

**Développement de la production et de  
la compétitivité des grains  
(alimentaire) de spécialité au Québec**

**Rapport final**

---

Rapport présenté à :  
Les Moulins de Soulanges



Institut de recherche  
et de développement  
en agroenvironnement

Projet IRDA # : 901022

Par :

Luc Belzile, agr., économiste, M.Sc.  
Jingran LI, économiste, M.Sc.  
Frédéric Pelletier, ing., M.Sc.  
Stéphane Godbout, ing., P. Eng., Ph.D.  
et agr.

15 février 2014

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



#### Notre mission

L'IRDA a pour mission de réaliser des activités de recherche, de développement et de transfert en agroenvironnement visant à favoriser l'innovation en agriculture, dans une perspective de développement durable

#### Notre vision

En 2016, l'IRDA est reconnu à l'échelle canadienne comme un chef de file en recherche, développement et transfert en agroenvironnement. L'IRDA se démarque par son approche intégrée et par le dynamisme de ses partenariats qui lui permettent d'anticiper les problèmes et de proposer des solutions novatrices répondant aux besoins des agriculteurs et de la société.

Le rapport peut être cité comme suit :

Belzile, L., J. Li, F. Pelletier et S. Godbout. 2014. Développement de la production et de la compétitivité des grains (alimentaire) de spécialité au Québec. Rapport final. IRDA. 70 pages.

**Développement de la production et de  
la compétitivité des grains  
(alimentaire) de spécialité au Québec**

**Rapport final**

Rapport présenté à :

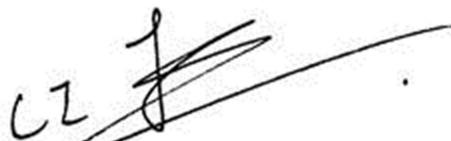
Les Moulins de Soulanges  
465 chemin Saint-Philippe  
Saint-Polycarpe, Québec, J0P 1X0

Préparé par :



---

Luc Belzile, agr., économiste, M.Sc.  
IRDA



---

Jingran LI, économiste, M.Sc.  
IRDA



---

Frédéric Pelletier, ing., M.Sc.  
IRDA



---

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

15 février 2014

## Collaborateurs au projet

|                   |  |
|-------------------|--|
| Robert Beauchemin | Président, Les Moulins de Soulanges                      |
| Sophie Martel     | Agronome, Meunerie Milanaise                             |
| Élisabeth Vachon  | Agronome, Les Moulins de Soulanges                       |
| Anne Vanasse      | Agronome, Ph.D., Professeure titulaire, Université Laval |

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

Luc Belzile  
Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)  
2700, rue Einstein  
Québec (Québec) G1P 3W8

Téléphone : 418 643-2380, 630

Courriel : [luc.belzile@irda.qc.ca](mailto:luc.belzile@irda.qc.ca)

## Remerciements :

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à une aide financière accordée par le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec dans le cadre du Programme de soutien aux stratégies sectorielles de développement. Nous tenons aussi à remercier les entreprises agricoles ainsi que leurs conseillers pour leur participation à ce projet.

## Résumé

Dans la production de blé, les agriculteurs québécois se voient offrir plusieurs systèmes de production qui ont chacun des caractéristiques agronomiques et économiques particulières. Globalement, ces systèmes peuvent être divisés en deux catégories : l'une offre de produire un grain non différencié aux marges bénéficiaires plus faibles, mais aux rendements plus élevés et l'autre, inversement, cible des marchés niches et présente des marges bénéficiaires plus élevées, mais des rendements agronomiques moindres. Dans ce contexte, les producteurs et les autres membres de la chaîne de valeur de cette production requièrent de l'information sur les performances économiques et environnementales de chaque système pour prendre leur décision de gestion.

Ce projet visait à fournir cette information de façon intégrée. L'approche a combiné l'analyse de cycle de vie pour mesurer la performance environnementale, le calcul des marges de production pour ce qui est de la performance économique et enfin, l'éco-efficience pour intégrer les deux performances.

L'ensemble de l'analyse s'est fondé sur les données technico-économiques de 74 parcelles de production de blé réparties entre quatre systèmes de production, soit l'Agriculture Raisonnée®, ainsi que les productions biologique, conventionnelle et intensive. Les parcelles d'essai étaient distribuées dans plusieurs régions du Québec et parmi plusieurs cultivars de blé, autant dans le blé de printemps que dans le blé d'automne.

Pour chaque parcelle, les données des essais ont été recueillies, et ce, autant au regard des intrants de production que des opérations culturales. Ces données ont permis de calculer la marge de production en plus de mesurer quatre impacts environnementaux à partir de l'analyse de cycle de vie, soit les émissions de gaz à effet de serre (GES), le potentiel d'acidification, le potentiel d'eutrophisation et l'utilisation des pesticides. À partir de ces mesures de performance économiques et environnementales, l'éco-efficience a pu être évaluée à l'aide de l'analyse par enveloppement des données. Cette méthode quantitative permet d'estimer l'éco-efficience globale, ce qui permet de faire un meilleur diagnostic que des indicateurs d'éco-efficience partielle.

Les résultats de l'éco-efficience partielle comme de l'éco-efficience globale incluant les 74 parcelles montrent que le système de production biologique est plus performant quand on intègre les résultats économiques et environnementaux. Cela s'explique par l'absence de pesticides, évidemment, mais aussi par une utilisation plus rationnelle des fertilisants par unité de rendement et par unité de marge de production. Toutefois, les résultats des parcelles du système biologique affichent une grande variabilité et il existe, dans ce système comme dans les autres, des pratiques dommageables pour l'éco-efficience.

Les trois autres systèmes de production, qui incluaient les données de 59 parcelles, ont fait l'objet d'une évaluation distincte et supplémentaire de l'éco-efficience afin de mieux cerner leurs performances respectives. Il en est ressorti que le système AR sans herbicide en pré-semis offre la meilleure éco-efficience, mais lorsque ce système inclut des herbicides en pré-semis, son éco-efficience est semblable au système conventionnel.

L'éco-efficience doit être analysée en tenant compte d'un possible effet rebond où un meilleur pointage d'éco-efficience apparaîtrait en même temps que de plus grands impacts environnementaux. Ce facteur a été vérifié dans la présente étude et l'effet rebond en question ne s'est pas manifesté, car les pointages d'éco-efficience étaient en relation négative avec les impacts environnementaux. Toutefois, ce constat est moins fort dans le cas des pesticides et une nouvelle analyse utilisant un plus grand nombre d'observations aiderait à mieux évaluer cette facette.

## Table des matières

|  |      |
|--|------|
| Résumé.....  | v    |
| Table des matières.....  | vii  |
| Liste des figures.....   | viii |
| Liste des tableaux.....  | ix   |
| 1 Introduction et mise en contexte .....   | 10   |
| 2 Objectifs .....  | 12   |
| 3 Littérature.....   | 13   |
| 4 Méthodologie.....  | 15   |
| 4.1 Données technico-économiques expérimentales.....   | 15   |
| 4.2 Analyse environnementale .....   | 18   |
| 4.2.1 Vue d'ensemble de l'analyse.....   | 18   |
| 4.2.2 Opérations culturales .....  | 18   |
| 4.2.3 Fertilisants .....   | 20   |
| 4.2.4 Bilan carbone et azote.....  | 20   |
| 4.2.5 Pertes d'azote .....   | 20   |
| 4.2.6 Pertes de phosphore.....   | 21   |
| 4.2.7 Pesticides et régulateur de croissance .....   | 22   |
| 4.2.8 Catégories d'impacts.....  | 22   |
| 4.3 Éco-efficience.....  | 23   |
| 4.3.1 Marge de production .....  | 23   |
| 4.3.2 Éco-efficience partielle .....   | 26   |
| 4.3.3 Éco-efficience globale par l'AED .....   | 26   |
| 5 Résultats .....  | 29   |
| 5.1 Description de l'échantillon.....  | 29   |
| 5.2 Analyse du cycle de vie .....  | 31   |
| 5.3 Éco-efficience.....  | 35   |
| 5.3.1 Marge de production .....  | 35   |
| 5.3.2 Éco-efficience partielle .....   | 38   |
| 5.3.3 Éco-efficience globale par AED.....  | 39   |
| 6 Discussion .....   | 49   |
| 7 Conclusion.....  | 51   |
| 8 Références.....  | 53   |
| Annexe A    Références technico-économiques relatives au calcul de la marge<br>de production ..... | 57   |
| Annexe B    Exemple numérique de la programmation linéaire.....                                    | 67   |

## Liste des figures

|          |  |    |
|----------|--|----|
| Figure 1 | Évolution du prix de différentes denrées agricoles au Québec, 2003-2012.....   | 10 |
| Figure 2 | Mesure de l'éco-efficience par l'AED.....  | 27 |
| Figure 3 | Émissions de GES (kg CO <sub>2</sub> e/t) en fonction de la dose d'azote épandue (kg N/ha) .....   | 33 |
| Figure 4 | Acidification (kg SO <sub>2</sub> e/t) en fonction de la dose d'azote épandue (kg N/ha) .....  | 34 |
| Figure 5 | Eutrophisation (kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> e/t) en fonction de la dose de phosphore épandu (kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha)..... | 34 |
| Figure 6 | Pointages d'éco-efficience et émissions de GES .....   | 45 |
| Figure 7 | Pointages d'éco-efficience et potentiel d'acidification .....  | 46 |
| Figure 8 | Pointages de l'éco-efficience et du potentiel d'eutrophisation.....  | 47 |
| Figure 9 | Pointages d'éco-efficience et utilisation de pesticides .....  | 48 |

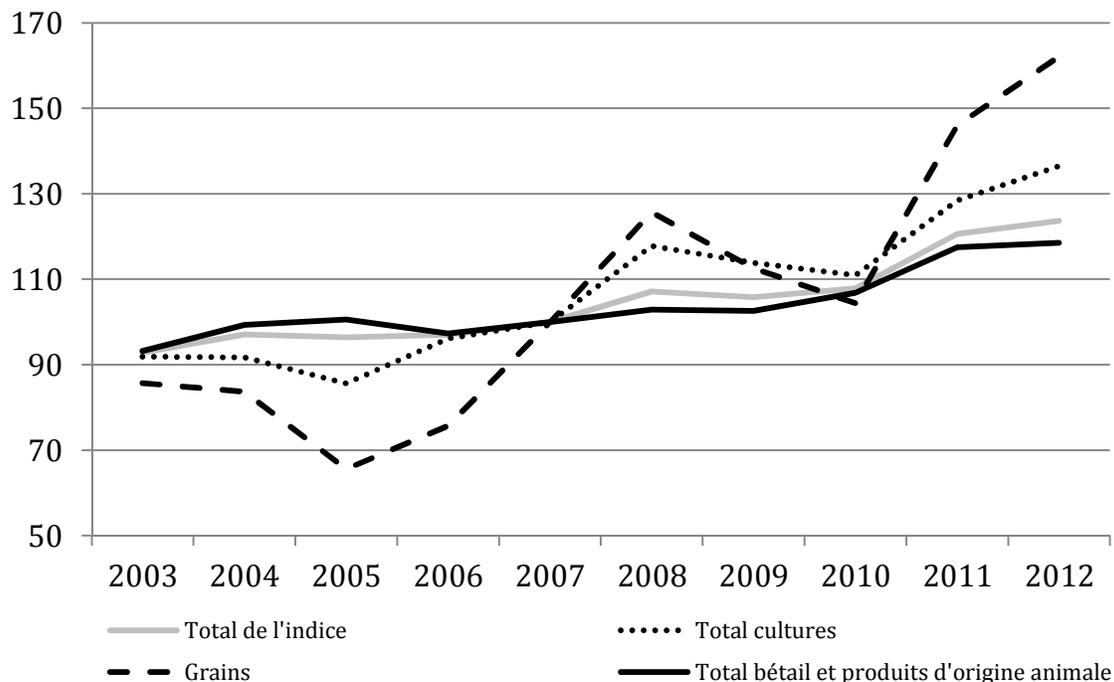
## Liste des tableaux

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Tableau 1  | Description des protocoles des systèmes de production de blé d'automne .....   | 16 |
| Tableau 2  | Description des protocoles des systèmes de production de blé de printemps.....   | 17 |
| Tableau 3  | Caractéristiques des fertilisants .....  | 20 |
| Tableau 4  | Pertes de NO <sub>3</sub> dans les eaux souterraines en fonction de la texture du sol.....   | 21 |
| Tableau 5  | Facteurs d'émissions pour les pesticides et le régulateur de croissance.....   | 22 |
| Tableau 6  | Calcul de la marge de production.....  | 24 |
| Tableau 7  | Grille des prix en fonction des systèmes de production et des teneurs en protéine et en DON.....   | 25 |
| Tableau 8  | Caractéristiques et distribution de l'échantillon.....   | 30 |
| Tableau 9  | Doses d'azote et de phosphore épandues pour les quatre systèmes de production (moyenne (min – max) et nombre de parcelles fertilisées par système) ..... | 31 |
| Tableau 10 | Moyenne des émissions de GES par système de production (kg CO <sub>2</sub> e/t).....   | 32 |
| Tableau 11 | Moyenne des émissions de GES par système de production (kg CO <sub>2</sub> e/ha) .....   | 32 |
| Tableau 12 | Répartition des pratiques de travail du sol adoptées dans les quatre systèmes de production .....  | 32 |
| Tableau 13 | Moyenne des émissions par tonne produite en fonction de la catégorie d'impact et de la région de culture .....   | 33 |
| Tableau 14 | Moyenne des émissions par hectare en culture en fonction de la catégorie d'impact et de la région de culture .....                                       | 33 |
| Tableau 15 | Résultats de la marge de production par système de production .....  | 35 |
| Tableau 16 | Coût de fertilisation par système de production .....  | 36 |
| Tableau 17 | Résultats de la marge de production par type de blé.....   | 37 |
| Tableau 18 | Éco-efficacité partielle par système de production et classement .....   | 38 |
| Tableau 19 | Éco-efficacité globale par système de production.....  | 39 |
| Tableau 20 | Performances d'éco-efficacité des extrêmes dans le système biologique.....   | 40 |
| Tableau 21 | Éco-efficacité globale par système de production, sauf le biologique .....   | 42 |
| Tableau 22 | Analyse de l'éco-efficacité et des excédents d'impacts environnementaux .....  | 43 |
| Tableau 23 | Moyenne des émissions de GES par groupe (kg CO <sub>2</sub> e/ha).....   | 43 |
| Tableau 24 | Moyenne des émissions par hectare en culture en fonction de la catégorie d'impact et du groupe .....   | 43 |

## 1 Introduction et mise en contexte

La production de blé de consommation humaine a évolué dans un environnement en mutation dans les dernières années au Québec. En premier lieu, le contexte de mise en marché a subi plusieurs changements, ce qui a requis des entreprises évoluant dans le secteur de faire preuve d'adaptation. Aussi, l'évolution du prix des grains à l'échelle nord-américaine a subi une forte hausse dans la deuxième moitié des années 2000 pour se maintenir depuis à des niveaux relativement élevés. En effet, comme il est possible de le constater à la figure 1, l'indice des prix des produits agricoles (IPPA) a crû de façon beaucoup plus prononcée dans le cas des grains que dans ceux de l'agriculture en général, l'ensemble des cultures ou encore, le bétail et les produits d'origine animale.

### Indice des prix des produits agricoles au Québec (2007=100), 2003-2012



**Figure 1** Évolution du prix de différentes denrées agricoles au Québec, 2003-2012

Source : Statistiques Canada, Tableau 002-0069 - Indice des prix des produits agricoles (IPPA) annuel (2007=100)

La production de masse de grains non différenciés offrant des niveaux de prix qui n'avaient pas été vus depuis près de 15 ans, les producteurs étaient alors incités à produire selon des systèmes leur imposant moins d'exigences agronomiques et phytosanitaires. Dans ce contexte, les entreprises proposant des systèmes de production spécialisés, visant des niches de marché bien précises, voyaient leur approvisionnement compromis. En contrepartie, ces entreprises répondent à une demande toujours présente pour des produits agroalimentaires différenciés, comme des farines issues de systèmes de production de blé faisant moins appel aux intrants de synthèse.

Les Moulins de Soulanges (MDS) et La Milanaise font partie de ces entreprises qui doivent veiller à la régularité de leur approvisionnement afin de répondre à la demande de leurs clients. Ces deux entreprises préparent des farines issues du blé produit respectivement selon les systèmes d'agriculture raisonnée® (AR) et de production biologique. Depuis plusieurs années déjà, ces deux entreprises peuvent compter sur un réseau d'entreprises agricoles leur fournissant du blé produit selon des pratiques agronomiques bien précises relativement aux systèmes AR et biologique. Or, en raison de la situation des marchés dépeinte précédemment, ces filières doivent continuellement mettre en valeur les avantages économiques et environnementaux des systèmes proposés. Cet exercice doit se faire à la fois du côté des clients et des producteurs agricoles. Dans le cadre du présent projet de recherche, l'analyse s'est concentrée du côté de la production.

Afin de mettre en valeur les aspects économiques et environnementaux des systèmes de production de blé AR et biologique, l'équipe de recherche de l'IRDA a proposé une approche intégrant les deux enjeux. Cette approche se fonde sur deux méthodes quantitatives qui visent à mesurer, optimiser et comparer la performance économique et environnementale des systèmes. Premièrement, sur le plan environnemental, l'analyse de cycle de vie (ACV) est utilisée pour mesurer les impacts environnementaux des systèmes. Ces impacts comprennent autant les émissions de gaz à effet de serre (GES) que l'eutrophisation, l'acidification et l'utilisation des pesticides. En deuxième lieu, ces impacts environnementaux sont intégrés dans un ratio d'éco-efficience, lequel est mesuré en utilisant l'analyse par enveloppement des données (AED).

L'éco-efficience consiste simplement à mesurer le ratio entre la performance économique (marge de production) au numérateur et la performance environnementale (impacts environnementaux selon l'ACV) au dénominateur. Pour chaque système de production, une marge de production est calculée en fonction des intrants de production, des opérations culturales et du prix obtenu pour chaque type de blé. Ce prix varie d'ailleurs selon la teneur en toxines et en protéines. Une fois l'ensemble de résultats de l'ACV et de la marge de production sont obtenus, ceux-ci peuvent être intégrés pour obtenir l'éco-efficience (EE) de chaque système. Cependant, puisque le ratio d'éco-efficience est global, avec un élément au numérateur et plusieurs éléments au dénominateur, la technique de l'analyse par enveloppement des données (AED) est utilisée pour mesurer les pointages d'éco-efficience.

## 2 Objectifs

L'ensemble des objectifs du projet se présentaient comme suit :

1. Au moment de son lancement en 2006, Les Moulins de Soulanges ont démarré avec un approvisionnement de 1200 tonnes. L'objectif est de faire passer l'approvisionnement en blé du Québec en Agriculture Raisonnée® de 25 000 tonnes (récolte 2012) à 50 000 tonnes (récolte 2015). Pour la production biologique, faire passer les approvisionnements en grains du Québec de 3 500 tonnes (récolte 2012) à 7 000 tonnes (récolte 2015).
2. Valider l'applicabilité des recherches agronomiques dans les conditions québécoises en fonction de la rentabilité de la production et de la qualité des grains.
3. Mesurer les impacts économiques et environnementaux comparatifs des pratiques agricoles en Agriculture Raisonnée®, conventionnelle et biologique en fonction de leur rentabilité respective.
4. Les attributs de qualité des farines de spécialité proviennent de leurs définitions agronomiques. À partir de la recherche et des connaissances existantes, assurer le transfert technologique pour que la production de grains de spécialité en émergence puisse suivre le développement de marché des promoteurs.

Le mandat confié à l'équipe de recherche de l'IRDA visait à répondre directement et principalement aux objectifs 2 et 3. Ce faisant, les résultats et les conclusions de recherche présentés dans ce rapport permettent d'outiller les entreprises MDS et La Milanaise pour répondre ensuite aux objectifs 1 et 4 du projet.

### 3 Littérature

Cette section présente l'essentiel de la littérature sur laquelle repose l'approche méthodologique utilisée dans le projet. En ce sens, il ne s'agit pas d'une revue de littérature systématique; ce genre d'exercice ne comptant pas dans les objectifs de ce projet. Toutefois, Belzile (2009) a réalisé une revue de littérature complète sur les différentes approches d'intégration de l'ACV dans l'analyse économique qui répondra aux besoins des lecteurs qui souhaitent en connaître davantage sur le sujet. Dans le cadre du présent projet cependant, l'objectif de cette section est de présenter les principaux éléments de la littérature qui militent en faveur du choix méthodologique.

