes d'épuration afin de réduire l'utilisation de l'eau et le volume des fumiers	EE
05	Contrôle du ruissellement de la zone des bâtiments	501	Déviation en amont autour de la ferme; protection en aval (puisards, bassins de retenue, marais artificiels)	AP
06	Relocalisation des aires de confinement du bétail et des installations horticoles	601	Déplacement des installations pour le bétail comme les corrals, les enclos et les lieux d'hivernage éloignés des zones riveraines	EE
		602	Déplacement des installations pour l'horticulture comme les serres et les pépinières en retrait des zones riveraines	EE
07	Gestion des aires d'hivernage	701	Installation de brise-vents	AP
		702	Abris portatifs et brise-vents	AP
		703	Systèmes d'eau mobiles : systèmes d'eau été-hiver (solaire, vent, pipeline, etc.)	AP
		704	Amélioration de l'accès au champ : mise à niveau des voies d'accès	AP
		705	Modification des clôtures	AP
08	Gestion des produits et des déchets	801	Amélioration de l'entreposage et de la manutention à la ferme des engrais, des produits pétroliers et des pesticides	EE

No	DESCRIPTION DU GROUPE	CODE	DESCRIPTION DE LA PGB	CATÉGORIE*
		802	Amélioration de l'entreposage, de la manutention et de l'évacuation des déchets agricoles (animaux morts, fruits et légumes écartés, déchets de bois)	EE
		803	Compostage des déchets agricoles (p. ex., fruits, légumes, bois, résidus de paille)	EE
09	Gestion des puits	901	Recouvrement hermétique de la partie supérieure des anciens puits d'eau	AP
		902	Protection des puits d'eau existants de la contamination de surface	AP
10	Gestion de la zone riveraine	1001	Systèmes d'abreuvement en retrait : alimentation par gravité, pompe et systèmes de pipeline	EE
		1002	Établissement de zones tampons : fourrages, arbustes, arbres – plantation, désherbage	AP
		1003	Clôtures servant à gérer le pâturage et à améliorer la condition/fonction riveraine	AP
		1004	Restauration ou établissement de pâturages naturels : fourrage, arbustes et arbres indigènes	AP
		1005	Gestion du pâturage dans les hautes-terres environnantes : clôtures transversales	AP
		1006	Amélioration des passages de cours d'eau	AP
11	Structure de contrôle de l'érosion (zone riveraine)	1101	Travaux de construction dans les zones riveraines : terrasses de contour, stabilisation des ravins, consolidation des berges, systèmes d'entrée de surface et amélioration des systèmes d'infiltration, contrôle par empiétements successifs	AP
12	Structure de contrôle de l'érosion (zone non riveraine)	1201	Travaux de construction dans les zones non riveraines : terrasses de contour, stabilisation des ravins, consolidation des berges, systèmes d'entrée de surface et amélioration des systèmes d'infiltration, contrôle par empiétements successifs, brise-vents	AP
13	Gestion des sols à risque	1301	Fourrage ou établissement annuel de clôtures pour les sols à risque (p. ex., culture en bandes, voies d'eau gazonnées, plantes fourragères vivaces sur des sols très érodables ou salins)	CV et AP
		1302	Paillage	TS
		1303	Gestion du pâturage dans les zones d'érosion critiques qui ne sont pas associées à des zones riveraines : clôtures transversales	AP
14	Amélioration de systèmes culturaux	1401	Modification de l'équipement pour l'ensemencement et des instruments aratoires de post-levé afin de limiter les perturbations liées à l'ensemencement et à l'ajout d'engrais	TS
		1402	Ramasseurs de balles et éparpilleurs de paille installés sur les moissonneuses-batteuses actuelles	TS
		1403	Applications agricoles de précision : collecte de renseignements par GPS, directives d'utilisation du GPS, contrôleurs manuels pour l'épandage d'engrais à taux variables	Conservation de précision