Le concept d'éco-efficience a pris naissance suite à une large réflexion opérée par le milieu des affaires au sein du Conseil mondial des entreprises pour le développement durable (World Business Council for Sustainable Development – WBCSD). Cette réflexion a abouti à deux rapports du WBCSD qui devaient poser les jalons de cette approche (WBCSD 2000a, 2000b). Le WBCSD définissait alors l'éco-efficience comme un concept qui est « atteint par l'offre de biens et services à un prix compétitif, qui satisfassent les besoins humains et apportent de la qualité de vie, tout en réduisant progressivement les impacts écologiques et l'usage des ressources tout au long du cycle de vie ». Sur le plan pratique, le WBCSD proposait un ensemble d'indicateurs d'éco-efficience qui consistaient en différents ratios où une mesure de performance économique, au numérateur, est mise en rapport avec une mesure de performance environnementale, au dénominateur (ex. : ventes nettes/émissions de GES). Toutefois, les indicateurs proposés alors par le WBCSD souffraient tous de la même lacune méthodologique, c'est-à-dire qu'ils étaient tous partiels plutôt que globaux. Un ratio d'éco-efficience partiel mesure le rapport entre un seul indicateur de performance économique (ex. : ventes nettes) et un seul indicateur de performance environnementale (émissions de GES). Il faudrait alors parler de productivité environnementale plutôt que d'efficacité environnementale, puisque la performance économique est mise en parallèle avec un seul indicateur environnemental. Cette mesure de l'éco-efficience est alors dite « partielle », car elle ne tient compte que d'un impact environnemental à la fois et alors, aucune optimisation ne peut être faite sur les poids relatifs des différents impacts environnementaux lorsque ceux-ci sont multiples.

En revanche, un ratio d'éco-efficience global tient compte, au moins, d'un indicateur économique par rapport à plusieurs indicateurs environnementaux. Cette mesure respecte la notion d'efficacité économique puisqu'un indicateur économique est mis en rapport avec un ensemble d'impacts environnementaux, lesquels on cherche à minimiser globalement par unité économique. Cette distinction entre l'éco-efficience partielle et l'éco-efficience globale s'inspire de celle qui est aussi faite entre la productivité et l'efficacité, respectivement. Ces notions de productivité et d'efficacité ont été définies et clarifiées dans les travaux fondamentaux de Farrel (1957). Par la suite, Charnes, Cooper et Rhodes (1978) ont développé une approche d'estimation non paramétrique qui permettait de mesurer adéquatement l'efficacité économique, soit l'analyse par enveloppement des données (AED).

L'AED a été largement utilisée dans les trois dernières décennies à l'échelle internationale, dans différents secteurs de l'économie, et plusieurs centaines d'articles scientifiques ont déjà été publiés à cet effet (Emrouznejad et al., 2008; Liu et al., 2013a; 2013b). En agriculture au Québec, Cloutier (1993) l'a appliquée pour mesurer l'efficacité technique relative des entreprises laitières et Belzile et Li (2013) ont fait de même avec un échantillon d'entreprises québécoises de production de pommes. Plusieurs autres applications de l'AED

ont été faites relativement à l'efficacité technique en agriculture, mais ici, l'intérêt se porte particulièrement sur les applications de l'AED pour mesurer l'éco-efficience en agriculture.

En ce sens, Kuosmanen et Kortelainen (2005), Picazo-Tadeo et al. (2011) de même que Iribarren et al. (2010) ont proposé l'AED pour agréger plusieurs impacts environnementaux et les intégrer dans un indicateur d'éco-efficience qui tient aussi compte de mesures de performances économiques. Or, avant d'approfondir sur les applications en agriculture où l'éco-efficience est mesurée à l'aide de l'AED, il faut préciser que dans le présent projet, l'analyse du cycle de vie (ACV) a été privilégiée pour mesurer les impacts environnementaux.

L'ACV est une méthode d'évaluation environnementale reconnue mondialement permettant d'évaluer les risques environnementaux associés à un produit ou à un mode de gestion. Au Québec, elle est mentionnée dans le cadre de la loi sur le développement durable, et le commissaire au développement durable du Bureau du vérificateur général du Québec spécifie qu'il vérifiera si une ACV des produits, procédés et services est effectuée par les entités autorisées. De plus, l'ACV est une méthode préconisée dans le cadre des inventaires de gaz à effet de serre. L'ACV consiste à étudier les aspects environnementaux et les impacts potentiels tout au long de la vie d'un produit (du berceau à la tombe), de l'acquisition de la matière première à sa production, à son utilisation et à sa destruction (ISO 14044, 2006).

L'analyse du cycle vie a été utilisée à plusieurs reprises en agriculture pour quantifier et comparer l'impact environnemental de différents modes de production. En production porcine, l'analyse du cycle de vie a été utilisée pour comparer différents modes de production (ex. : conventionnel, conventionnel à valeur ajoutée et biologique), tant au Danemark (Dalgaard, 2007), qu'en France (Basset-Mens et van der Werf, 2005) et en Suède (Cedeberg et Flysjo, 2004a; Eriksson et al., 2005). L'impact de la production laitière conventionnelle et biologique a aussi été étudié à l'aide de l'analyse du cycle de vie en Allemagne (Haas et al., 2001), aux Pays-Bas (Thomassen et al., 2008) et en Suède (Cedeberg et Flysjo, 2004b; Cedeberg et Mattsson, 2000; Sonesson, 2005).

L'analyse du cycle de vie a aussi été utilisée pour évaluer l'impact environnemental de la production de maïs et de soya pour l'alimentation du bétail aux États-Unis (Landis et al., 2007) et de la production de soya au Danemark (Dalgaard et al., 2008). Ahlgren (2004) a comparé les impacts environnementaux du contrôle chimique versus le contrôle mécanique des mauvaises herbes. Mattson et al. (2000) ont comparé l'impact environnemental de la production d'huile végétale au Brésil, en Malaisie et en Suède.

Ainsi, une fois les impacts environnementaux mesurés par ACV, ceux-ci sont intégrés dans l'éco-efficience par l'AED. En agroalimentaire, cette approche a été appliquée pour mesurer l'éco-efficience de la production laitière en Nouvelle-Zélande (Basset-Mens et al. 2009) ainsi que la production de fromage (Sanjuan et al., 2011), de lait (Iribarren et al., 2011) et d'olives (Gómez-Limón et al., 2012) en Espagne. Pour leur part, Breustedt et al. (2011) ont utilisé l'éco-efficience pour comparer les régies de production conventionnelle et biologique dans la production laitière en Allemagne.

## 4 Méthodologie

L'approche méthodologique adoptée dans ce projet est novatrice pour l'agriculture québécoise, bien qu'elle soit bien présente dans la littérature. En effet, il n'y a pas eu encore à ce jour un diagnostic posé sur des systèmes de production agricole au Québec qui intègre en une même analyse la performance économique et environnementale. Or, c'est ce que permet l'approche par l'éco-efficience et dans le projet actuel, cette approche repose sur trois éléments fondamentaux. Premièrement, des données technico-économiques ont pu être exploitées à partir des essais de chacun des quatre systèmes de production, et ce, autant pour le blé de printemps que pour le blé d'automne. Deuxièmement, à partir des données technico-économiques expérimentales, une analyse de cycle de vie a pu être réalisée pour mesurer les impacts environnementaux. Enfin, l'éco-efficience a pu être mesurée à l'aide de l'analyse par enveloppement des données (AED). Au sujet du troisième élément, soit l'éco-efficience, celle-ci a été mesurée par l'AED en intégrant une mesure de la performance économique, calculée par la marge de production, et plusieurs mesures de performance environnementale, soit les résultats d'impacts émanant de l'ACV. Pour chaque parcelle, la marge de production, tout comme les résultats de l'ACV, était calculée à partir des données technico-économiques expérimentales.

### 4.1 Données technico-économiques expérimentales

Pendant l'hiver 2013, les protocoles agronomiques ont été définis pour quatre systèmes de production de blé par une équipe de MDS, La Milanaise et l'Université Laval. Les quatre protocoles sont relatifs aux systèmes AR, biologique, conventionnel et intensif. Les quatre protocoles se distinguent particulièrement au chapitre de la phytoprotection et de la fertilisation et, par voie de conséquence, des opérations culturales.

Avant la saison de production, un total de 24 entreprises agricoles était visé pour participer au projet. Tout d'abord, pour chacun des systèmes AR, conventionnel et intensif, des parcelles devaient être établies chez huit entreprises dans le blé de printemps (BP) et huit autres dans le blé d'automne (BA). À ce groupe de 16 entreprises devaient s'ajouter huit autres entreprises où seraient établies les parcelles de blé biologique. Sur chaque entreprise et pour chaque système, deux répétitions par système étaient prévues, pour un total de 56 parcelles répétées deux fois (8 BA AR, 8 BA conventionnelles, 8 BA intensives, 8 BP AR, 8 BP conventionnels, 8 BP intensifs et 8 biologiques).

Concernant les systèmes AR et biologique, ceux-ci devaient évidemment être définis en fonction des exigences requises par les acheteurs de blé de ces systèmes, MDS et La Milanaise en l'occurrence. Pour les deux autres systèmes, soit le conventionnel et l'intensif, le protocole du premier des deux prévoyait des caractéristiques qui peuvent être retrouvées couramment dans la production de blé de plusieurs producteurs de grandes cultures. Pour ce qui est du protocole du système intensif, il se différenciait du système conventionnel par une fertilisation accrue en engrais azoté, l'utilisation de régulateur de croissance, un traitement herbicide supplémentaire et un traitement fongicide supplémentaire. L'ensemble des protocoles agronomiques sont décrits en détail dans le tableau 1 pour le BA et dans le tableau 2 pour le BP.

Tableau 1 Description des protocoles des systèmes de production de blé d'automne

| Éléments du protocole                      | Systèmes de production    |                               |                                |   |
|--|---------------------------|-------------------------------|--------------------------------|---|
|  | AR                        | Biologique                    | Conventionnel                  | Intensif  |
| <b>Cultivars</b>                           | Zorro, Warthog ou Harvard | Zorro, Warthog ou Harvard     | Zorro, Warthog ou Harvard      | Zorro, Warthog ou Harvard   |
| <b>Traitement de semence</b>               | Non                       | Non                           | Non                            | Non   |
| <b>Taux de semis (grain/m<sup>2</sup>)</b> | 385                       | Selon la régie du producteur  | 385                            | 385   |
| <b>Fertilisation :</b>                     | 120                       | Selon la régie du producteur  | 120                            | 150   |
| <b>automne</b>                             | Aucune                    | (Engrais verts et/ou fumiers) | Aucune                         | 20-P-K  |
| <b>printemps</b>                           | 60N                       |                               | 60N                            | 40N   |
| <b>fin tallage</b>                         | 60N                       |                               | 60N                            | 60N   |
| <b>montaison</b>                           |                           |                               |                                | 30N   |
| <b>Herbicide</b>                           | Aucun                     | Aucun                         | Anti-feuilles larges : Buctril | Anti-graminées (selon dépistage) : PUMA<br>Anti-feuilles larges : Buctril |
| <b>Fongicide</b>                           | Aucun                     | Aucun                         | Fusariose Caramba Z60          | Feuillage : Twinline Z37<br>Fusariose : Caramba Z60                       |
| <b>Régulateur de croissance</b>            | Aucun                     | Aucun                         | Aucun                          | Ethrel Z44  |
| <b>Travail du sol</b>                      | Oui                       | Oui                           | Régie du producteur            | Régie du producteur   |

Tableau 2 Description des protocoles des systèmes de production de blé de printemps

| Éléments du protocole                      | Systèmes de production               |                                      |                                      |   |
|--|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---|
|  | AR                                   | Biologique                           | Conventionnel                        | Intensif  |
| <b>Cultivars</b>                           | Helios, Walton, Snowstar ou Snowbird                                      |
| <b>Traitement de semence</b>               | Non                                  | Non                                  | Oui*                                 | Oui*  |
| <b>Taux de semis (grain/m<sup>2</sup>)</b> | 500                                  | 500                                  | 500                                  | 500   |
| <b>Fertilisation kg/ha N (total)</b>       | 120                                  | Selon régie du producteur            | 120                                  | 120   |
| <b>printemps</b>                           | 60N                                  |                                      | 60N                                  | 60N   |
| <b>fin tallage</b>                         | 60N                                  |                                      | 60N                                  | 40N   |
| <b>montaison</b>                           |                                      |                                      |                                      | 20N   |
| <b>Herbicide</b>                           | Aucun                                | Aucun                                | Anti-feuilles larges : Buctril       | Anti-graminées (selon dépistage) : PUMA<br>Anti-feuilles larges : Buctril |
| <b>Fongicide</b>                           | Aucun                                | Aucun                                |                                      | Feuillage : Twinline Z37  |
|  | Aucun                                | Aucun                                | Fusariose Caramba Z60                | Fusariose : Caramba Z60   |
| <b>Régulateur</b>                          | Aucun                                | Aucun                                | Aucun                                | Ethrel Z44  |
| <b>Travail de sol</b>                      | Oui                                  | Oui                                  | Régie du producteur                  | Régie du producteur   |

## 4.2 Analyse environnementale

### 4.2.1 Vue d'ensemble de l'analyse

L'approche d'analyse du cycle de vie utilisée dans le projet est basée sur un document indiquant les bonnes pratiques pour les inventaires de cycle de vie en agriculture (Nemecek et al., 2012). L'analyse est de type « cradle-to-farm-gate » ou « berceau aux limites de la ferme ».

L'inventaire inclut les émissions de  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  et  $\text{NO}_x$  dans l'air, les pertes P et  $\text{PO}_4^{3-}$  par ruissellement aux eaux de surface, les pertes de  $\text{NO}_3$  et de  $\text{PO}_4^{3-}$  dans les eaux souterraines. Les émissions de gaz à effet de serre ont été comptabilisées pour toutes les opérations culturales, ainsi que pour tous les processus en amont de la ferme, soit la fabrication de la machinerie, du diesel, des fertilisants, des pesticides et des semences.

Les pertes de métaux lourds par ruissellement ainsi que l'accumulation de ces derniers dans le sol n'ont pas été comptabilisées.

### 4.2.2 Opérations culturales

La méthodologie utilisée pour calculer les émissions de GES et le coût de chaque opération culturale est basée sur les équations présentées dans les deux standards suivants produits par l'American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) : Agricultural Machinery Management Data (ASAE D497.7 MAR2011; ASABE, 2011) et Agricultural Machinery Management (ASAE EP496.3 FEB2006; ASABE, 2006).

Une base de données d'équipements développée à partir des caractéristiques des équipements produits par les principaux manufacturiers permet de relier les caractéristiques des équipements (exemple : largeur, masse, puissance nécessaire et valeur à neuf) aux paramètres présentés dans les standards de l'ASABE (exemple : efficacité, vitesse de travail et durée de vie).

La base de données inclut les équipements suivants :

- Boîte à grain (gravité)
- Boîte à grain (avec vis)
- Chargeur frontal pour tracteur
- Charrue simple, ajustable et semi-portée
- Chisel (socs droits)
- Combiné chisel et herse à disque (travail primaire)
- Épandeur d'engrais minéral porté
- Herse à disques lourde - tandem (travail primaire)
- Herse à disques lourde - tandem (travail secondaire)
- Herse étrille ou peigne (dents à ressort)
- Moissonneuse-batteuse (barre de coupe rigide, rigide la toile, flexible ou flexible à toile)
- Pompe à lisier
- Pulvérisateur remorqué
- Rouleau compacteur
- Semoir à céréales en ligne (moins de 2,3 m, entre 2,4 et 3,7 m, 3,8 m et plus ou semis direct)
- Semoir à la volée
- Vibroculteur ou cultivateur (travail secondaire)

La méthodologie consiste à déterminer, en fonction du tracteur et de l'équipement sélectionnés, la puissance nécessaire pour effectuer une opération. La puissance est, par la suite, utilisée pour calculer la consommation de carburant, les coûts variables et fixes ainsi que les émissions de GES associés à une opération.

La valeur à neuf d'un tracteur ou d'un équipement a été tirée de la référence économique du CRAAQ « Machinerie agricole – Prix » (AGDEX 740/85; CRAAQ, 2012). La valeur résiduelle d'un tracteur ou d'un équipement était calculée en fonction de l'âge de la machine et de son utilisation annuelle. Les facteurs permettant de calculer la valeur résiduelle sont présentés dans le standard ASAE D497.7.

Les coûts variables d'un tracteur ou d'un équipement incluent les coûts en carburant et lubrifiant et les coûts en réparation et entretien. Les facteurs permettant de calculer les coûts variables sont présentés dans les standards ASAE D497.7 et ASAE EP496.3.

La puissance totale ( $P_{tot}$ ) pour effectuer une opération se calcule à l'aide de l'équation 1 (ASAE EP496.3) :

$$P_{tot} = \frac{P_{tir}}{E_m E_t} + P_{pdf} + P_{hyd} + P_{el} + P_{res} \quad (1)$$

où  $P_{tir}$  est la puissance de tirage,  $P_{pdf}$  est la puissance à la prise de force,  $P_{hyd}$  est la puissance hydraulique,  $P_{el}$  est la puissance électrique et  $P_{res}$  est la puissance de réserve,  $E_m$  est l'efficacité mécanique et  $E_t$  est l'efficacité en traction. Les puissances hydraulique et électrique étant plus difficiles à calculer, elles ont été remplacées par un facteur de puissance ( $F_{Phyd+el}$ ) équivalent à 1,25. La puissance de réserve a été remplacée par un facteur de puissance ( $F_{Pres}$ ) équivalent à 1,20. L'équation 1 devient alors :

$$P_{tot} = \left( \frac{P_{tir}}{E_m E_t} + P_{pdf} \right) \times F_{Phyd+el} \times F_{Pres} \quad (2)$$

### 4.2.3 Fertilisants

Les valeurs fertilisantes des fumiers de vache et de poule et du lisier de porc proviennent des documents de références du CRAAQ sur les caractéristiques des effluents d'élevage (CRAAQ, 2003 a et b; CRAAQ, 2007, a et b). Les caractéristiques des fertilisants utilisés dans le projet sont présentées au tableau 3. Puisqu'aucune distinction n'était faite entre les différents fumiers de poules, les concentrations d'éléments fertilisants du fumier de poule proviennent de la moyenne du fumier de poule pondeuse et du fumier de poulet à griller.

Les émissions de gaz à effet de serre liées à la fabrication du nitrate d'ammonium proviennent de Snyder et al. (2009). Les émissions de gaz à effet de serre liées à la fabrication de l'Acti-sol, des fumiers de vache et de poule et du lisier de porc ont été estimées à l'aide de résultats d'analyse du cycle de vie obtenus dans le cadre de projets précédents réalisés à l'IRDA.

**Tableau 3 Caractéristiques des fertilisants**

| Fertilisant               | Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> ) | N (%) | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%) | K <sub>2</sub> O (%) | Émissions de GES liées à la fabrication (kg CO <sub>2</sub> e/kg N) |
|---------------------------|--------------------------------------|-------|-----------------------------------|----------------------|---|
| Nitrate d'ammonium        | 1 300                                | 27    | 0                                 | 0                    | 9,7   |
| Acti-sol                  | 1 360                                | 5     | 3                                 | 3                    | 0,815   |
| Fumier de vache (solide)  | 950                                  | 0,57  | 0,36                              | 0,53                 | 2,1   |
| Fumier de vache (liquide) | 1 000                                | 0,31  | 0,15                              | 0,34                 | 2,1   |
| Fumier de poule (solide)  | 460                                  | 3,41  | 3,10                              | 3,24                 | 0,815   |
| Lisier de porc            | 1 000                                | 0,45  | 0,23                              | 0,29                 | 2,22  |

### 4.2.4 Bilan carbone et azote

Les bilans de carbone et d'azote ont été réalisés en fonction du rendement en blé et du contenu en matière sèche. Dans la majorité des scénarios, le rendement en paille était égal au rendement en blé et lorsqu'un régulateur de croissance était utilisé, le rendement en paille était égal au deux tiers du rendement en blé. La proportion de résidus de surface et de résidus souterrains était estimée selon la méthodologie présentée par Hamelin et al. (2012).

La proportion de carbone dans toutes les parties de la plante était de 0,45 t C/t MS.

La teneur en azote de la récolte était de 26 g N/kg MS, la teneur en azote de la paille et des résidus de surface était de 6 g N/kg MS et la teneur en azote des résidus souterrain était de 10 g N/kg MS (Janzen et al., 2003).

### 4.2.5 Pertes d'azote

#### Émissions de NH<sub>3</sub>

Les émissions de NH<sub>3</sub> se produisent suite à l'épandage d'engrais organiques et d'engrais minéraux. Les facteurs d'émissions sont fonction de la quantité d'azote épandue. Les émissions de NH<sub>3</sub> ont été fixées à 0,12 kg N-NH<sub>3</sub>/kg N pour les engrais minéraux et le lisier de porc et à 0,16 kg N-NH<sub>3</sub>/kg N pour les fumiers de vache et de poule (Hamelin et al., 2012).

### Émissions de NO<sub>x</sub>

Les émissions de NO<sub>x</sub> se produisent suite à l'épandage d'engrais organiques et d'engrais minéraux en fonction de la quantité d'azote épandue. Un facteur d'émission de 0,011 kg N-NO<sub>x</sub>/kg N a été retenu (Hamelin et al., 2012).

### Émissions de N<sub>2</sub>O

Les émissions de N<sub>2</sub>O suite à l'épandage d'engrais organiques et d'engrais minéraux sont calculées à l'aide de la méthodologie présentée par Rochette et al. (2008). Le total des émissions inclut les émissions directes suite à l'épandage des engrais et la décomposition des résidus de récolte ainsi que les émissions indirectes suite à la volatilisation et redéposition de l'azote et suite au lessivage et ruissellement de l'azote.

### Pertes de NO<sub>3</sub>

Les pertes de NO<sub>3</sub> dans les eaux souterraines sont calculées à l'aide de la méthodologie présentée dans Nemecek et Schnetzer (2011). Les pertes de NO<sub>3</sub> varient en fonction de la texture du sol et du contenu en argile. Les valeurs utilisées sont présentées au tableau suivant.

**Tableau 4 Pertes de NO<sub>3</sub> dans les eaux souterraines en fonction de la texture du sol**

| Texture du sol | Contenu en argile (%) | Pertes de NO <sub>3</sub> (kg N-NO <sub>3</sub> /ha) |
|----------------|-----------------------|--|
| Sable          | 6                     | 33,4   |
| Loam sableux   | 10                    | 28,6   |
| Loam           | 19                    | 25,2   |
| Loam argileux  | 32                    | 23,6   |
| Argile         | 50                    | 22,8   |

#### 4.2.6 Pertes de phosphore

Les pertes de phosphore et de PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> dans les eaux de surface ainsi que les pertes de PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> dans les eaux souterraines ont été estimées à l'aide de scénarios réalisés dans le logiciel ODEP (Michaud et al., 2008).

#### 4.2.7 Pesticides et régulateur de croissance

Pour les pesticides et le régulateur de croissance, les émissions sont calculées en fonction de la quantité d'éléments actifs (ea) présents. Cette quantité a été fixée à 50% de la masse et les émissions de gaz à effet de serre liées à la fabrication et au transport étaient de 18 kg CO<sub>2</sub>e/kg ea (Meisterling et al., 2009). Le tableau 5 présente les facteurs d'émissions utilisés dans le calculateur.

**Tableau 5 Facteurs d'émissions pour les pesticides et le régulateur de croissance**

| Produit                      | Dose       | Éléments actifs épanchés (kg ea/ha) | Émissions de GES liées à la fabrication (kg CO <sub>2</sub> e/kg ha) |
|------------------------------|------------|-------------------------------------|--|
| <b>Herbicide (Roudup)</b>    | 1,40 L/ha  | 0,95                                | 17,1   |
| <b>Herbicide (Buctril M)</b> | 1,00 L/ha  | 0,57                                | 10,3   |
| <b>Herbicide (Eragon)</b>    | 36,00 g/ha | 0,02                                | 0,3  |
| <b>Herbicide (Infinity)</b>  | 0,48 L/ha  | 0,27                                | 4,9  |
| <b>Herbicide (Refine SG)</b> | 30,00 g/ha | 0,02                                | 0,3  |
| <b>Fongicide (Twinline)</b>  | 0,50 L/ha  | 0,27                                | 4,9  |
| <b>Fongicide (Caramba)</b>   | 1,00 L/ha  | 0,52                                | 9,4  |
| <b>Fongicide (Quilt)</b>     | 0,88 L/ha  | 0,44                                | 7,9  |
| <b>Régulateur (Ethrel)</b>   | 1,25 L/ha  | 0,69                                | 12,5   |

#### 4.2.8 Catégories d'impacts

Les émissions ont été regroupées en quatre catégories d'impacts, soit les émissions de GES, le potentiel d'eutrophisation, le potentiel d'acidification et l'utilisation de pesticides.

Les émissions de GES regroupent les émissions de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> et N<sub>2</sub>O pour toutes les opérations culturales et l'épandage de fertilisants, ainsi que pour tous les processus en amont de la ferme, soit la fabrication de la machinerie, du diesel, des fertilisants, des pesticides et des semences.

Le potentiel d'eutrophisation est la somme des émissions de NH<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, NO<sub>3</sub> et PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>. Le potentiel d'acidification est la somme des émissions de NH<sub>3</sub> et NO<sub>x</sub>. Les facteurs de caractérisations utilisés pour calculer les potentiels d'eutrophisation et d'acidification sont présentés dans Guinée et al. (2002).

### 4.3 Éco-efficience

À partir des données technico-économiques expérimentales, l'éco-efficience est mesurée sous deux angles différents. Tout d'abord, comme cela se faisait lors de la mise en place de l'éco-efficience à partir des années 1990, des ratios partiels sont calculés. Ces ratios, au nombre de quatre, sont partiels au sens où ils mettent en rapport la marge de production au numérateur, d'une part, et chacun des quatre impacts environnementaux au dénominateur, d'autre part (GES, acidification, eutrophisation et utilisation de pesticides). Il en résulte alors quatre mesures d'éco-efficience partielle.

Par la suite, un ratio d'éco-efficience global est mesuré. À cette fin, la technique de programmation linéaire de l'AED est utilisée alors que la marge de production est mise en rapport avec les quatre impacts environnementaux à la fois. Évidemment, la difficulté peut sembler d'attribuer un poids relatif à chacun des quatre impacts lorsqu'ils sont intégrés simultanément au dénominateur du ratio d'éco-efficience. Or, c'est exactement ce que permet l'AED par sa procédure de programmation linéaire, tel qu'il sera expliqué plus loin.

Le calcul de la marge de production constitue donc un point commun aux deux approches de mesure de l'éco-efficience. Ce calcul se fonde sur les données technico-économiques expérimentales et le résultat obtenu pour chacune des parcelles sert ensuite à la mesure de l'éco-efficience partielle et globale.

#### 4.3.1 Marge de production

La marge de production est une marge bénéficiaire tenant compte des revenus et des coûts de production directs. Afin d'assurer la cohérence dans l'analyse de l'éco-efficience, ces revenus et ces coûts correspondent aux frontières du système de l'analyse de cycle de vie, c'est-à-dire qu'ils se limitent aux opérations aux champs. Ainsi, les revenus directs sont relatifs à la vente de grains et de la paille, mais n'incluent pas, par exemple, les compensations d'assurance-stabilisation des revenus agricoles. Concernant les coûts directs, ceux-ci incluent les coûts des intrants (semences, fertilisants, pesticides et régulateurs de croissance) et des coûts des opérations culturales (semis, fertilisation, désherbage, pulvérisation et récolte). Pour ce qui est des coûts relatifs à la mise en marché, le traitement de ces coûts est particulier. Tout d'abord, la plupart de ces coûts surviennent en dehors des frontières de l'analyse de cycle de vie. En effet, celle-ci s'est concentrée sur les impacts environnementaux causés par les activités et les intrants aux champs. Par conséquent, les coûts de mise en marché survenant en aval des activités aux champs ne doivent pas être considérés. Dans cette catégorie, les coûts du plan conjoint ou encore les coûts de transaction associés à la recherche d'acheteurs de grains conventionnels sont de bons exemples. Cela dit, les coûts de certification du blé biologique entrent dans une catégorie à part puisqu'ils surviennent en amont de la commercialisation des grains. En effet, un producteur qui n'aurait pas sa certification préalablement à la commercialisation de son blé biologique n'obtiendrait pas le prix associé à ce blé. Par conséquent, les frais de certification sont inclus dans les coûts de production directs.

Toutes les références nécessaires au calcul de la marge de production sont présentées au tableau 6. De plus, des références plus détaillées sont fournies à l'Annexe A.

**Tableau 6 Calcul de la marge de production**

| Variables                                     | Unités       | Calcul   | Références   | Notes  |
|---|--------------|--|--|--|
| 1 Prix du blé                                 | \$/t         | Prix de vente du blé + prime de protéine ± escompte DON                          | MDS et La Milanaise<br>Fédération des producteurs de cultures commerciales du Québec (FPCCQ) | Blé d'automne et la variété Walton: pour chaque demi-point du taux de protéine supérieur à 11%, ajout de 4 \$/t. Blé de printemps (sauf Walton) : pour chaque demi-point du taux de protéine supérieur à 12,5%, ajout de 4 \$/t. |
| 2 Revenu des grains                           | \$/ha        | Prix de vente du blé (\$/t) * rendement des grains(t/ha)                         | Ligne 1 et MDS   |  |
| 3 Revenu de la paille                         | \$/ha        | Prix de vente de la paille (\$/t)*rendement de la paille (t/ha)                  | MDS, RGCQ et GCAQ  | Valeur de la paille retenue = 150 \$/t.  |
| 4 Coût de semence - blé                       | \$/ha        | Prix de semence (\$/kg)* Taux de semis visé(kg/ha)                               | CRAAQ: AGDEX 100.45/855 et données observées   | 0,95\$/kg  |
| 5 Coût de semence-engrais verts               | \$/ha        | Prix de semence (\$/kg)*Taux de semi des engrais verts(kg/ha)                    | CRAAQ: AGDEX 100.45/855 et données observées   |  |
| 6 Coût des fumiers                            | \$/ha        | Prix des fumiers (\$/unité N-org)*unité d'azote appliquée*efficacité des fumiers | CRAAQ: AGDEX 112/821c; C. Landry Ph.D (IRDA)   | Efficacité de fumier: 70% pour les fumiers solides et 90% pour les fumiers liquides. 1 unité d'azote organique = 2\$   |
| 7 Coût de fertilisant chimique                | \$/ha        | Prix d'azote(\$/unité d'azote)*quantité appliquée (unité/ha)                     | CRAAQ: AGDEX 112/821c  | 1 unité d'azote = 2\$  |
| 8 Coût des herbicides avant-semi / herbicides | \$/ha        | Prix des herbicides (\$/L)*quantité appliquée(L/ha)                              | CRAAQ: AGDEX605/855; Fiche technique des produits  | Voir détail dans les tableaux A.1 à A.10, annexe A   |
| 9 Coût des fongicides                         | \$/ha        | Prix des fongicides (\$/L)*quantité appliquée(L/ha)                              | CRAAQ: AGDEX605/855; Fiche technique des produits  | Voir détail dans les tableaux A.1 à A.10, annexe A   |
| 10 Coût du régulateur de croissance           | \$/ha        | Prix du régulateur de croissance (\$/L)*quantité appliquée(L/ha)                 | CRAAQ: AGDEX605/855; Fiche technique des produits  | Voir détail dans les tableaux A.1 à A.10, annexe A   |
| 11 Frais de certificat                        | \$/ha        | 7,84\$/ha + 3\$ par chaque 1 000\$ de revenu de vente                            | Québec Vrai  | Coût de mise en marché   |
| 12 Coûts totaux des intrants                  | \$/ha        | Total de 1 à 7   |  |  |
| 13 Coûts totaux des opérations culturales     | \$/ha        | Résultat d'analyse du cycle de vie   |  | Incluant le coût de main-d'œuvre (10\$/heure) et coût des machines.  |
| <b>Marge de production</b>                    | <b>\$/ha</b> |  | <b>(2+3)-(12+13)</b>   |  |

Pour revenir aux revenus, et comme mentionné précédemment, ceux-ci incluent la vente de grain et la valeur de la paille au champ. Tel qu'indiqué au tableau 7, le prix de base utilisé pour le blé des systèmes conventionnel et intensif était le prix de marché au début de l'année 2014, soit 255 \$/tonne. Les prix de base des blés AR et biologiques étaient tels que fournis par MDS et La Milanaise, soit 285 \$/t et 550 \$/t respectivement. Les prix de base étaient ensuite modulés en fonction des teneurs en protéines et en toxine déoxynivalénol (DON). L'ensemble des prix de base ainsi que les éléments de modulation sont présentés au tableau 7.

**Tableau 7 Grille des prix en fonction des systèmes de production et des teneurs en protéine et en DON**

| Régie                        | DON = 0-2 ppm                | DON = 2-5 ppm                | DON = 5 ppm et + |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------|
| <b>Agriculture raisonnée</b> | 285 \$ + prime à la protéine | 270 \$ + prime à la protéine | 255 \$           |
| <b>Biologique</b>            | 550 \$                       | 515 \$                       | 464 \$           |
| <b>Conventionnelle</b>       | 255 \$                       | 225 \$                       | 203 \$           |
| <b>Intensive</b>             | 255 \$                       | 225 \$                       | 203 \$           |

Au revenu associé aux grains, une valeur a aussi été calculée pour la paille produite dans chaque parcelle. Les rendements en paille n'ont pas été mesurés directement, mais certaines hypothèses ont pu être faites sur la base des travaux du Réseau des grandes cultures du Québec (RGCQ) (Goulet, 2014). Ainsi, pour les parcelles avec régulateur de croissance, un rendement de 2/3 du rendement en grain a été utilisé pour la paille. Pour les parcelles où aucun régulateur de croissance n'a été utilisé, 100 % du rendement en grain était utilisé pour le rendement en paille. Enfin, une valeur standardisée de 150 \$/t était attribuée à la paille produite, et ce, sur la base de la valeur standardisée établie par les Groupes-conseils agricoles du Québec (GCAQ) (Moreau, 2014).

### 4.3.2 Éco-efficience partielle

Comme mentionné précédemment, l'éco-efficience partielle consiste en des ratios mettant en rapport un seul indicateur de performance économique et un seul indicateur de performance environnemental à la fois. Dans le cas présent, quatre ratios d'éco-efficience partiels peuvent être produits où chacun met en rapport la marge de production (MP) avec chacun des impacts environnementaux.

1. MP/émissions GES (\$/kg CO<sub>2</sub>e);
2. MP/acidification (\$/kg SO<sub>2</sub>e);
3. MP/eutrophisation (\$/kg PO<sub>4</sub><sup>3-e</sup>);
4. MP/utilisation de pesticides (\$/kg ea)

Cette première approche permet d'effectuer un premier diagnostic quant à l'éco-efficience des différents systèmes de production. Aussi, l'éco-efficience partielle peut aider des intervenants à se concentrer sur un impact environnemental en particulier. Toutefois, l'approche partielle ne permet pas ou peu d'opérer une analyse globale sur les performances économique et environnementale d'un système de production ou d'une pratique particulière. Cela est dû au fait qu'il est difficile d'attribuer un poids relatif à chaque impact environnemental. Cet exercice peut être fait par un groupe d'experts, mais il peut alors être exposé à une analyse subjective.

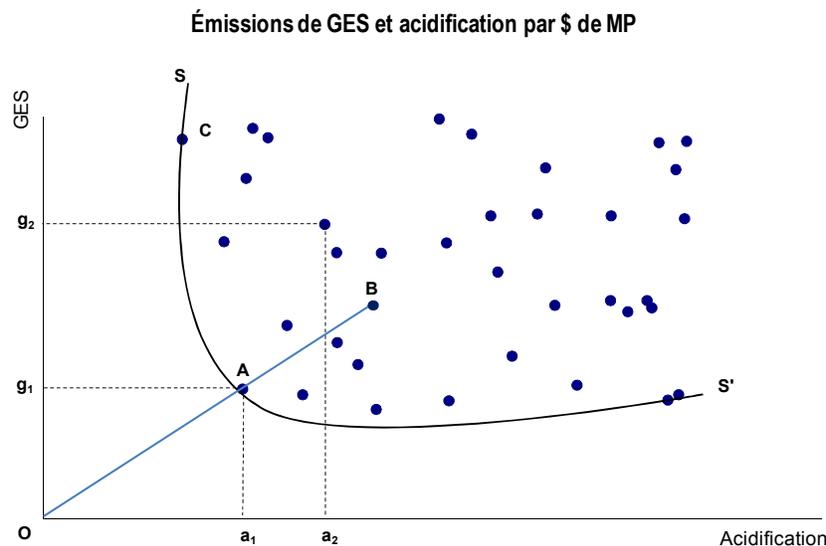
### 4.3.3 Éco-efficience globale par l'AED

Pour pallier cette lacune, l'éco-efficience globale est mesurée à l'aide de l'AED. Cette méthode quantitative en est une de programmation linéaire (PL). Par la PL, et dans le contexte de l'éco-efficience, un poids relatif est calculé et optimisé pour chaque impact environnemental dans la fonction mathématique mettant en rapport la marge de production et les impacts, et ce, pour chacune des observations dans l'échantillon. Pour les lecteurs souhaitant en savoir plus sur le sujet, Cooper et al. (2007) offre une démonstration mathématique utile sur la programmation linéaire de l'AED. De plus, un exemple numérique simple est proposé à l'Annexe B de ce rapport. Le lecteur est cependant invité à prendre connaissance de la démonstration graphique et mathématique dans les lignes qui suivent avant de consulter l'exemple numérique en annexe.

Depuis les trois dernières décennies, l'AED a été principalement utilisée pour mesurer l'efficacité technique relative de différentes unités d'observations, mais principalement des entreprises composant un échantillon dans un même secteur économique ou de service (banques, entreprises de transport, écoles, hôpitaux). Dans ce contexte, l'AED procure un pointage d'efficacité technique à chaque entité composant l'échantillon et un diagnostic peut être porté sur l'efficacité comme sur l'utilisation des intrants de production. Dans le cas présent, l'unité d'observation est la parcelle d'essai et l'efficacité mesurée est l'éco-efficience.

La figure 2 illustre l'AED graphiquement en utilisant, à titre d'exemple, les émissions de GES et l'acidification générées par dollar de marge de production. Dans cet exemple fictif, il y aurait un ensemble d'observations où chacune serait identifiée par un point dans le nuage de points dans la figure. Il est alors assez facile de concevoir que les points les plus près de l'origine du graphique représentent les observations ayant les impacts environnementaux moindres par \$ de MP. Ainsi, l'observation A produit g1 d'émissions de GES et a1 d'acidification par \$ de MP. Comparativement, l'observation B génère plutôt g2 d'émissions de GES et a2 d'acidification par \$ de MP. En ce sens, il est clair que pour une même unité de richesse, l'observation A comporte des impacts environnementaux combinés moindres que

l'observation B. Sur le plan quantitatif, l'éco-efficacité de l'observation A pourrait être calculée par le rapport des segments OA et OB (c.-à-d. :  $EE_A = \frac{OA}{OB}$ ).



**Figure 2** Mesure de l'éco-efficacité par l'AED

La relation entre les observations A et B prévaut pour tous les points dans le graphique les uns par rapport aux autres. Alors, les points aux meilleures éco-efficacités se situent généralement plus près de l'origine du graphique. Visuellement, ces observations peuvent être reliées par une courbe qui enveloppe l'ensemble du nuage de point. Dans la figure 2, cette « enveloppe » est définie par la courbe SS' et elle rejoint les observations éco-efficaces alors que les points au nord-est de l'enveloppe définissent les observations non éco-efficaces. Cela dit, sur cette même enveloppe, il existe une certaine gradation de l'éco-efficacité comme le montrerait la comparaison entre le point C et le point A. Ces deux points présentent différentes combinaisons éco-efficaces d'impacts environnementaux, mais le point A offre une « super » efficacité, en termes d'éco-efficacité, par rapport au point C.

Ce qui peut être conçu graphiquement et visuellement, tel que décrit dans les lignes précédentes, peut se traduire en expressions mathématiques. C'est alors l'objectif de la programmation linéaire de transformer le quotient associé à l'éco-efficacité de chaque observation par une équation linéaire et ensuite, résoudre un système à plusieurs équations et plusieurs inconnus. Suite à la résolution du système d'équations, un pointage d'éco-efficacité est attribué à chaque observation dans l'échantillon et des excédents d'impacts environnementaux sont aussi compilés. Ces excédents représentent en fait la quantité d'impacts environnementaux qui pourrait potentiellement être réduite, et ce, relativement aux observations éco-efficaces (c.-à-d. sur l'enveloppe). Le poids attribué à chaque impact est alors relatif aux meilleures observations, soit les plus éco-efficaces, plutôt que de façon absolue. Un exemple numérique est offert à l'Annexe B à partir de la démonstration mathématique présentée dans les lignes qui suivent.