No	DESCRIPTION DU GROUPE	CODE	DESCRIPTION DE LA PGB	CATÉGORIE*
15	Culture de couverture	1501	Établissement d'une culture de couverture non-économique	CV
		1502	Modifications d'équipements pour l'ensemencement des cultures de couverture (p. ex., cultures intercalaires)	CV
16	Amélioration de la lutte antiparasitaire	1601	Modification de l'équipement pour améliorer l'épandage de pesticides	PC
		1602	Collecte d'information et surveillance	PC
		1603	Contrôle des biopesticides	PC
		1604	Pratiques de lutte culturale	PC
		1605	Réservoirs d'eau mobiles	PC
17	Recouvrement des nutriments des eaux usées	1701	Recyclage des eaux usées provenant des serres de façon à récupérer les éléments nutritifs	F
18	Gestion de l'irrigation	1801	Modification/amélioration de l'équipement d'irrigation pour utiliser l'eau plus efficacement	AP
		1802	Équipement afin de prévenir le refoulement de l'eau d'irrigation altérée dans les sources d'eau	AP
		1803	Amélioration des galeries d'infiltration et des systèmes de prise d'eau pour l'irrigation	AP
19	Installation de brise-vents	1901	Installation de brise-vents pour les fermes, les installations de bétail, les mares-réservoirs capte-neige, l'amélioration de l'habitat faunique et les champs	AP
		1902	Arbres requis pour l'installation de brise-vents	AP
20	Contrôle des plantes exotiques et nuisibles	2001	Approches intégrées (culturales, mécaniques et biologiques) pour le contrôle des plantes nuisibles	PC
21	Amélioration des habitats naturels et de la biodiversité	2101	Bandes-tampons : végétation indigène	AP
		2102	Systèmes d'abreuvement éloignés	EE
		2103	Amélioration des systèmes de pâturage : clôtures transversales	EE
		2104	Installation de brise-vents pour la faune	AP
		2105	Amélioration des passages de cours d'eau	AP
		2106	Gestion des champs de foin pour favoriser la survie de la faune	CV
22	Espèces à risque	2201	Systèmes d'abreuvement éloignés	EE
		2202	Amélioration des systèmes de pâturage : clôtures transversales	AP
		2203	Établissement d'espèces de plantes	AP
		2204	Développement et déplacement de l'infrastructure	Autres
23	Protection de la faune	2301	Bandes tampons fourragères	AP
		2302	Clôtures pour la protection des aliments entreposés, du bétail, des récoltes à valeurs ajoutées, des systèmes d'irrigation goutte-à-goutte ainsi que d'autres activités agricoles	Autre

No	DESCRIPTION DU GROUPE	CODE	DESCRIPTION DE LA PGB	CATÉGORIE*
		2303	Systèmes et dispositifs pour effrayer et éloigner	Autre
24	Planification de la gestion des nutriments	2401	Services de consultation pour la mise au point de plans de gestion des éléments nutritifs et d'outils d'aide à la décision et à la planification	F
25	Planification de la gestion intégrée antiparasitaire	2501	Services de consultation pour la mise au point d'un plan de lutte antiparasitaire et d'outils d'aide à la décision et à la planification	PC
26	Planification de la gestion des pâturages	2601	Services de consultation pour la planification de la gestion des parcours et des pâturages; mise au point d'outils d'aide à la décision et à la planification	EE
27	Planification du contrôle de l'érosion et de la salinité des sols	2701	Services de consultation pour la planification de la lutte contre l'érosion du sol; mise au point d'outils d'aide à la décision et à la planification	AP
28	Planification de l'amélioration de la biodiversité	2801	Services de consultation pour la planification de l'amélioration de l'habitat, la gérance des espèces en péril et/ou la prévention des dommages causés par la faune sur un territoire agricole; mise au point d'outils d'aide à la décision et à la planification	Autre
29	Planification de la gestion de l'irrigation	2901	Services de consultation pour l'amélioration de l'efficacité de l'utilisation de l'eau en provenance des systèmes d'irrigation existants; mise au point d'outils d'aide à la décision et à la planification	AP
30	Évaluation de l'état de la zone riveraine	3001	Services de consultation pour l'évaluation de l'état des rives; mise au point d'outils d'aide à la décision et à la planification	AP

Annexe 2 : Impacts potentiellement négatifs et positifs pour divers scénarios de rotation.