Supposons un ensemble d'unités décisionnelles (UD) où une UD est représentée par une parcelle d'essai. Chaque UD<sub>j</sub> (j=1,2, ...n) génère s extrants y<sub>ri</sub>, (r=1,2, ...s) en utilisant m intrants x<sub>ij</sub> (i=1,2, ...m). L'éco-efficacité e<sub>j</sub> de chaque UD<sub>j</sub> est alors mesurée en mettant en rapport la marge de production (MP), représentée par s, et les impacts environnementaux (I), représentés par m. L'éco-efficacité peut alors être écrite de la façon suivante :

$$e_j = \frac{\sum_r u_r y_{rj}}{\sum_i v_i x_{ij}} \quad (3)$$

où  $u_r$ , le poids relatif à l'extrant  $y_{rj}$

$v_i$ , le poids relatif à l'intrant  $x_{ij}$

Selon le modèle CCR (Charnes, Cooper et Rhodes, 1978) l'éco-efficience de chaque UD peut être mesurée par l'équation spécifique suivante :

$$e_0 = \max \frac{\sum_r u_r y_{rj}}{\sum_i v_i x_{ij}} \quad (4)$$

sujette aux contraintes (s.c.) :

$$\sum_r u_r y_{rj} - \sum_i v_i x_{ij} \leq 0, \quad \text{pour tous les } j$$

$$v_i \geq 0, \text{ pour tous les } i$$

Une simple transformation de l'équation (3) d'un quotient à une équation linéaire mène à la programmation linéaire suivante avec, pour équation d'objectif :

$$e_0 = \max \sum_r u_r y_{rj} \quad (5)$$

s.c.  $\sum_i v_i x_{ij} = 1$ , pour tous les  $j$

$\sum_r u_r y_{rj} - \sum_i v_i x_{ij} \leq 0$ , pour tous les  $j$

$v_i \geq 0$ , pour tous les  $i$

Une programmation linéaire de ce type a été opérée à l'aide du logiciel Stata, version 12. (STATA RELEASE 12, StataCorp LP, Texas, USA).

Ainsi, pour chaque observation, une parcelle d'essai dans le cas présent, l'AED attribue un pointage de 1 aux entreprises éco-efficientes et des pointages fractionnaires entre 0 et 1 aux entreprises qui n'atteignent pas l'éco-efficience. La mesure d'éco-efficience par l'AED est relative, c'est-à-dire qu'elle offre un pointage à toutes les parcelles, les unes par rapport aux autres. Il s'agit d'une optimisation où l'éco-efficience n'est pas mesurée de façon partielle, mais plutôt de façon globale.

## 5 Résultats

### 5.1 Description de l'échantillon

L'échantillon final qui a été utilisé pour mener les différentes analyses comptait 74 parcelles d'essai réparties dans les quatre systèmes de production. Ce nombre de parcelles est considérablement moindre que ce qui avait été souhaité initialement, mais cette situation s'explique aisément. En effet, il était dans les objectifs du projet de mesurer et d'analyser les performances économique et environnementale de différents systèmes de production du blé, et ce, de façon intégrée et dans le contexte de production auquel font face les producteurs plutôt que dans un contexte strictement expérimental. Ainsi, un protocole de recherche a été établi et suivi rigoureusement, mais afin de disposer de données en contexte réel, un certain compromis devait être fait parfois sur les parcelles à retenir pour l'analyse. Ainsi, dans certaines situations et pour certaines parcelles, le protocole établi n'avait pas pu être observé par le producteur et/ou l'agronome qui y était associé à cause de facteurs qui pouvaient être hors de leur contrôle.

Il en résultait parfois que les pratiques agronomiques appliquées à certaines parcelles ne répondaient plus aux caractéristiques propres de l'un ou l'autre des systèmes de production étudiés et alors, la délimitation des protocoles devenait trop floue pour pouvoir associer certaines parcelles à un système bien défini. Dans ce contexte, il était parfois préférable de retirer les résultats de ces parcelles puisqu'il aurait été impossible par la suite d'analyser les systèmes de façon bien définie. L'exclusion des parcelles « indéfinies » permettait d'éviter des zones floues et de poser un meilleur diagnostic entre les systèmes de production. Cela dit, le tableau 8 présente les caractéristiques et la distribution de l'ensemble des parcelles composant l'échantillon et incluses dans l'analyse.

Concernant la distribution régionale des parcelles, celles-ci étaient réparties dans plusieurs régions du Québec avec une certaine prépondérance dans Lanaudière et en Montérégie Ouest. Les essais ont aussi été soumis aux conditions de régions plus en périphérie puisqu'un nombre important de parcelles se trouvaient en Estrie, en Mauricie, dans les Laurentides et au Saguenay/Lac St-Jean.

La répartition entre le blé d'automne et le blé de printemps semble avoir donné lieu à une certaine surreprésentation du blé d'automne puisque ce type de blé représentait plus du tiers des parcelles alors qu'il n'occupe pas encore une aussi grande place dans les superficies cultivées en blé au Québec. Plus loin dans cette partie, les deux types de blé sont comparés par rapport à différents critères techniques et économiques.

Enfin, au sujet de la répartition des parcelles, celle-ci n'est pas uniforme entre les quatre systèmes de production étudiés alors que les systèmes conventionnels et intensifs comptent davantage de parcelles et ce, de façon significative. À nouveau, ce fait s'explique par la difficulté, en contexte de production, d'observer assidûment les protocoles expérimentaux. Dans ces circonstances, des résultats d'années d'essais supplémentaires amélioreraient beaucoup la représentativité des parcelles des systèmes AR et biologiques.

**Tableau 8 Caractéristiques et distribution de l'échantillon**

| Région                          | Type de blé | Systèmes de production |           |           |           | Totaux    |
|---------------------------------|-------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                 |             | AR                     | B         | C         | I         |           |
| Estrie                          | BA          | 2                      | 0         | 2         | 4         | 8         |
|                                 | BP          | 2                      | 0         | 2         | 2         | 6         |
| <b>Sous-total - Estrie</b>      |             | <b>4</b>               | <b>0</b>  | <b>4</b>  | <b>6</b>  | <b>14</b> |
| Lanaudière                      | BA          | 2                      | 0         | 2         | 2         | 6         |
|                                 | BP          | 2                      | 4         | 2         | 2         | 10        |
| <b>Sous-total - Lanaudière</b>  |             | <b>4</b>               | <b>4</b>  | <b>4</b>  | <b>4</b>  | <b>16</b> |
| Laurentides                     | BA          | 0                      | 0         | 2         | 2         | 4         |
|                                 | BP          | 0                      | 0         | 1         | 1         | 2         |
| <b>Sous-total - Laurentides</b> |             | <b>0</b>               | <b>0</b>  | <b>3</b>  | <b>3</b>  | <b>6</b>  |
| Mauricie                        | BA          | 0                      | 1         | 1         | 1         | 3         |
|                                 | BP          | 0                      | 1         | 0         | 0         | 1         |
| <b>Sous-total - Mauricie</b>    |             | <b>0</b>               | <b>2</b>  | <b>1</b>  | <b>1</b>  | <b>4</b>  |
| Montréal Est (ME)               | BP          | 2                      | 0         | 1         | 6         | 9         |
| <b>Sous-total - ME</b>          |             | <b>2</b>               | <b>0</b>  | <b>1</b>  | <b>6</b>  | <b>9</b>  |
| Montréal Ouest (MO)             | BA          | 0                      | 3         | 2         | 3         | 8         |
|                                 | BP          | 2                      | 4         | 2         | 2         | 10        |
| <b>Sous-total - MO</b>          |             | <b>2</b>               | <b>7</b>  | <b>4</b>  | <b>5</b>  | <b>18</b> |
| Saguenay-Lac-Saint-Jean (SLSJ)  | BP          | 2                      | 2         | 2         | 1         | 7         |
| <b>Sous-total SLSJ</b>          |             | <b>2</b>               | <b>2</b>  | <b>2</b>  | <b>1</b>  | <b>7</b>  |
| <b>Sous-total BA</b>            |             | <b>4</b>               | <b>4</b>  | <b>9</b>  | <b>12</b> | <b>29</b> |
| <b>Sous-total BP</b>            |             | <b>10</b>              | <b>11</b> | <b>10</b> | <b>14</b> | <b>45</b> |
| <b>Total général</b>            |             | <b>14</b>              | <b>15</b> | <b>19</b> | <b>26</b> | <b>74</b> |

## 5.2 Analyse du cycle de vie

Le tableau 9 présente les doses moyennes d'azote et de phosphore épandues sur les parcelles ayant reçues des fertilisants dans les quatre systèmes de production à l'étude.

Douze des quinze parcelles biologiques ont été fertilisées avec des fumiers ou lisiers pour une moyenne de 165 kg N/ha et 131 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Trois des parcelles biologiques n'ont pas été fertilisées.

Toutes les parcelles des systèmes AR, conventionnel et intensif ont été fertilisées avec du nitrate d'ammonium. Les doses épandues ont varié entre 60 et 180 kg N/ha. En plus du nitrate d'ammonium, environ le quart des parcelles des systèmes AR, conventionnel et intensif ont été fertilisées avec des fumiers ou lisiers. Les parcelles fertilisées avec des fumiers ou lisiers ont reçu entre 87 et 222 kg N/ha et entre 42 et 114 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha. Les doses totales d'azote épandu pour les systèmes AR, conventionnel et intensif étaient sensiblement identiques, soit environ 153 kg N/ha.

**Tableau 9 Doses d'azote et de phosphore épandues pour les quatre systèmes de production (moyenne (min - max) et nombre de parcelles fertilisées par système)**

| Système              | N <sub>engrais</sub><br>(kg N/ha) | N <sub>fumier ou lisier</sub><br>(kg N/ha) | N <sub>total</sub><br>(kg N/ha) | Phosphore <sup>[a]</sup><br>(kg P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> /ha) |
|----------------------|-----------------------------------|--|---------------------------------|--|
| <b>Biologique</b>    | 0                                 | 165 (3 - 198)<br>12 sur 15                 | 165 (8 - 198)<br>12 sur 15      | 131 (2 - 177)<br>12 sur 15   |
| <b>AR</b>            | 107 (60 - 180)<br>14 sur 14       | 162 (101 - 222)<br>4 sur 14                | 153 (70 - 332)                  | 82 (49 - 114)<br>4 sur 14  |
| <b>Conventionnel</b> | 108 (60 - 180)<br>19 sur 19       | 169 (101 - 222)<br>5 sur 19                | 152 (70 - 332)                  | 85 (49 - 114)<br>5 sur 19  |
| <b>Intensif</b>      | 118 (60 - 180)<br>26 sur 26       | 130 (87 - 222)<br>7 sur 26                 | 153 (80 - 332)                  | 65 (42 - 114)<br>7 sur 26  |

[a] Tout le phosphore épandu provient de fumier ou de lisier.

Les tableaux 10 et 11 présentent les moyennes des émissions de GES en fonction de la régie de culture et des opérations culturales. Les résultats sont présentés par tonne de blé produite et par hectare. Les tableaux 13 et 14 présentent les moyennes des potentiels d'acidification et d'eutrophisation ainsi que les moyennes d'utilisation des pesticides pour les quatre systèmes de production. Les figures 3 et 4 présentent, pour toutes les parcelles confondues, les émissions de GES et l'acidification en fonction de la dose d'azote épandue tandis que la figure 5 présente l'eutrophisation en fonction de la dose de phosphore épandue.

Les émissions de GES sont plus faibles pour les systèmes biologiques que pour les autres systèmes de production. Les activités de fertilisation (fabrication, transport et épandage des fertilisants) sont responsables d'environ 90% des émissions de GES.

Les émissions de GES reliées au travail du sol étaient plus élevées dans les parcelles biologiques que dans les autres systèmes de production. Dans les parcelles biologiques, le travail du sol était généralement réalisé en trois ou quatre opérations comparativement à une ou deux opérations pour les parcelles des systèmes conventionnels et intensifs. Les émissions de GES reliées au travail du sol dans les parcelles des systèmes conventionnels et intensifs sont aussi plus faibles en raison d'une proportion plus élevée de parcelles sous semis direct (Tableau 12).

En production biologique, l'engrais vert permet d'apporter au sol une quantité d'azote évitant la production d'engrais pour un équivalent de 39,5 kg CO<sub>2</sub>e/t ou 91,0 kg CO<sub>2</sub>e/ha.

Les émissions de GES sont en partie reliées à la dose d'azote épandue (Figure 3). Les parcelles ayant reçu une dose d'azote plus importante ont généralement des émissions de GES plus élevées. Une dose de phosphore plus élevée entraîne aussi une augmentation du potentiel d'eutrophisation (Figure 5). Le potentiel d'acidification est affecté en premier par la texture du sol et non par la dose d'azote ou la dose de phosphore épandue (Figure 4).

Les potentiels d'acidification et d'eutrophisation plus élevés pour les parcelles du système biologique s'expliquent par une utilisation plus grande de fumier et lisier pour la fertilisation. Indirectement, cette différence s'explique aussi par le fait que les émissions de NH<sub>3</sub> sont plus élevées par unité d'azote épandu pour les fumiers et lisiers que pour le nitrate d'ammonium.

**Tableau 10 Moyenne des émissions de GES par système de production (kg CO<sub>2</sub>e/t)**

| Système           | Travail du sol | Fertilisation | Pulvérisation | Semis | Battage | Transport | Engrais vert | Total |
|-------------------|----------------|---------------|---------------|-------|---------|-----------|--------------|-------|
| <b>Biologique</b> | 43,8           | 560           | 0,0           | 43,7  | 17,3    | 3,8       | -39,5        | 629   |
| <b>AR</b>         | 24,0           | 856           | 3,8           | 35,1  | 15,2    | 3,8       | -            | 938   |
| <b>Conv.</b>      | 14,9           | 781           | 7,8           | 30,9  | 12,6    | 3,8       | -            | 852   |
| <b>Intensif</b>   | 10,7           | 730           | 10,7          | 26,9  | 10,8    | 3,8       | -            | 793   |

**Tableau 11 Moyenne des émissions de GES par système de production (kg CO<sub>2</sub>e/ha)**

| Système           | Travail du sol | Fertilisation | Pulvérisation | Semis | Battage | Transport | Engrais vert | Total |
|-------------------|----------------|---------------|---------------|-------|---------|-----------|--------------|-------|
| <b>Biologique</b> | 96,7           | 1654          | 0,0           | 111,5 | 41,7    | 10,5      | -91,0        | 1 824 |
| <b>AR</b>         | 83,4           | 3220          | 12,3          | 121,6 | 54,5    | 13,8      | -            | 3 506 |
| <b>Conv.</b>      | 61,3           | 3324          | 31,4          | 128,6 | 52,7    | 15,9      | -            | 3 614 |
| <b>Intensif</b>   | 49,9           | 3460          | 49,1          | 123,8 | 49,9    | 17,6      | -            | 3 750 |

**Tableau 12 Répartition des pratiques de travail du sol adoptées dans les quatre systèmes de production**

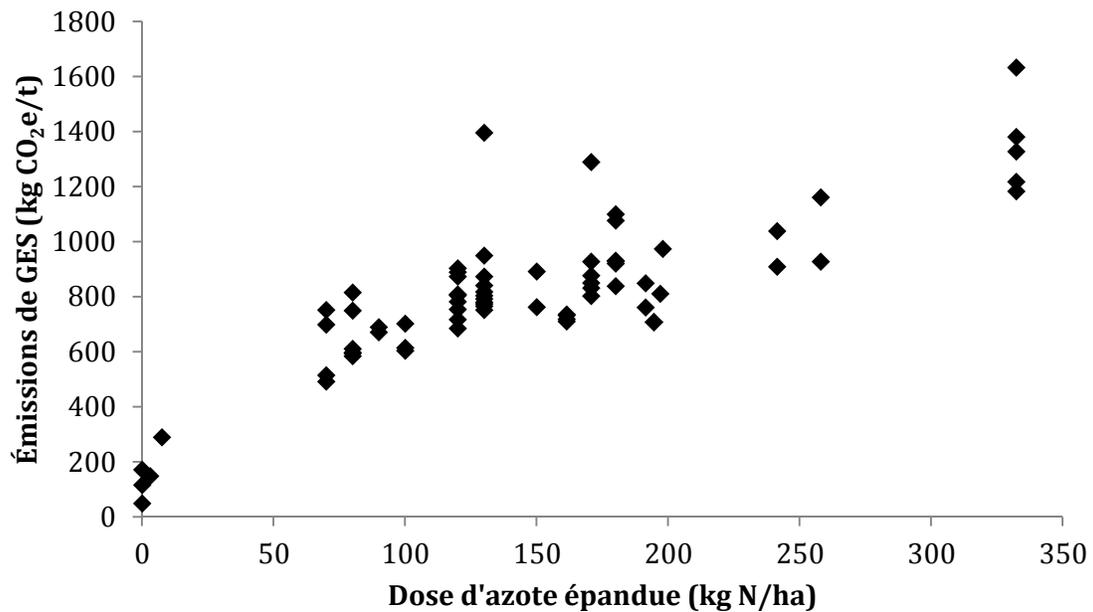
| Système              | Conventionnel (avec labour) | Réduit | Semis direct |
|----------------------|-----------------------------|--------|--------------|
| <b>Biologique</b>    | 3                           | 9      | 3            |
| <b>AR</b>            | 6                           | 6      | 2            |
| <b>Conventionnel</b> | 6                           | 5      | 8            |
| <b>Intensif</b>      | 6                           | 12     | 8            |

**Tableau 13** Moyenne des émissions par tonne produite en fonction de la catégorie d'impact et de la régie de culture

| Système       | Acidification<br>(kg SO <sub>2</sub> e/t) | Eutrophisation<br>(kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /t) | Utilisation de pesticides<br>(kg ea/t) |
|---------------|---|---|--|
| Biologique    | 37  | 18  | -                                      |
| AR            | 12  | 13  | 3,1                                    |
| Conventionnel | 13  | 11  | 5,3                                    |
| Intensif      | 10  | 9,6   | 6,6                                    |

**Tableau 14** Moyenne des émissions par hectare en culture en fonction de la catégorie d'impact et de la régie de culture

| Système       | Acidification<br>(kg SO <sub>2</sub> e/ha) | Eutrophisation<br>(kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> /ha) | Utilisation de pesticides<br>(kg ea/ha) |
|---------------|--|--|---|
| Biologique    | 103  | 51   | -                                       |
| AR            | 48   | 47   | 9,8                                     |
| Conventionnel | 55   | 47   | 21                                      |
| Intensif      | 50   | 45   | 30                                      |



**Figure 3** Émissions de GES (kg CO<sub>2</sub>e/t) en fonction de la dose d'azote épandue (kg N/ha)

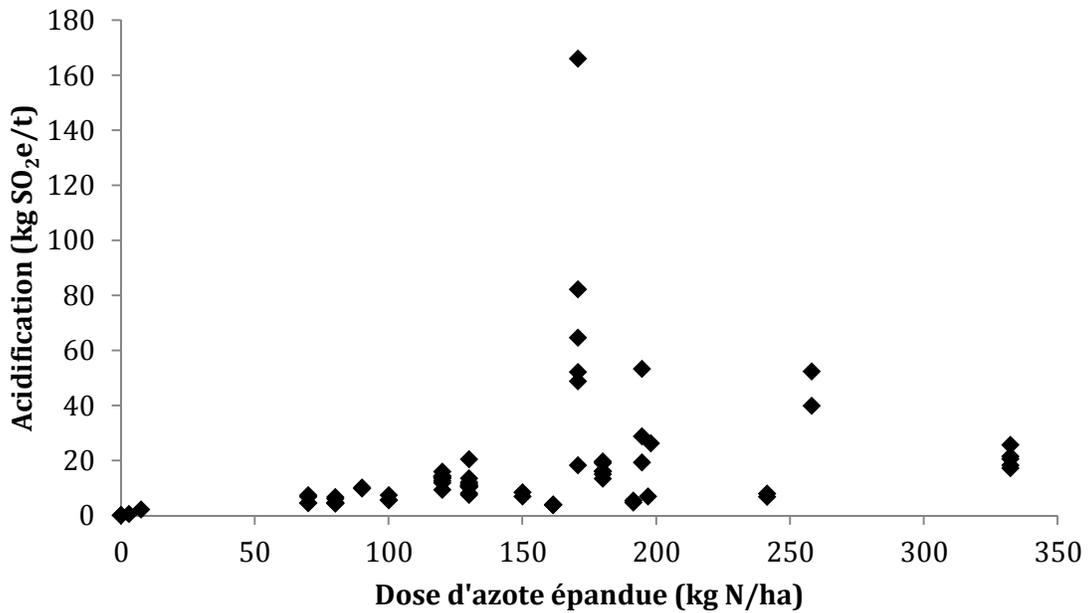


Figure 4 Acidification (kg SO<sub>2</sub>e/t) en fonction de la dose d'azote épandue (kg N/ha)

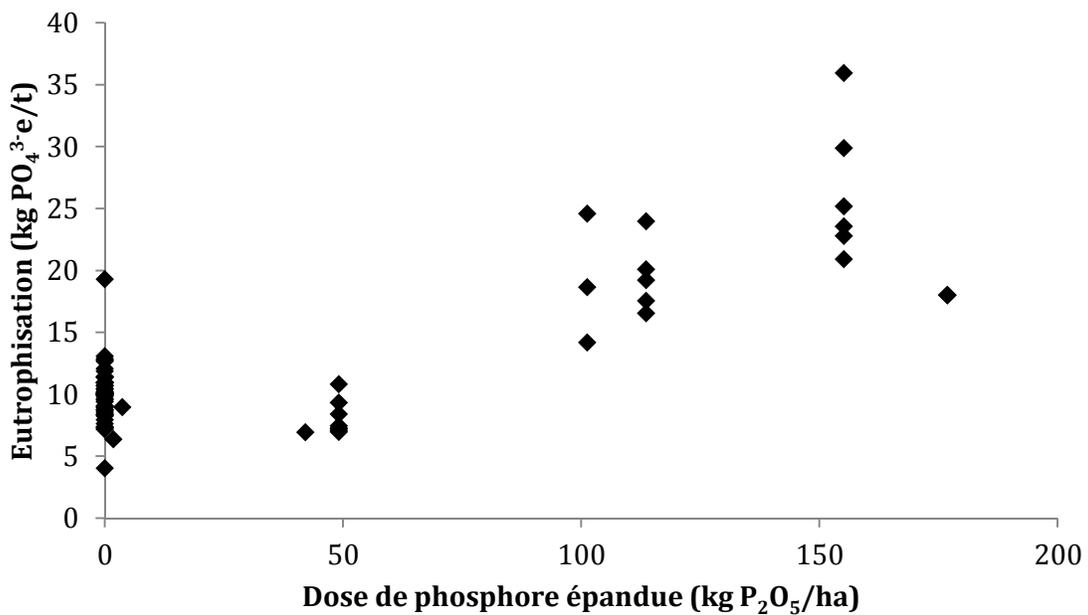


Figure 5 Eutrophisation (kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>e/t) en fonction de la dose de phosphore épandue (kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha)

### 5.3 Éco-efficience

#### 5.3.1 Marge de production

La marge de production, telle que définie précédemment, a été calculée pour chacune des 74 parcelles à partir des données technico-économiques. Les résultats agrégés sont présentés dans le tableau 15.

**Tableau 15 Résultats de la marge de production par système de production**

| Élément de calcul                         | Agriculture<br>raisonnée® | Biologique <sup>[a]</sup> | Conventionnel | Intensif     |
|---|---------------------------|---------------------------|---------------|--------------|
| n =                                       | 14                        | 15                        | 19            | 26           |
| <b>Rendement en grains (t/ha)</b>         | 3,67                      | 2,80                      | 4,23          | 4,69         |
| <b>Rendement paille (t/ha)</b>            | 3,67                      | 2,80                      | 4,09          | 3,68         |
| <b>Revenu grains (\$/ha)</b>              | 1 023                     | 1 407                     | 956           | 1 076        |
| <b>Revenu paille (\$/ha)</b>              | 550                       | 420                       | 613           | 552          |
| <b>Revenu grains (\$/t)</b>               | 279                       | 510                       | 226           | 230          |
| <b>Revenu paille (\$/t)</b>               | 150                       | 150                       | 150           | 150          |
| <b>Revenu total (\$/ha)</b>               | <b>1 573</b>              | <b>1 827</b>              | <b>1 569</b>  | <b>1 628</b> |
| <b>Revenu total (\$/t)</b>                | <b>429</b>                | <b>660</b>                | <b>371</b>    | <b>349</b>   |
| <b>Coûts totaux intrants (\$/ha)</b>      | 446                       | 330                       | 498           | 551          |
| <b>Coûts totaux intrants (\$/t)</b>       | 125                       | 131                       | 119           | 119          |
| <b>Coûts totaux OC (\$/ha)</b>            | 319                       | 320                       | 299           | 326          |
| <b>Coûts totaux OC (\$/t)</b>             | 93                        | 125                       | 72            | 71           |
| <b>Coûts totaux intrants + OC (\$/ha)</b> | <b>765</b>                | <b>650</b>                | <b>797</b>    | <b>877</b>   |
| <b>Coûts totaux intrants + OC (\$/t)</b>  | <b>219</b>                | <b>256</b>                | <b>191</b>    | <b>189</b>   |
| <b>Marge production (\$/ha)</b>           | <b>809</b>                | <b>1 162</b>              | <b>772</b>    | <b>751</b>   |
| <b>Marge production (\$/t)</b>            | <b>211</b>                | <b>397</b>                | <b>180</b>    | <b>160</b>   |

<sup>[a]</sup> La différence de calcul entre la marge de production du système biologique et ses composantes, soit 15 \$/ha, s'explique par les coûts de certifications qui ne sont pas présentés dans ce tableau.

Comme il peut être constaté, le système de production biologique dégage la meilleure MP, autant lorsqu'elle est mesurée par tonne que par hectare. Mesurée en \$/ha, la MP du biologique est supérieure de 55 % comparativement à la MP la plus faible, soit celle du système intensif. Lorsque les mêmes résultats sont exprimés en \$/t, la MP du système biologique est de 2,5 fois celle du système intensif. Or, le rendement des parcelles biologiques était en moyenne de 2,80 t/ha comparativement à 4,69 t/ha pour les parcelles en régie intensive. De plus, l'efficacité technique du système biologique affiche le pire résultat des quatre systèmes lorsque l'on observe la somme des coûts des intrants et des opérations culturales par tonne de grains produite. Celle-ci se chiffre à 256 \$/t pour le système biologique comparativement à 219 \$/t, 191 \$/t et 189 \$/t, respectivement pour les systèmes AR, conventionnel et intensif.

Force est de constater alors que la meilleure performance économique du système biologique s'explique en grande partie par un prix du grain fortement supérieur. Toutefois, la régie de la fertilisation a aussi un impact sur ce résultat. En effet, il est intéressant de porter une attention particulière aux coûts de fertilisation des différents systèmes. C'est ce

que montre le tableau 16 en incluant autant les coûts de fertilisation azotée minérale que les coûts de fertilisation organique.

**Tableau 16 Coût de fertilisation par système de production**

| Système                   | AR         | Biologique | Conventionnel | Intensif   |
|---------------------------|------------|------------|---------------|------------|
| N minéral (\$/ha)         | 214        | -          | 216           | 235        |
| Engrais organique (\$/ha) | 36         | 99         | 35            | 31         |
| <b>Total (\$/ha)</b>      | <b>251</b> | <b>99</b>  | <b>251</b>    | <b>266</b> |

Les résultats du tableau 16 montrent comment la régie de production biologique permet d'économiser au chapitre de la fertilisation, alors que les coûts y sont à un niveau d'environ 40 % de celui des trois autres régies. Ce résultat ne change pas le constat émis précédemment au sujet de la faible efficacité technique du système biologique lorsque l'on examine les coûts par tonne de grains produite. Cependant, en examinant les coûts de fertilisation du tableau 16, combinés aux coûts d'opérations culturales dans le tableau 15, le système biologique montre que pour des coûts de fertilisation moindres, les opérations culturales ne coûtent pas forcément plus cher par hectare. Cet élément contribue, en plus d'un prix de vente considérablement plus élevé, à la meilleure MP du système biologique.

Pour revenir au sujet de l'efficacité technique représentée par les coûts par tonne, il faut préciser que le système intensif n'en tire pas profit en raison, entre autres, du volume de paille moindre qui est produit dans ce système. En effet, le marché de la paille a vu les prix pour cette denrée augmenter fortement dans les dernières années et un producteur qui n'en profiterait pas en appliquant un régulateur de croissance affaiblirait sa rentabilité.

Les résultats de la MP montrent qu'il n'y aurait pas de différence très considérable entre la rentabilité des systèmes AR et conventionnel. Les performances économiques équivalentes de ces deux systèmes s'expliquent par des effets qui se contrebalancent. D'une part, le système AR obtient un rendement en grain moindre que le système conventionnel et, par conséquent, une efficacité de production plus faible lorsque l'on observe les coûts par tonne produite. En contrepartie, un producteur de blé conventionnel obtiendrait un prix moindre pour son grain comparativement au producteur de blé AR. En fin de compte, la rentabilité des deux systèmes est relativement semblable.

L'analyse de la MP peut aussi s'opérer en comparant les résultats entre les parcelles de blé d'automne et de blé de printemps. Le tableau 17 présente ces résultats, à l'image du tableau 15.

**Tableau 17 Résultats de la marge de production par type de blé**

| Éléments de calcul                 | Blé d'automne | Blé de printemps |
|------------------------------------|---------------|------------------|
| n                                  | 29            | 45               |
| Rendement grains (t/ha)            | 4,48          | 3,68             |
| Rendement paille (t/ha)            | 3,75          | 3,51             |
| Revenu grains (\$/ha)              | 1 170         | 1 059            |
| Revenu paille (\$/ha)              | 563           | 526              |
| Revenu grains (\$/t)               | 269           | 312              |
| Revenu paille (\$/t)               | 150           | 150              |
| <b>Revenu total (\$/ha)</b>        | <b>1 733</b>  | <b>1 585</b>     |
| <b>Revenu total (\$/t)</b>         | <b>396</b>    | <b>457</b>       |
| Coûts totaux intrants (\$/ha)      | 519           | 443              |
| Coûts totaux intrants (\$/t)       | 119           | 125              |
| Coûts totaux OC (\$/ha)            | 315           | 318              |
| Coûts totaux OC (\$/t)             | 74            | 94               |
| Coûts totaux intrants + OC (\$/ha) | 834           | 760              |
| Coûts totaux intrants + OC (\$/t)  | 193           | 219              |
| <b>Marge production (\$/ha)</b>    | <b>897</b>    | <b>821</b>       |
| <b>Marge production (\$/t)</b>     | <b>202</b>    | <b>236</b>       |

Les résultats de MP montrent que la marge de production par tonne est plus faible dans le cas du blé d'automne, mais celle-ci est compensée par un rendement plus élevé par unité de superficie. Par conséquent, le blé d'automne procure une marge de production un peu plus élevée que le blé de printemps par unité de superficie. De plus, les revenus et les coûts de production directs du blé d'automne étant plus élevés, ce type de blé semble être produit selon un mode plus intensif que le blé de printemps.

### 5.3.2 Éco-efficience partielle

Comme discuté dans la partie sur la méthodologie, l'analyse de l'éco-efficience peut être amorcée par la mesure des indicateurs d'éco-efficience partielle. Ces indicateurs mettent en rapport la marge de production au numérateur avec un seul impact environnemental à la fois, au dénominateur. Les résultats de cet exercice sont présentés au tableau 18 et les systèmes de production y sont classés selon chaque indicateur.

**Tableau 18 Éco-efficience partielle par système de production et classement**

| Indicateur d'éco-efficience partielle                     | Classement | Système                        | Résultat |
|---|------------|--------------------------------|----------|
| MP/GES (\$/kg CO <sub>2</sub> e)                          | 1          | Biologique                     | 1,64     |
|   | 2          | AR                             | 0,24     |
|   | 3          | Conventionnel                  | 0,23     |
|   | 4          | Intensif                       | 0,21     |
| MP/Acidification (\$/kg SO <sub>2</sub> e)                | 1          | Biologique                     | 84,21    |
|   | 2          | AR                             | 23,85    |
|   | 3          | Conventionnel                  | 22,83    |
|   | 4          | Intensif                       | 19,07    |
| MP/Eutrophisation (\$/kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> e) | 1          | Biologique                     | 33,41    |
|   | 2          | AR                             | 18,54    |
|   | 3          | Conventionnel                  | 18,13    |
|   | 4          | Intensif                       | 17,19    |
| MP/Pesticides (\$/kg ea)                                  | 1          | Biologique                     | -        |
|   | 1          | AR sans herbicide en pré-semis | -        |
|   | 2          | Conventionnel                  | 56,63    |
|   | 3          | AR avec herbicide en pré-semis | 44,08    |
|   | 4          | Intensif                       | 34,56    |

Un premier résultat à remarquer est la performance du système biologique qui se démarque sur tous les indicateurs d'éco-efficience partielle. Cette démarcation est importante et indiquerait que le système biologique est plus éco-efficace sur toutes les composantes d'impact. Or, les impacts environnementaux pris à part montrent que si le système biologique émet en effet moins de GES par hectare, en plus de ne pas utiliser de pesticides, des impacts d'acidification et d'eutrophisation sont plus importants. Il peut être difficile alors d'effectuer un diagnostic global lorsque des indicateurs partiels de la sorte montrent des signes divergents. De plus, ces résultats peuvent s'expliquer, en plus de certains impacts environnementaux moindres du système biologique, par sa plus grande MP. L'analyse des éco-efficacités partielles comporte alors le risque de l'effet rebond, alors qu'un indicateur d'éco-efficience peut être plus élevé à cause de l'indicateur économique supérieur, mais aussi, à la fois, d'un indicateur environnemental aussi plus élevé et allant au-delà de la capacité de support du milieu. Cette question est traitée à nouveau plus loin dans ce rapport.

Une autre limite de l'éco-efficience partielle apparaît évidente lorsque l'analyse se porte sur les trois autres systèmes (AR, conventionnel, intensif). En effet, il est difficile de faire un

diagnostic clair sur l'éco-efficience des systèmes de production AR, conventionnel et intensif à partir des ratios d'éco-efficience partiels, car ceux-ci ne sont pas suffisamment différents. Il est même possible de constater, au regard de l'indicateur MP/Pesticides, que les parcelles AR ayant utilisé un herbicide en pré-semis, ce qui est admis dans ce système, présentent une éco-efficience partielle se situant environ à mi-chemin entre les systèmes conventionnel et intensif. Pourtant, le système AR est plus éco-efficient que les deux autres systèmes à chacun des trois autres ratios.

L'analyse des ratios d'éco-efficience partiels montre donc les limites de cette approche. On peut comparer cette situation à l'analyse de la productivité, un indicateur unidimensionnel, par rapport à l'analyse de l'efficacité qui, elle, représente plutôt un indicateur multidimensionnel. Les ratios d'éco-efficience partiels correspondant plutôt à des indicateurs unidimensionnels ne permettant pas de porter un diagnostic global et intégré sur les performances économiques et environnementales des différents systèmes entre eux.

### 5.3.3 Éco-efficience globale par AED

Grâce à l'AED, l'éco-efficience globale est mesurée et elle permet d'obtenir une performance, pour chaque parcelle, qui intègre les résultats économiques et environnementaux. De plus, la procédure de programmation linéaire associée à l'AED permet de compiler des excédents d'impacts environnementaux pour un niveau de performance économique donné. Ces excédents signifient qu'à un certain niveau de marge de production, il est possible de réduire les impacts environnementaux sans réduire cette marge, donc sans nuire à la performance économique. Ces excédents d'impacts environnementaux peuvent être calculés autant pour chacun des quatre systèmes de production à l'étude que pour chaque parcelle composant l'échantillon.

Avant d'aller plus loin dans l'analyse des excédents d'impacts environnementaux, le tableau 19 présente les résultats d'éco-efficience globale pour chacun des systèmes de production.

**Tableau 19 Éco-efficience globale par système de production**

|  | AR   | Biologique | Conventionnel | Intensif |
|--|------|------------|---------------|----------|
| <b>Moyenne de l'éco-efficience globale</b> | 0,15 | 0,27       | 0,14          | 0,14     |
| <b>Nombre d'observations</b>               | 14   | 15         | 19            | 26       |
| <b>Min</b>                                 | 0,04 | 0,07       | 0,05          | 0,07     |
| <b>Max</b>                                 | 0,25 | 1,00       | 0,22          | 0,22     |
| <b>Écart-type</b>                          | 0,06 | 0,24       | 0,05          | 0,04     |
| <b>Coefficient de variation</b>            | 0,41 | 0,90       | 0,35          | 0,29     |

À l'instar des résultats d'éco-efficience partielle, le système biologique obtient le meilleur résultat en obtenant un pointage d'éco-efficience globale passablement plus élevé, soit 0,27 comparativement à des pointages autour de 0,15 pour les autres systèmes. Ce résultat vient donc confirmer ce qui était avancé précédemment, soit que le système biologique obtient une meilleure éco-efficience en raison d'un meilleur revenu de production, de l'absence de pesticides et d'émissions de GES moindres, et ce, en dépit d'impacts environnementaux plus élevés à l'égard de l'acidification et de l'eutrophisation. Cela signifie aussi que le système biologique pose des risques différents pour l'environnement en utilisant davantage d'engrais organique, mais passablement moins d'engrais de synthèse, le tout accompagné de revenus plus élevés. L'éco-efficience globale s'en trouve donc améliorée.

Cela dit, il faut faire attention de ne pas poser de diagnostic trop définitif à l'égard du système biologique, car comme le démontre les résultats du tableau 19, la variabilité de ceux-ci est bien plus grande que dans les trois autres systèmes. Avec un coefficient de variation de 0,90, le pointage d'éco-efficience des parcelles biologiques montre donc de plus grands extrêmes. Les résultats de ces extrêmes sont affichés au tableau 20. Par exemple, les parcelles no 72 et 76 sont celles qui ont obtenu les pointages les plus faibles parmi les parcelles biologiques, avec une éco-efficience globale de 0,07. Dans le cas de la parcelle no 72, cette performance s'explique principalement par un rendement plutôt faible, à 1,9 t/ha de blé de printemps, ainsi qu'une qualité de grain médiocre alors que la teneur en DON se situait à 13,2 ppm. Par conséquent, la parcelle no 72 a enregistré une MP plus faible que l'ensemble (555 \$/ha) pour des impacts environnementaux qui n'étaient pas de beaucoup inférieurs. Quant à la parcelle no 76, celle-ci a plutôt affiché une très forte utilisation de la fertilisation, à 198 kg N/ha, sans obtenir un rendement plus fort que la moyenne des parcelles biologiques (2,5 t/ha). La qualité du grain, du blé d'automne dans ce cas-ci, était très bonne à 0,9 ppm de DON, ce qui a permis un revenu de production correct dans les circonstances, à 1 750 \$/ha. Toutefois, la MP se chiffrait à seulement 226 \$/ha et ce, avec des impacts environnementaux élevés pour une parcelle biologique.

**Tableau 20 Performances d'éco-efficience des extrêmes dans le système biologique**

| Parcelle  | 72         | 76    | 75    |
|---|------------|-------|-------|
| <b>Système</b>  | Biologique |       |       |
| <b>Classement</b>                                       | 72         | 68    | 1     |
| <b>Pointage d'éco-efficience</b>                        | 0,07       | 0,07  | 1,00  |
| <b>Rendement en grains (t/ha)</b>                       | 1,90       | 2,50  | 3,38  |
| <b>Rendement en paille (t/ha)</b>                       | 1,90       | 2,50  | 3,38  |
| <b>Marge de production (\$/ha)</b>                      | 555        | 564   | 1 691 |
| <b>Protéine (%)</b>                                     | 12,10      | 11,30 | 13,84 |
| <b>DON (ppm)</b>  | 13,20      | 0,90  | 0,20  |
| <b>Émissions de GES (kg CO<sub>2</sub>e/ha)</b>         | 2 449      | 2 432 | 163   |
| <b>Acidification kg (kg SO<sub>2</sub>e/ha)</b>         | 315,3      | 65,5  | 0,00  |
| <b>Eutrophisation (kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>e)</b> | 68,3       | 61,4  | 13,6  |

À l'autre bout du spectre, la parcelle no 75 affiche un pointage d'éco-efficience globale de 1,00, soit le meilleur de tout l'échantillon. Pour obtenir cette performance, cette parcelle a procuré un rendement de 3,4 t/ha, ce qui est passablement plus élevé que la moyenne des parcelles de blé biologique de l'échantillon. La qualité du grain était aussi très bonne avec des teneurs en protéine de 13,8 % et en DON de 0,2 ppm. Ces caractéristiques ont donc procuré un revenu de production élevé (2 366 \$/ha) et, par conséquent, une MP bien au-delà de la moyenne du groupe des parcelles biologiques (1 691 \$/ha). À cette très bonne performance économique, de très faibles impacts environnementaux ont été combinés. Cette parcelle faisant usage des engrais verts et du semis direct, en plus de ne pas avoir fertilisé, elle présente les émissions de GES les plus faibles (163 kg CO<sub>2</sub>e/ha) de l'ensemble des 74 parcelles. La parcelle no 75 a aussi un impact d'eutrophisation parmi les plus faibles de tout l'échantillon (13,6 kg PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>e/ha) en plus d'un impact d'acidification nul.