Légende :	(R) Recommandé	(P) Prudence	(D) Déconseillé
-----------	-------------------	-----------------	--------------------

Culture prévue	Culture précédente						
	Maïs	Soya	Fourrages	Céréales de printemps	Céréales d'automne	Haricots comestibles	Canola
Maïs	D •baisse de rendement •chrysomèle des racines du maïs •pyrale du maïs •limaces pouvant causer des dommages en semis direct	R •hanneton européen (sur les sols à texture légère)	R •vers fil-de-fer après un gazon de graminées	P •résidus lourds en semis direct pouvant retarder l'assèchement et le réchauffement du sol	P •résidus lourds en semis direct pouvant retarder l'assèchement et le réchauffement du sol	R	R •risque de répercussions négatives sur la croissance
Soya	R •limaces pouvant causer des dommages en semis direct	P •baisse de rendement •nématode à kyste du soya •maladies des racines •dégradation du sol	P •échappées de mauvaises herbes parfois difficiles à maîtriser •limaces pouvant réduire le peuplement	R •limaces et retard dans les semis pouvant nuire au semis direct	R •limaces et retard dans les semis pouvant nuire au semis direct •tétranyques suivant la culture couvre-sol de trèfle	P •moisissure blanche •dégradation du sol •nématode à kyste du soya (parfois)	D •moisissure blanche •risque de répercussions négatives sur la croissance
Fourrages	R •résidus lourds pouvant interférer avec la mise en place de la semence en semis direct	R •risque de rémanence d'herbicides	D •risque d'augmentation des maladies des fourrages •autotoxicité de la luzerne	R	R	R	R

Culture prévue	Culture précédente						
	Maïs	Soya	Fourrages	Céréales de printemps	Céréales d'automne	Haricots comestibles	Canola
Céréales de printemps	R	R	R •vers fil-de-fer après des gazons de graminées	P •maladies des feuilles •baisse de rendement	P •maladies des feuilles •baisse de rendement	R	R •risque d'un léger ralentissement de la croissance
Céréales d'automne	D •risque accru de fusariose	R •hanneton européen (sur les sols à texture légère)	R •échappées de mauvaises herbes •croissance réduite en semis direct avec chiendent	D •piétin-échaudage •maladies des feuilles	D •piétin-échaudage •maladies des feuilles •baisse de rendement	R	P •risque d'un léger ralentissement de la croissance
Haricots comestibles	R	P •moisissure blanche •pourritures des racines •nématode à kyste du soya (parfois)	R •échappées de mauvaises herbes •limaces en semis direct	R •limaces pouvant causer des dommages en semis direct	R •limaces pouvant causer des dommages en semis direct	D •baisse de rendement •pourritures des racines •moisissure blanche •structure du sol	D •moisissure blanche •risque de répercussions négatives sur la croissance
Canola	P •limaces pouvant causer des dommages en semis direct •récolte trop tardive pour les semis de canola d'automne •risque de rémanence des herbicides	D •moisissure blanche •risque de rémanence des herbicides	R •limaces pouvant réduire le peuplement	R	R •limaces pouvant causer des dommages en semis direct	P •moisissure blanche	D •moisissure blanche •jambe noire •pourritures des racines •baisse de rendement •risque de rémanence des herbicides

Légende :	(R) Recommandé	(P) Prudence	(D) Déconseillé
-----------	-------------------	-----------------	--------------------

Tiré du MAAARO, 2002