### Systèmes de production non-biologiques

Concernant les trois autres systèmes de production, l'analyse doit être abordée sous un autre angle. En effet, le système de production biologique impose une approche tout à fait différente dans la régie de culture du producteur. En fait, le système est tellement différent que ce sont les technologies mêmes à la base de celui-ci qui diffèrent de celles des autres systèmes. Entre autres, et surtout, toute la panoplie des intrants de synthèse n'est plus disponible dans le mode de production biologique. Par conséquent, et sur la base des principes de l'analyse par enveloppement des données, il est préférable d'analyser les trois autres systèmes ensemble et à part du système biologique. Il en est ainsi parce que l'AED impose des principes méthodologiques qui imposent de ne pas comparer des systèmes de production aux technologies trop divergentes. Dans le cas actuel, les divergences technologiques entre la régie biologique, d'une part, et les trois autres régies, d'autre part, justifient d'analyser séparément l'éco-efficience globale des autres systèmes. Enfin, toujours dans le contexte de l'AED, le système biologique sert en quelque sorte de référence de par ses performances d'éco-efficience. Or, mener l'analyse sans traiter les systèmes non-biologiques de façon distincte mènerait à négliger le fait exposé précédemment, soit que le système de production biologique évolue dans un tout autre contexte technologique. Les pointages d'éco-efficience globale affichés par les systèmes AR, conventionnel et intensif, dans le tableau 19, appuient d'ailleurs cet argument.

Pour permettre de procéder à l'analyse des systèmes non-biologiques, une autre procédure d'AED a été réalisée en incluant cette fois que les trois systèmes AR, conventionnel et intensif. Les résultats procurent de nouveaux pointages d'éco-efficience globale, ainsi que les excédents d'impacts environnementaux. De plus, dans cette analyse, le système AR a été subdivisé en deux sous-groupes, soit le système AR avec herbicide, qui admet l'utilisation d'herbicide en pré-semis, et le système AR sans herbicide qui inclut les parcelles où aucun herbicide n'était appliqué, comme aucun autre pesticide d'ailleurs. À ce sujet, les parcelles AR avec herbicide devaient être incluses dans l'analyse afin de respecter les frontières de l'ACV.

Les résultats présentés au tableau 21 permettent de mieux distinguer la performance d'éco-efficience des systèmes non-biologiques. Ce qui en ressort principalement est la différence d'éco-efficience plus marquée entre les systèmes AR sans herbicide et intensifs, avec des pointages d'éco-efficience respectifs de 0,76 et 0,63. Entre ces deux performances, les systèmes AR avec herbicide et conventionnel sont équivalents. Ces résultats tendent à montrer, tout comme pour l'éco-efficience précédente incluant le système biologique, que l'utilisation d'intrants de synthèse défavorise l'éco-efficience. Par ailleurs, les résultats présentés dans le tableau 21 ne souffrent pas tellement d'une grande variabilité, comme le montre les valeurs minimales, maximales ainsi que les coefficients de variation. En ce sens, la comparaison de ces systèmes, en excluant le système biologique, est plus adéquate. Cependant, il est opportun d'examiner les excédents d'impacts environnementaux, présentés au tableau 22, pour pousser davantage l'analyse. Ces résultats sont accompagnés de la ventilation des impacts environnementaux par groupe dans le tableau 23 et le tableau 24.

Dans les tableaux 20 à 22, le groupe 1 sert de référence aux autres groupes. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle, dans le tableau 22, le pointage de ce groupe est quasiment de 1,0, soit le pointage d'éco-efficience. Par conséquent, les excédents d'impacts sont relatifs aux performances de ce groupe. Les excédents représentent alors les quantités d'impacts qui pourraient être réduites sans affecter la marge de production. Les quatre groupes ne sont donc pas classés en fonction des systèmes de production, mais bien selon leur performance

d'éco-efficience et il peut donc se trouver des parcelles de différents systèmes de production dans un même groupe.

**Tableau 21 Éco-efficience globale par système de production, sauf le biologique**

|  | AR sans herbicide<br>en pré-semis | AR avec herbicide<br>en pré-semis | Conventionnel | Intensif |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------|----------|
| <b>Moyenne de l'éco-efficience globale</b> | 0,76                              | 0,69                              | 0,69          | 0,63     |
| <b>Nombre d'observations</b>               | 8                                 | 6                                 | 19            | 26       |
| <b>Min</b>                                 | 0,21                              | 0,43                              | 0,26          | 0,27     |
| <b>Max</b>                                 | 1,00                              | 1,00                              | 1,00          | 1,00     |
| <b>Écart-type</b>                          | 0,24                              | 0,24                              | 0,22          | 0,18     |
| <b>Coefficient de variation</b>            | 0,32                              | 0,35                              | 0,32          | 0,29     |

Il est intéressant de constater d'abord que le groupe 1 n'affiche pas les meilleurs rendements agronomiques, ni la meilleure marge de production. En effet, le groupe 2 dépasse le groupe 1 à ce chapitre. Ce résultat illustre bien le fait que l'éco-efficience est en quelque sorte une mesure de compromis entre les performances économique et environnementale. De plus, cela reflète aussi le fait que l'effet rebond qui est parfois redouté dans l'approche de l'éco-efficience ne semble pas se manifester dans la présente analyse. Ce point est traité à nouveau plus loin dans ce rapport.

Concernant les excédents d'impacts, l'acidification montre les excédents les plus élevés proportionnellement et ce, pour tous les groupes qui n'atteignent pas l'éco-efficience, soit ceux comparés au groupe 1. En effet, pour cette catégorie d'impact, l'excédent par rapport au groupe 1 varie de 56 % à 82 % pour les groupes 2 à 4, respectivement. Cela peut donc signifier une utilisation excessive des engrais organiques pour atteindre une même marge de production. D'ailleurs, en revenant au tableau 16, il peut être remarqué que les trois systèmes biologiques utilisent en général les engrais organiques et minéraux tandis que le système biologique arrive à produire sans fertilisation minérale. Il y aurait donc possiblement des améliorations qui pourraient être apportées dans les systèmes non-biologiques en s'inspirant de la régie biologique.

L'utilisation des pesticides est la deuxième source d'excédents d'impact. Ce résultat concorde avec ceux présentés au tableau 21. Toutefois, il est utile de préciser que l'utilisation de pesticides n'est pas différente entre les groupes 1 et 2, comme le montre le tableau 21, mais plutôt entre les groupes 1 et 2, d'une part, et les groupes 3 et 4, d'autre part. La « surutilisation » de pesticides se manifesterait donc dans les parcelles à l'éco-efficience passablement faible plutôt que dans les parcelles dont l'éco-efficience succède immédiatement le groupe de tête. C'est d'ailleurs ce que montre le tableau 24. Finalement, les résultats du tableau 22 montrent que les émissions de GES et l'eutrophisation sont les impacts environnementaux où les gains à faire sont les moins élevés dans les systèmes non-biologiques, puisque leurs niveaux d'excédents sont les plus faibles et assez semblables. Il faut souligner cependant, à l'égard des émissions de GES, que celles-ci sont générées en majeure partie par la fertilisation (tableau 23). À ce titre, le groupe 1 se démarque de façon importante des groupes 2 et 3 et encore plus du groupe 4.

**Tableau 22 Analyse de l'éco-efficience et des excédents d'impacts environnementaux**

| Groupes  | 1        | 2       |                       |               | 3       |                       |               | 4       |                       |               |
|--|----------|---------|-----------------------|---------------|---------|-----------------------|---------------|---------|-----------------------|---------------|
| Intervalles de pointage                              | 90-100 % | 70-89 % |                       |               | 50-69 % |                       |               | 20-49 % |                       |               |
| Classement   | 1-9      | 10-28   |                       |               | 29-46   |                       |               | 47-59   |                       |               |
| Nombre d'observations                                | 9        | 19      |                       |               | 18      |                       |               | 13      |                       |               |
|  | Moyenne  | Moyenne | Excédents des impacts | Excédents (%) | Moyenne | Excédents des impacts | Excédents (%) | Moyenne | Excédents des impacts | Excédents (%) |
| Pointage EE  | 0,98     | 0,80    |                       |               | 0,59    |                       |               | 0,39    |                       |               |
| Rendement en grains                                  | 4,08     | 4,48    |                       |               | 4,34    |                       |               | 4,12    |                       |               |
| Rendement en paille                                  | 4,08     | 4,27    |                       |               | 3,64    |                       |               | 3,18    |                       |               |
| Marge de production                                  | 849      | 916     |                       |               | 748     |                       |               | 539     |                       |               |
| Émissions GES (kg CO <sub>2</sub> e/ha)              | 2 621    | 3 610   | 736                   | 20            | 3 772   | 1 458                 | 39            | 4 245   | 2 528                 | 60            |
| Acidification (SO <sub>2</sub> e /ha)                | 22,24    | 48,24   | 26,81                 | 56            | 58,58   | 40,27                 | 69            | 64,97   | 53,10                 | 82            |
| Eutrophisation (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> e /ha) | 32,26    | 43,32   | 8,30                  | 19            | 49,37   | 20,54                 | 42            | 55,68   | 34,91                 | 63            |
| Utilisation des pesticides (kg ea/ha)                | 14,36    | 13,76   | 3,32                  | 24            | 28,57   | 15,20                 | 53            | 32,40   | 22,04                 | 68            |

**Tableau 23 Moyenne des émissions de GES par groupe (kg CO<sub>2</sub>e/ha)**

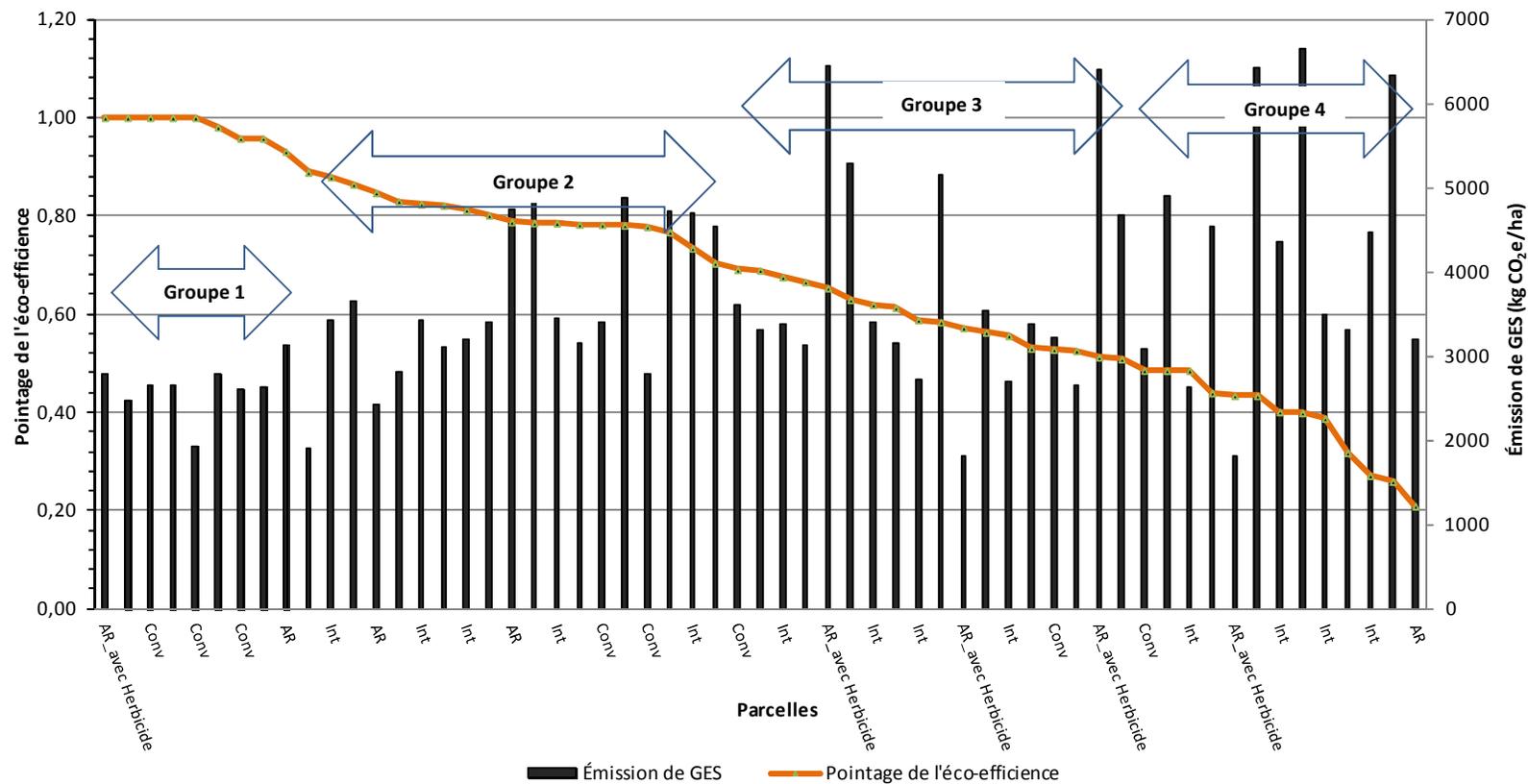
| Groupe | Travail du sol | Fertilisation | Pulvérisation | Semis | Battage | Transport | Total |
|--------|----------------|---------------|---------------|-------|---------|-----------|-------|
| 1      | 102            | 2315          | 21,3          | 118   | 48,9    | 15,3      | 2621  |
| 2      | 41,5           | 3355          | 24,2          | 122   | 50,1    | 16,8      | 3610  |
| 3      | 53,4           | 3478          | 41,9          | 130   | 52,2    | 16,3      | 3772  |
| 4      | 74,3           | 3923          | 49,1          | 126   | 56,3    | 15,5      | 4245  |

**Tableau 24 Moyenne des émissions par hectare en culture en fonction de la catégorie d'impact et du groupe**

| Groupe | Acidification (kg SO <sub>2</sub> e/ha) | Eutrophisation (kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> e/ha) | Utilisation de pesticides (kg ea/ha) |
|--------|---|--|--------------------------------------|
| 1      | 22                                      | 32   | 14                                   |
| 2      | 48                                      | 43   | 14                                   |
| 3      | 59                                      | 49   | 29                                   |
| 4      | 65                                      | 56   | 32                                   |

En terminant au sujet de l'analyse de l'éco-efficience des 59 parcelles des systèmes non-biologiques, il est important de vérifier si un effet rebond se manifeste. Cet effet apparaît lorsque les impacts environnementaux augmentent simultanément avec le ratio d'éco-efficience. Dans ces circonstances, il faut être très prudent dans l'interprétation des résultats, car l'amélioration de l'éco-efficience peut ne pas être associée à des gains environnementaux significatifs. Or, dans la présente étude, les résultats mènent à la conclusion que l'effet rebond ne se manifeste pas vraiment.

Les figures 6 à 9 illustrent l'évolution du pointage d'éco-efficience en fonction des impacts environnementaux, et ce, pour les 59 parcelles des systèmes non-biologiques. De ces figures, deux éléments principaux ressortent, à l'exception cependant de l'impact associé à l'utilisation des pesticides. Tout d'abord, pour les trois autres impacts environnementaux, il ressort clairement que ces impacts sont minimisés dans les parcelles à la meilleure éco-efficience, soit le groupe 1 principalement et, à l'occasion, le groupe 2 (eutrophisation). Deuxièmement, la variabilité des impacts environnementaux est nettement supérieure dans les parcelles des groupes 3 et 4. Cela signifie donc que dans les parcelles moins éco-efficientes, les pratiques adoptées posent un plus grand risque environnemental sans nécessairement améliorer la performance économique. Finalement, au regard de l'impact de l'utilisation des pesticides, les deux relations mentionnées précédemment sont moins évidentes. S'il est vrai que l'impact environnemental semble moins important dans les parcelles aux meilleurs pointages d'éco-efficience, la variabilité de l'impact, elle, est tout de même considérable pour les quatre groupes.



**Figure 6** Pointages d'éco-efficience et émissions de GES

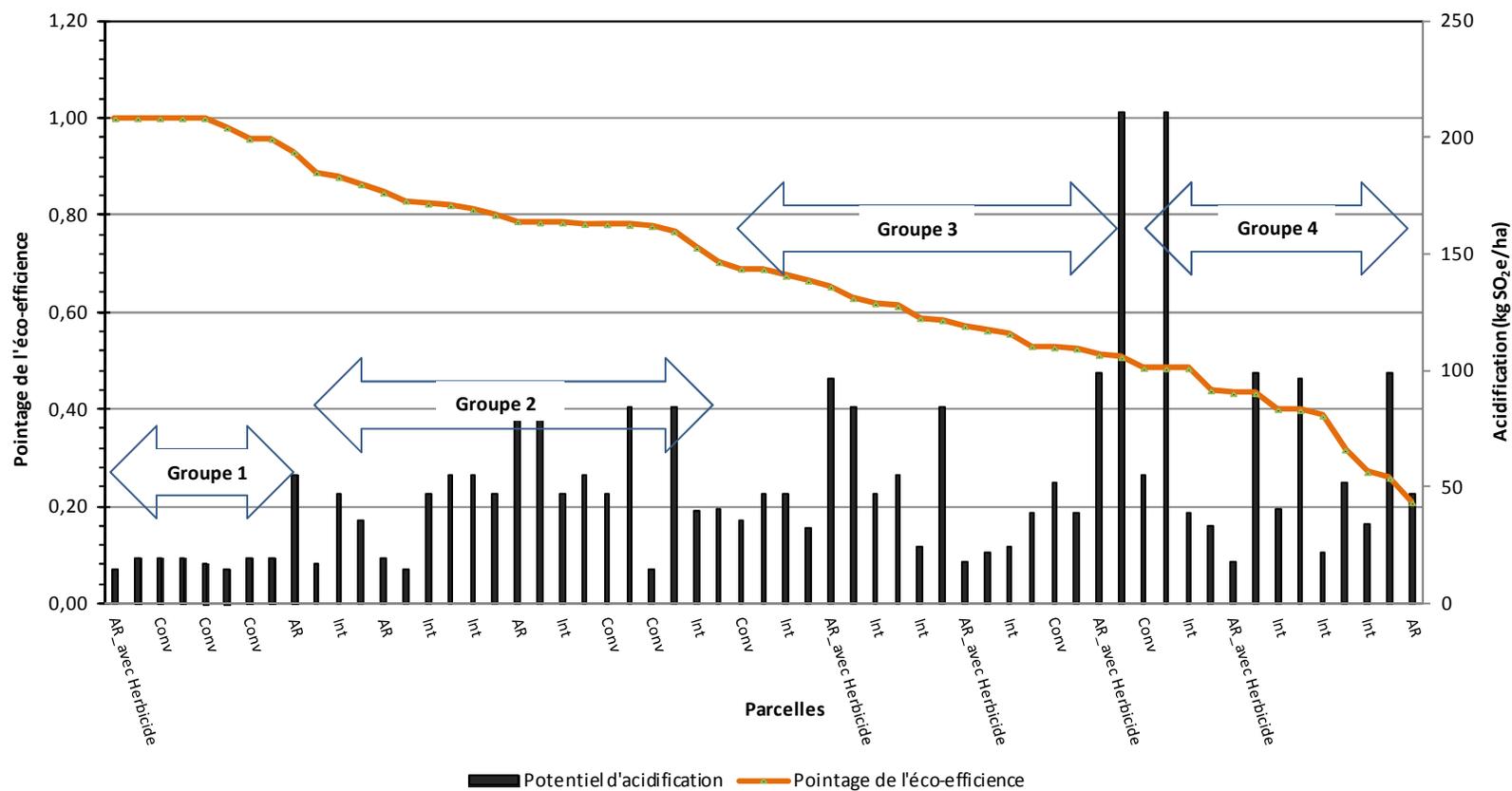
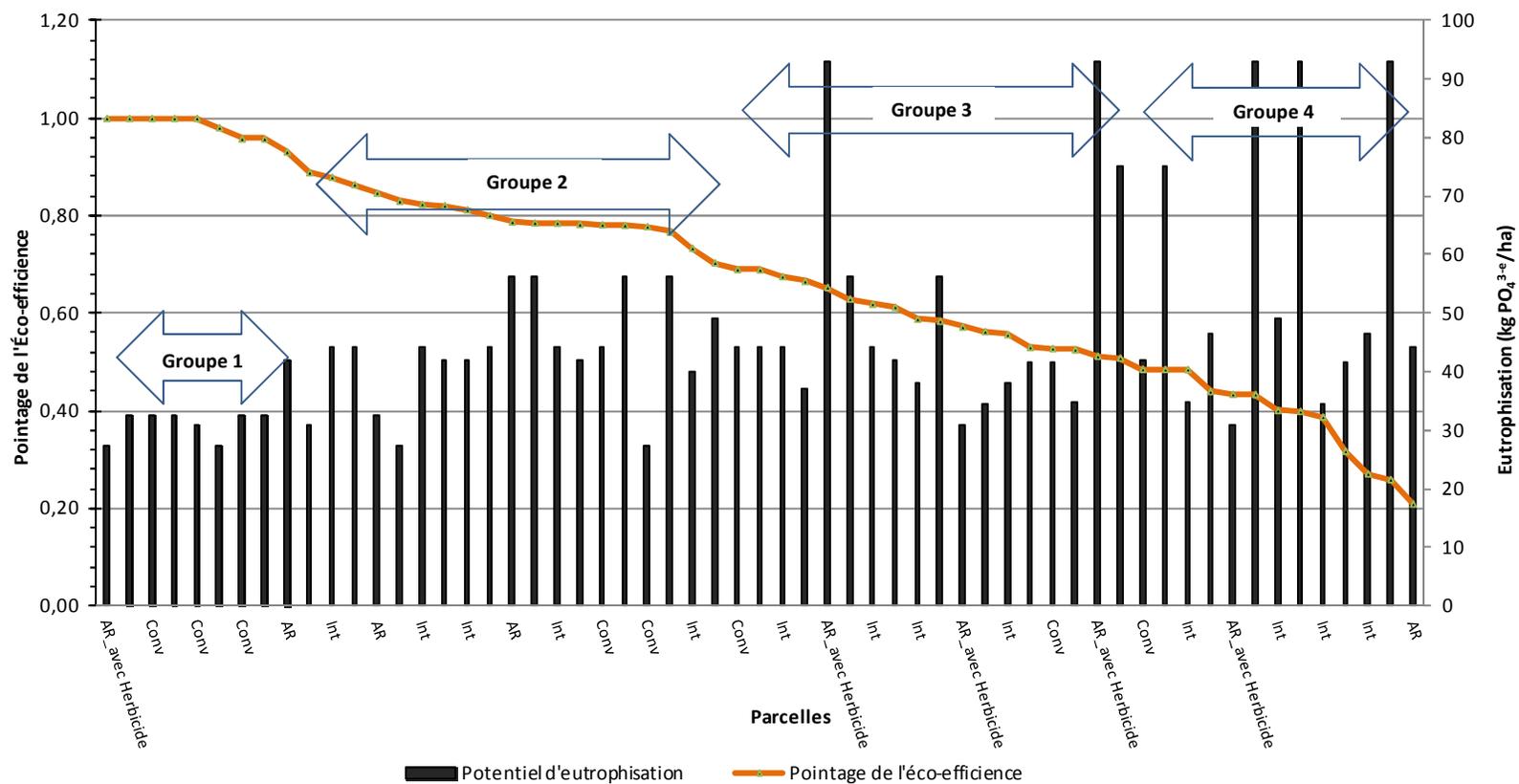
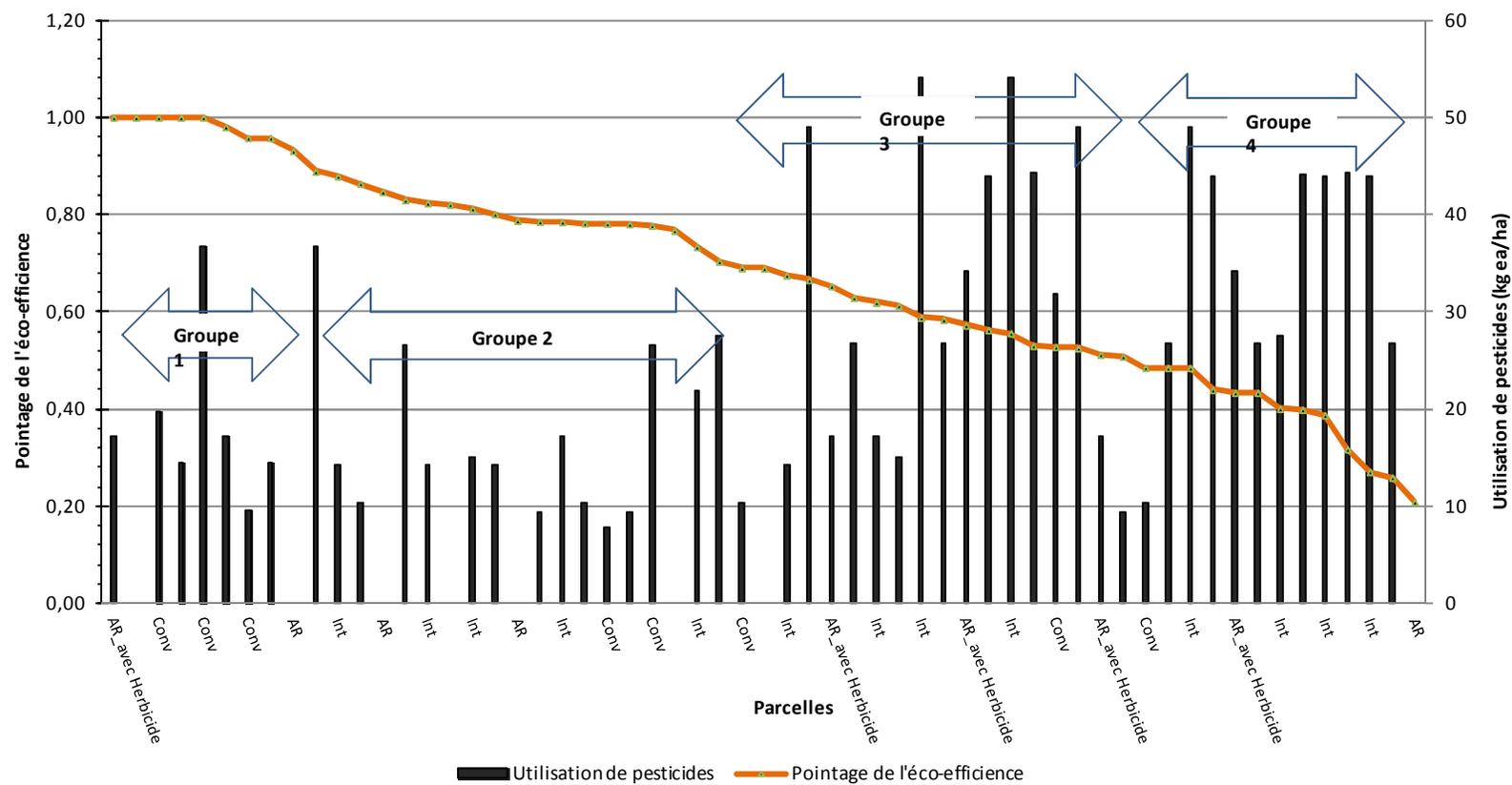


Figure 7 Pointages d'éco-efficience et potentiel d'acidification



**Figure 8** Pointages de l'éco-efficience et du potentiel d'eutrophisation



**Figure 9** Pointages d'éco-efficience et utilisation de pesticides

## 6 Discussion

Ce projet a permis de mesurer l'éco-efficience de différents systèmes de production de blé et certains grands constats peuvent en être tirés. Ces constats sont relatifs aux systèmes de production, avec une attention particulière à la performance du système biologique, de même qu'aux intrants de culture et, plus généralement, aux performances économiques et environnementales des systèmes.

Avant d'expliquer plus en détail ces constats, il faut souligner un des choix qui ont été faits dans ce rapport relativement à l'interprétation des résultats. En effet, dans cet exercice, l'accent a été mis sur les résultats rapportés par hectare en production plutôt que par tonne de grain produite. Ce choix pourrait soulever certaines remises en question, mais il faut ici mettre en garde contre une erreur d'interprétation qui favoriserait les résultats par tonne produite. Effectivement, il faut que les résultats soient prioritairement interprétés sur la base des superficies, car, d'une part, un agriculteur cherchera à la base à rentabiliser son investissement dans un actif de production, comme un ha de terre, plutôt que dans une unité de production, comme une tonne de grain. D'autre part, les impacts environnementaux se font ressentir sur le milieu naturel, lequel est exprimé par unité de surface de territoire plutôt que par unité de production. Pour ces raisons, l'interprétation des résultats par ha doit avoir préséance. Cela dit, si les résultats par ha peuvent différer de ceux rapportés par tonne en ce qui concerne les résultats économiques et environnementaux pris séparément, ils sont les mêmes pour l'éco-efficience, que les calculs de l'éco-efficience se fassent par hectare ou par tonne.

Cette précision faite, un des faits marquants du projet est la performance d'éco-efficience du système biologique qui a clairement dépassé celle des autres systèmes. Cependant, la performance du système biologique est aussi celle affichant le plus de variabilité. Ces résultats sont fort instructifs, car ils indiquent, en premier lieu, que le système biologique ne semble pas perdre ses avantages environnementaux par des désavantages qui viendraient les annuler. Par exemple, une croyance qui a été parfois véhiculée est que l'avantage environnemental de l'absence de pesticides en régie biologique peut être contrebalancé par davantage de passages aux champs aux fins de désherbage et ainsi, augmenter les émissions de GES. Les résultats de ce projet ne corroborent pas cette croyance ou du moins, ne montrent pas que des désavantages du système biologique seraient tels qu'ils annulent les avantages.

Cela dit, la grande variabilité dans le pointage d'éco-efficience des parcelles biologiques montre aussi qu'il peut y avoir des pratiques dans ce système, ou des ensembles de pratiques, qui le rendent faiblement performant en matière d'éco-efficience. Certaines pratiques seraient donc à changer dans certaines circonstances. Entre autres, des applications excessives d'engrais organiques posent un risque important d'eutrophisation et d'acidification. De plus, des problèmes de qualité du grain peuvent faire perdre beaucoup de valeur au blé, ce qui fait chuter la marge de production dans le système biologique et, par conséquent, son éco-efficience.

Pour ce qui est de l'ensemble des systèmes de production, en plus du système biologique, la fertilisation est susceptible de faire poser des risques environnementaux qui peuvent être réduits. En général, il est observé dans les parcelles combinant à la fois la fertilisation azotée minérale et la fertilisation organique qu'il est plus probable que des impacts environnementaux élevés fassent chuter l'éco-efficience globale. Des gains substantiels peuvent donc être faits au regard de la fertilisation sans affecter la marge de production.

L'utilisation de l'éco-efficience doit toujours être adoptée avec prudence en raison, comme le souligne la littérature, du risque d'un effet rebond. Cet effet survient lorsque le ratio d'éco-efficience augmente en raison de hausses des indicateurs économiques et environnementaux qui sont simultanées mais non proportionnelles. Dans ce contexte, il y a un risque que les impacts environnementaux augmentent au-delà de la capacité de support du milieu naturel, alors que l'éco-efficience serait « améliorée ». Les précautions voulues ont été prises dans ce projet afin de vérifier si un tel effet était présent. Or, ce n'est pas le cas puisque la relation entre le pointage d'éco-efficience des parcelles non-biologiques et leurs impacts environnementaux était négative (Figures 6 à 9). Ce résultat permet un meilleur degré d'assurance dans les conclusions. En d'autres mots, les gains d'éco-efficience dans cette étude ne se faisaient pas, en général, grâce à une hausse simultanée de la performance économique et des impacts environnementaux. En effet, les parcelles obtenant une meilleure éco-efficience affichaient aussi des impacts environnementaux moindres. Cependant, il faut souligner que concernant l'impact de l'utilisation des pesticides, bien que la relation négative soit toujours présente, la variabilité de cet impact dans les différentes parcelles demeure importante, que le pointage d'éco-efficience soit élevé ou non. Cela indique qu'il sera pertinent, dans des travaux futurs, d'avoir un plus grand nombre d'observations afin de lisser la variabilité des résultats relatifs aux pesticides et ainsi, vérifier s'il y a réellement un effet rebond.

Sur le plan méthodologique, l'équipe de recherche envisage d'ores et déjà certains changements dans l'approche pour les travaux futurs. Premièrement, dans ce projet, l'éco-efficience a été mesurée en considérant les impacts environnementaux comme des intrants à minimiser pour une même unité de performance économique, la marge de production dans le cas présent. Or, nous savons de la littérature que la méthodologie utilisant l'analyse par enveloppement des données pour mesurer l'éco-efficience prévoit une autre approche. En effet, dans le contexte de l'AED, les impacts environnementaux peuvent être vus comme des extrants indésirables qui résultent du procédé de transformation des intrants de production (ex. : fertilisants) en extrants de production (ex. : blé). Cette différence méthodologique impose de considérer les impacts environnementaux parmi les extrants au numérateur du ratio d'éco-efficience. Toutefois, dans le projet actuel, le logiciel utilisé ne prévoyait pas de procédure de programmation linéaire pour cette approche méthodologique (Stata, version 12 - STATA RELEASE 12, StataCorp LP, Texas, USA). Cela dit, certains autres logiciels sont connus pour permettre d'opérer selon cette méthodologie, le logiciel libre R entre autres<sup>1</sup>, et l'équipe de recherche considérera l'utilisation de l'un de ces autres logiciels dans le futur.

Toujours sur le plan méthodologique, afin de remédier au potentiel effet rebond expliqué précédemment relativement aux pesticides, il serait opportun de considérer d'autres mesures de l'utilisation des pesticides que les éléments actifs, tel que cela a été fait dans l'étude actuelle. Entre autres, il existe au Québec un autre indicateur de mesure de relatif à l'utilisation des pesticides, soit l'Indicateur de risque des pesticides du Québec (IRPeQ)<sup>2</sup>. Cet indicateur pourrait être plus adéquat que celui des éléments actifs, car il exprime mieux les impacts liés aux pesticides en termes de risques publics.

---

<sup>1</sup> <http://www.r-project.org>

<sup>2</sup> <http://www.mddep.gouv.qc.ca/pesticides/indicateur.htm> (consulté le 12 février 2014)

## 7 Conclusion

Ce projet a permis d'opérationnaliser l'éco-efficience en agriculture, ce qui n'avait pas encore été réalisé au Québec. Cet exercice s'est fondé sur les résultats des impacts environnementaux mesurés par l'analyse du cycle de vie, ce qui constituait par le fait même une approche novatrice pour les intervenants du milieu agricole. Cette caractéristique du projet impose aussi de la prudence dans l'interprétation de l'ensemble des résultats et au regard des conclusions générales que l'on peut en tirer. Cette prudence est nécessaire parce que ce projet a porté sur les données technico-économiques d'une seule année de production. Les résultats pourraient donc varier substantiellement si les données sous-jacentes englobaient plusieurs années de production. Aussi, ces résultats seraient plus valables, en particulier dans le contexte où la période étudiée embrassait tout un cycle de rotation des cultures. Ce facteur serait probablement déterminant, car le choix d'un système de production par un agriculteur ne se fait pas sur une base annuelle seulement, mais dans un contexte de plus long terme.

Cela dit, cette étude a permis de répondre aux objectifs visés initialement, dans la mesure où il était possible de le faire avec des données d'une seule année de production. Premièrement, il a été possible de « valider l'applicabilité des recherches agronomiques dans les conditions québécoises en fonction de la rentabilité de la production et de la qualité des grains ». Un exemple à cet égard sont les résultats associés aux parcelles AR avec herbicide en pré-semis, comparativement à ceux des parcelles AR sans herbicide en pré-semis. Cette portion de l'analyse a permis de constater que l'utilisation d'herbicides en pré-semis dans le système AR le rend comparable au système de production conventionnel au chapitre de l'éco-efficience. Deuxièmement, l'approche intégrée de l'analyse du cycle de vie et de l'éco-efficience a permis de « mesurer les impacts économiques et environnementaux comparatifs des pratiques agricoles en Agriculture Raisonnée®, conventionnelle et biologique en fonction de leur rentabilité respective ». L'éco-efficience globale, mesurée par l'analyse par enveloppement des données, permet une meilleure intégration des performances économique et environnementale que des indicateurs individuels et plus traditionnels de l'éco-efficience partielle.

Cette approche pourrait aussi être étendue à d'autres contextes de production. Avec des données technico-économiques à l'échelle de la ferme, l'éco-efficience pourrait être mesurée dans d'autres productions agricoles ou encore, à nouveau dans le blé comme dans les autres grandes cultures en englobant tout un cycle de rotation des cultures. À cet effet, l'utilisation de données technico-économiques recueillies à l'échelle de la ferme permet aussi une analyse de cycle de vie plus fine et tenant mieux compte du contexte réel de production et de l'hétérogénéité propre à ce contexte. En ce sens, l'analyse de cycle de vie réalisée dans ce projet est susceptible de mieux répondre aux attentes des intervenants qui souhaitent obtenir de l'information sur les impacts environnementaux qui soient moins génériques et plus spécifiques aux productions agricoles étudiées.

Une dernière conclusion peut être tirée relativement aux externalités environnementales qui peuvent être associées à certains systèmes de production. Les résultats de ce projet ont montré que dans le cas des systèmes conventionnel et intensif, le marché n'internalise pas les externalités environnementales puisqu'il vise en premier lieu à rémunérer le coût de production de l'agriculteur pour produire du blé sans viser un effet particulier sur la réduction des risques environnementaux. Pour ce qui est du blé produit selon les systèmes d'Agriculture Raisonnée® et biologique cependant, le prix plus élevé offert pour ces types de

blé incite les agriculteurs à réduire certaines externalités environnementales et en ce sens, le marché peut être vu dans ce cas comme une institution qui réussit à internaliser ces externalités. Or, ce phénomène est plutôt rare dans un libre marché et lorsqu'il se produit, ce n'est pas forcément parce que c'est là l'objectif des entreprises évoluant dans ce marché. Toutefois, en satisfaisant les préférences des consommateurs se préoccupant des enjeux environnementaux, ces entreprises se trouvent à concourir aux bénéfices publics associés à la protection de l'environnement.

## 8 Références

- Ahlgren, S. 2004. Environmental impact of chemical and mechanical weed control in agriculture – A comparing study using Life Cycle Assessment (LCA) methodology. SIK-rapport Nr 719 2004. 59 pages.
- ASABE. 2011. Agricultural Machinery Management Data. ASAE D497.7 MAR2011. 8 pages.
- ASABE. 2006. Agricultural Machinery Management. ASAE EP496.3 FEB2006. 6 pages.
- Basset-Mens, C., S. Ledgard et M. Boyes. 2009. Eco-efficiency of intensification scenarios for milk production in New Zealand. *Ecological Economics*, 68(6) : 1615-1625.
- Basset-Mens, C. et H. van der Werf. 2005. Scenario-based environmental assessment of farming systems: the case of pig production in France. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 105: 127-144.
- Breustedt, G., U. Latacz-Lohmann et T. Tiedemann. 2011. Organic or conventional? Optimal dairy farming technology under the EU milk quota system and organic subsidies. *Food Policy*, 36(2) : 223-229.
- Belzile, L. 2009. L'analyse économique du cycle de vie: revue de littérature. CIRAIQ - Centre interuniversitaire de recherche sur le cycle de vie des produits, procédés et services, 31 pages. [www.ciraig.org/pdf/Revue\\_de\\_litterature\\_luc\\_belzile.pdf](http://www.ciraig.org/pdf/Revue_de_litterature_luc_belzile.pdf) (consulté le 31 janvier 2014).
- Belzile, L. et J. Li. 2013. Analyse de la performance technico-économique et agroenvironnementale des fermes pomicoles québécoises. Rapport final. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement, 46 pages.
- Cedeberg, C. et A. Flysjo. 2004a. Environmental Assessment of Future Pig Farming Systems – Quantifications of Three Scenarios from the FOOD 21 Synthesis Work. SIK-rapport Nr 723 2004. 54 pages.
- Cedeberg, C. et A. Flysjo. 2004b. Life Cycle Inventory of 23 Dairy Farms in South-Western Sweden. SIK-rapport Nr 728 2004. 59 pages.
- Cedeberg, C. et B. Mattsson. 2000. Life cycle assessment of milk production – A comparison of conventional and organic farming. *Journal of Cleaner Production* 8: 49-60.
- Charnes, A., W.W. Cooper, E. Rhodes. 1978. Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2(6): 429-444.
- Cloutier, L.-M. et R. Rowley. 1993. Relative Technical Efficiency – Data Envelopment Analysis and Quebec dairy Farms. *Canadian Journal of Agricultural Economics*, 41(2): 169-176.
- Cooper, W.W., L.M. Seiford et K. Tone. 2007. Data envelopment analysis. A Comprehensive Text with Models, Applications, References and DES-Solver Software. Second Edition. Springer, 489 pp.
- CRAAQ. 2011. Machinerie – Coûts d'utilisation et taux à forfait suggérés. Avril 2011. 24 pages.
- CRAAQ. 2007a. Caractéristiques des effluents d'élevage – Production Porc (lisier). 7 pages.
- CRAAQ. 2007b. Caractéristiques des effluents d'élevage – Production Œufs de consommation (Fientes, fumiers et lisiers). 5 pages.

- CRAAQ. 2003a. Caractéristiques des effluents d'élevage – Production Laitière. 2 pages.
- CRAAQ. 2003b. Caractéristiques des effluents d'élevage – Production Volaille (poulets et dindons). 2 pages.
- Dalgaard, R., J. Schmidt, N. Halberg, P. Christensen, M. Thrane et W.A. Pengue. 2008. LCA of Soybean Meal. *International Journal of Life Cycle Assessment* 13: 240-254.
- Dalgaard, R. 2007. The environmental impact of pork production from a life cycle perspective. Ph.D. Thesis. University of Aarhus et Aalborg University. 135 pages.
- Emrouznejad A., B.R. Parker et G. Tavares. 2008. Evaluation of research in efficiency and productivity: A survey and analysis of the first 30 years of scholarly literature in DEA. *Socio-Economic Planning Sciences*, 42(3) : 151-157.
- Eriksson, I.S., H. Elmquist, S. Stern et T. Nybrant. 2005. Environmental Systems Analysis of Pig Production – The Impact of Feed Choice. *International Journal of Life Cycle Assessment* 10: 143-154.
- Farrell, M.J. 1957. The Measurement of Productive Efficiency. *Journal of the Royal Statistical Society*, 120 (III): 253-281.
- Gómez-Limón, J.A., A.J. Picazo-Tadeo et E. Reig-Martínez. 2012. Eco-efficiency assessment of olive farms in Andalusia. *Land Use Policy*, 29(2) : 395-406.
- Goulet, J. 2014. Réseau des grandes cultures du Québec (RGCQ). Communications personnelles, janvier 2014.
- Guinée, J.B. (Éditeur), M. Gorrée, R. Heijungs, G. Huppes, R. Kleijn, A. de Koning, L. Van Oers, A. Wegener Sleswijk, S. Suh, H.A. Udo de Haes, H. de Bruijn, R. van Duin et M.A.J. Huijbregts. 2002. *Handbook on Life Cycle Assessment – Operational Guide to the ISO Standards*. Kluwer Academic Publishers. 692 pages.
- Haas, G., F. Wetterich et U. Köpke. 2001. Comparing intensive, extensified and organic grassland farming in southern Germany by process life cycle assessment. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 83: 43-53.
- Hamelin, L., U. Jørgensen, B.M. Petersen, J.E. Olesen et H. Wenzel. 2012. Modelling the carbon and nitrogen balances of direct land use changes from energy crops in Denmark; a consequential life cycle inventory. *Global Change Biology Bioenergy* 4: 889-907
- Iribarren, D., I. Vázquez-Rowe, M.T. Moreira et G. Feijoo. 2010. Further potentials in the joint implementation of life cycle assessment and data envelopment analysis. *Science of The Total Environment*, 408(22) : 5265-5272.
- Iribarren, D., A. Hospido, M.T. Moreira et G. Feijoo. 2011. Benchmarking environmental and operational parameters through eco-efficiency criteria for dairy farms. *Science of The Total Environment*, 409(10) :1786-98.
- ISO 14044 (International Organization for Standardization). 2006. *Management environnemental – Analyse du cycle de vie – Principes et cadre*. 49 pages.
- Janzen, H.H., K.A. Beauchemin, Y. Bruinsma, C.A. Campbell, R.L. Desjardins, B.H. Ellert et E.G. Smith. 2003. The fate of nitrogen in agroecosystems: an illustration using Canadian estimates. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 67: 85–102.

- Kuosmanen, T. et M. Kortelainen. 2005. Measuring Eco-efficiency of Production with Data Envelopment Analysis. *Journal of Industrial Ecology*, 9 : 59–72.
- Landis, A., S. A. Miller et T. L. Theis. 2007. Life Cycle of the Corn-Soybean Agroecosystem for Biobased Production. *Environmental Science & Technology* 41: 1457-1464.
- Liu, J.S., L.Y.Y. Lu, W. Lu et B.J.Y. Lin. 2013a. Data envelopment analysis 1978–2010: A citation-based literature survey. *Omega*, 41(1) : 3-15.
- Liu, J.S., L.Y.Y. Lu, W. Lu et B.J.Y. Lin. 2013b. A survey of DEA applications. *Omega*, 41(5) : 893-902.
- Mattson, B., C. Cederberg et L. Blix. 2000. Àgricultural land use in life cycle assessment (LCA) : case studies of three vegetable oil crops. *Journal of Cleaner Production* 8: 283-292.
- Meisterling, K., C. Samaras et V. Schweizer. 2009. Decisions to reduce greenhouse gases from agriculture and product transport: LCA case study of organic and conventional wheat. *Journal of Cleaner Production*. 17:222-230.
- Michaud, A.R., M. Giroux, I. Beaudin, J. Desjardins, G. Gagné, M. Duchemin, J. Deslandes, C. Landry, P. Beudet et J. Lagacé. 2008. ODEP; un Outil de diagnostic des exportations de phosphore. Projet « Gestion du risque associé aux facteurs source et transport du phosphore des sols cultivés au Québec », réalisé dans le cadre de l'Initiative d'appui aux conseillers agricoles (PIACA-204). Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA) et le Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), Québec, Canada. 111 pages.
- Moreau, M. 2014. Groupes-conseils agricoles du Québec (GCAQ). Communications personnelles, janvier 2014.
- Nemecek, T., G. Gaillard, R. Freiermuth, A. Anton, A. Wilfart-Monziols et J. Hermansen. 2011. Good practice for life cycle inventories in agriculture (plant and animal production). 5 pages.
- Nemecek, T. et J. Schnetzer. 2011. Methods of assessment of direct field emissions for LCIs of agricultural production systems. 34 pages.
- Picazo-Tadeo, A.J., J.A. Gómez-Limón et E. Reig-Martínez. 2011. Assessing farming eco-efficiency: A Data Envelopment Analysis approach. *Journal of Environmental Management*, 92 (4) : 1154-1164.
- Rotz, C.A., M.S. Corson, D.S. Chianese, F. Montes, S.D. Hafner, R. Jarvis et C.U. Coiner. 2011. The integrated farm system model - Reference Manual - Version 3.4. USDA. 188 pages.
- Sanjuan, N., J. Ribal, G. Clemente et M.L. Fenollosa. 2011. Measuring and Improving Eco-efficiency Using Data Envelopment Analysis. *Journal of Industrial Ecology*, 15: 614–628.
- Snyder, C.S., T.W. Bruulsema, T.L. Jensen et P.E. Fixen. 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 113 :247-266.
- Sonesson, U. 2005. Environmental Assessment of Future Dairy Farming Systems – Quantifications of Two Scenarios. SIK-rapport Nr 741 2005. 35 pages.

Thomassen, M.A., R. Dalgaard, R. Heijungs et I. de Boer. 2008. Attributional and Consequential LCA of milk production. *International Journal of Life Cycle Assessment* 13: 339-349.

World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) :

- 2000a. Measuring eco-efficiency: a guide to reporting company performance. WBCSD, 36 pages.
- 2000b. Eco-efficiency: creating more value with less impact. WBCSD, 32 pages.

## **Annexe A Références technico-économiques relatives au calcul de la marge de production**

Tableau A.1 Références des prix des intrants

| Produit<br>(Herbicide/<br>Fongicide) | groupe | Concentration<br>/Formule                   | Dose<br>recommandée | Volume d'eau<br>nécessaire | Prix ref.                | Prix par<br>hectare | Source de référence  |
|--------------------------------------|--------|---|---------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------|--|
| Nitrate<br>d'ammonium<br>calcique    | n/a    | 27-0-0                                      | -                   | -                          | 624\$/tonne <sup>3</sup> | -                   | AGDEX540/855(2013)   |
| Fumier/Lisier                        | n/a    | -   | -                   | -                          | 2\$/kg N-org             | -                   | Prix du nitrate d'ammonium calcique  |
| Roundup<br>weathermax                | 9      | 540g/L                                      | 0,5-2,33L/ha        | 50-300L/ha                 | 8,1\$/L                  | 4,05-18,87\$        | Fiche technique-MONSANTO CANADA<br>INC.; AGDEX 605/855(2013)                   |
| Buctril M                            | 6/4    | 560g/L                                      | 1L/ha               | 50-100L/ha                 | 18,16\$/L                | 18,16 \$            | Fiche technique-Bayer CropScience Inc. ;<br>AGDEX605/855(2013)                 |
| Eragon                               | 14     | 70%   | 36g/ha              | utilisé dans un<br>mélange | 0,424\$/g                | 15,26\$/ha          | Fiche technique-BASF Canada<br>Inc.; AGDEX 605/855(2013)                       |
| MCPA                                 | 4      | 500g/L                                      | 550ml -<br>1,75L/ha | 50-200L/ha                 | 10,49\$/L                | -                   | Fiche technique-Loveland products<br>Canada Inc.; AGDEX 605/855(2013)          |
| Infinity                             | 6 & 27 | Pyrasulfotole37,5g/L et<br>Bromoxynil210g/L | 0,48L/ha            | min.46,8L/ha               | 30,36\$/L                | 14,57\$/ha          | Fiche technique-Bayer CropScience Inc. ;<br>AGDEX605/855(2013)                 |
| Refine SG                            | 2/2    | 33,35%                                      | 30g/ha              | min 55L/ha                 | 0,66\$/g                 | 19,80 \$            | Fiche technique-E. I. du Pont Canada<br>Company; AGDEX 605/855(2013)           |
| Quilt                                | 3/11   | 75g/L-125g/L                                | 0,75-1L/ha          | 100L/ha                    | 37,43\$/L                | -                   | Fiche technique-Syngenta protection des<br>cultures Canada, Inc. AGDEX 605/855 |
| Folicur 432F                         | 3      | 432g/L                                      | 292ml/ha            | 100L/ha                    | 115,97\$/L               | 33,86\$/ha          | Fiche technique-Bayer CropScience Inc. ;<br>AGDEX605/855(2013)                 |
| Twinline                             | 3/11   |   | 0,5L/ha             | min.100L/ha                | 56\$/L                   | 28,00 \$            | Fiche technique-BASF Canada Inc.; Prix-<br>données des fermes.                 |
| Caramba                              | 3      | 90g/L                                       | 1L/ha               | min.100L/ha                | 43,38 \$                 | 43,38 \$            | Fiche technique-BASF Canada Inc.;<br>AGDEX 605/855(2013)                       |
| Régulateur de<br>croissance          |        |   |                     |                            |                          |                     |  |
| Ethrel                               |        | 240g/L                                      | 1-1,5L/ha           | 100-300L/ha                | 21,91\$/L                | 21,91-32,87\$       | Fiche technique-Bayer CropScience Inc. ;<br>AGDEX605/855(2013)                 |

<sup>3</sup> Le prix de l'azote est calculé à 2\$/kilogramme. L'efficacité du N-organique est 70% pour les fumiers de poulet et 90% pour les lisiers. (ex : 1kg d'azote N-organique dans le fumier de poulet = 0,7kg N-chimique)

Tableau A.2 Référence des prix des semences

| Semence (culture intercalaire)    | Contenant (kilogramme) | Prix plus bas (\$) | Prix plus haut (\$) | Prix moyenne (\$) | Prix par unité (\$/kilogramme) | Source de référence     |
|-----------------------------------|------------------------|--------------------|---------------------|-------------------|--------------------------------|-------------------------|
| Trèfle blanc                      | 25                     | 202,19             | 248                 | 225,09            | 9,00                           | AGDEX 100.45/885 (2013) |
| Trèfle rouge                      | 25                     | 182,69             | 235,94              | 209,14            | 8,37                           |                         |
| Luzerne                           | 25                     | 217                | 326,31              | 281,93            | 11,27                          |                         |
| Féтуque                           | 25                     | 151,79             | 187,31              | 161,6             | 6,46                           |                         |
| Ray-grass                         | 25                     | 78,25              | 135,35              | 105,03            | 4,20                           |                         |
| Trèfle Alsike                     | 25                     | 153,42             | 153,42              | 153,42            | 6,14                           |                         |
| Millet                            | 25                     | 75,46              | 75,46               | 75,46             | 3,02                           |                         |
| <b>Semence de blé planifiable</b> | 25                     | 23,08              | 25,13               | 24,14             | 0,96 <sup>4</sup>              |                         |

Tableau A.3 Efficacité des machineries

| Machine                           | Efficacité au champ (%) | retenue <sup>5</sup> | Source de référence                   |
|-----------------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| Charrue, Chisel, Herse            | 70-90%                  | 85%                  | Référence: CRAAQ AGDEX 740 (sep.2008) |
| Peigne                            | 70-85%                  | 80%                  |                                       |
| Semoir en ligne, Semi-direct      | 55-80%                  | 60%                  |                                       |
| Pulvérisateur                     | 50-80%                  |                      |                                       |
| 575-765L                          |                         | 50%                  |                                       |
| 1915-2840L                        |                         | 60%                  |                                       |
| >3000L                            |                         | 70%                  |                                       |
| Épandeur de fumier/lisier liquide | 60-80%                  | 60-73%               |                                       |
| Épandeur de fumier solide         | 60-80%                  | 60-76%               |                                       |
| Épandeur d'engrais minéral        | 60-80%                  | 70%                  |                                       |
| Moissonneuse-Batteuse             | 65-80%                  | 70%                  |                                       |

<sup>4</sup> Le prix des semences de blé dans notre étude est calculé à 0,95\$/kg

<sup>5</sup> Niveau d'efficacité utilisé dans les calculs des émissions de CO<sub>2</sub>e<sub>q</sub> des opérations culturales en cas où cette information n'est pas fournie par les fermes.

Tableau A.4 Résumé des parcelles expérimentales (1)

| Blé d'automne                        | Obs. 12 parcelles |      | Régie conventionnelle |      | Régie agriculture raisonnée |      | Obs. 4 parcelles  |      |
|--------------------------------------|-------------------|------|-----------------------|------|-----------------------------|------|-------------------|------|
|                                      | Régie intensive   |      |                       |      |                             |      |                   |      |
| Opération                            | Total (parcelles) | %    | Total (parcelles)     | %    | Total (parcelles)           | %    | Total (parcelles) | %    |
| Herbicide avant semi                 | 6                 | 50%  | 4                     | 44%  | 2                           | 50%  | 2                 | 50%  |
| Travaux d'automne                    | 6                 | 50%  | 3                     | 33%  | 2                           | 50%  | 2                 | 50%  |
| Fumier/Lisier                        | 6                 | 50%  | 3                     | 33%  | 2                           | 50%  | 2                 | 50%  |
| Travaux de printemps 1 passage       | 0                 | 0%   | 0                     | 0%   | 0                           | 0%   | 0                 | 0%   |
| Travaux de printemps 2 passages      | 1                 | 8%   | 0                     | 0%   | 0                           | 0%   | 0                 | 0%   |
| Semi direct/pas de travaux de sol    | 6                 | 50%  | 6                     | 67%  | 2                           | 50%  | 2                 | 50%  |
| Semis                                | 12                | 100% | 9                     | 100% | 4                           | 100% | 4                 | 100% |
| Semis-engrais vert                   | 0                 | 0%   | 0                     | 0%   | 0                           | 0%   | 0                 | 0%   |
| Rouleau                              | 3                 | 25%  | 2                     | 22%  | 0                           | 0%   | 0                 | 0%   |
| Utilisation des peignes              | 0                 | 0%   | 0                     | 0%   | 0                           | 0%   | 0                 | 0%   |
| 1 <sup>e</sup> Application N         | 4                 | 33%  | 2                     | 22%  | 2                           | 50%  | 2                 | 50%  |
| 2 <sup>e</sup> Application N         | 4                 | 33%  | 4                     | 44%  | 2                           | 50%  | 2                 | 50%  |
| Application N au tallage             | 12                | 100% | 9                     | 100% | 4                           | 100% | 4                 | 100% |
| Fongicide 1 <sup>e</sup> application | 11                | 92%  | 0                     | 0%   | 0                           | 0%   | 0                 | 0%   |
| Herbicide 1 <sup>e</sup> application | 4                 | 33%  | 4                     | 44%  | 0                           | 0%   | 0                 | 0%   |
| Herbicide 2 <sup>e</sup> application | 0                 | 0%   | 0                     | 0%   | 0                           | 0%   | 0                 | 0%   |
| Application N à la montaison         | 12                | 100% | 7                     | 78%  | 2                           | 50%  | 2                 | 50%  |
| Régulateur de croissance             | 12                | 100% | 1                     | 11%  | 0                           | 0%   | 0                 | 0%   |
| Fongicide 2 <sup>e</sup> application | 10                | 83%  | 7                     | 78%  | 0                           | 0%   | 0                 | 0%   |
| Récolte                              | 12                | 100% | 9                     | 100% | 4                           | 100% | 4                 | 100% |
| Récolte à forfait                    | 5                 | 42%  | 2                     | 22%  | 2                           | 50%  | 2                 | 50%  |
| Séchage                              | 12                | 100% | 9                     | 100% | 4                           | 100% | 4                 | 100% |
| Séchage au centre des grains         | 5                 | 42%  | 2                     | 22%  | 2                           | 50%  | 2                 | 50%  |

Tableau A.5 Résumé des parcelles expérimentales (2)

| Blé d'automne_                      | Régie biologique  |                    |
|-------------------------------------|-------------------|--------------------|
|                                     | Total (parcelles) | Obs. 4 parcelles % |
| <b>Opération</b>                    |                   |                    |
| Travaux d'automne                   | 1                 | 25%                |
| Travaux de printemps 1 passage      | 0                 | 0%                 |
| Travaux de printemps 2 passages     | 0                 | 0%                 |
| Semi direct / pas de travaux de sol | 3                 | 75%                |
| Semis                               | 4                 | 100%               |
| Semis- engrais vert                 | 1                 | 25%                |
| Rouleau                             | 0                 | 0%                 |
| Fumier/Lisier                       | 4                 | 100%               |
| Engrais organique                   | 0                 | 0%                 |
| Utilisation des peignes             | 0                 | 0%                 |
| Récolte                             | 4                 | 100%               |
| Récolte à forfait                   | 3                 | 75%                |
| Séchage                             | 4                 | 100%               |

Tableau A.6 Résumé des parcelles expérimentales (3)

| Blé de printemps                     | Obs. 14 parcelles |      | Régie conventionnelle |      | Obs. 10 parcelles |      | Régie agriculture raisonnée |      | Obs. 10 parcelles |      |
|--------------------------------------|-------------------|------|-----------------------|------|-------------------|------|-----------------------------|------|-------------------|------|
|                                      | Régie intensive   |      |                       |      |                   |      |                             |      |                   |      |
| Opération                            | Total (parcelles) | %    | Total (parcelles)     | %    | Total (parcelles) | %    | Total (parcelles)           | %    | Total (parcelles) | %    |
| Herbicide avant semis                | 4                 | 29%  | 5                     | 50%  | 2                 | 20%  | 2                           | 20%  | 2                 | 20%  |
| Travaux d'automne                    | 13                | 93%  | 9                     | 90%  | 10                | 100% | 10                          | 100% | 10                | 100% |
| Fumier/Lisier                        | 1                 | 7%   | 2                     | 20%  | 2                 | 20%  | 2                           | 20%  | 2                 | 20%  |
| Travaux de printemps 1 passage       | 5                 | 36%  | 6                     | 60%  | 6                 | 60%  | 6                           | 60%  | 6                 | 60%  |
| Travaux de printemps 2 passages      | 2                 | 14%  | 2                     | 20%  | 2                 | 20%  | 2                           | 20%  | 2                 | 20%  |
| Semi direct/pas de travaux de sol    | 1                 | 7%   | 1                     | 10%  | 0                 | 0%   | 0                           | 0%   | 0                 | 0%   |
| Semis                                | 14                | 100% | 10                    | 100% | 10                | 100% | 10                          | 100% | 10                | 100% |
| Semis-engrais vert                   | 0                 | 0%   | 0                     | 0%   | 0                 | 0%   | 0                           | 0%   | 0                 | 0%   |
| Rouleau                              | 3                 | 21%  | 4                     | 40%  | 4                 | 40%  | 4                           | 40%  | 4                 | 40%  |
| 1 <sup>e</sup> Application N         | 3                 | 21%  | 4                     | 40%  | 4                 | 40%  | 4                           | 40%  | 4                 | 40%  |
| 2 <sup>e</sup> Application N         | 6                 | 43%  | 7                     | 70%  | 6                 | 60%  | 6                           | 60%  | 6                 | 60%  |
| Fongicide 1 <sup>e</sup> application | 14                | 100% | 1                     | 10%  | 0                 | 0%   | 0                           | 0%   | 0                 | 0%   |
| Utilisation des peignes              | 0                 | 0%   | 0                     | 0%   | 0                 | 0%   | 0                           | 0%   | 0                 | 0%   |
| Application N au tallage             | 12                | 86%  | 8                     | 80%  | 8                 | 80%  | 8                           | 80%  | 8                 | 80%  |
| Herbicide 1 <sup>e</sup> application | 8                 | 57%  | 9                     | 90%  | 2                 | 20%  | 2                           | 20%  | 2                 | 20%  |
| Herbicide 2 <sup>e</sup> application | 0                 | 0%   | 0                     | 0%   | 0                 | 0%   | 0                           | 0%   | 0                 | 0%   |
| Application N à la montaison         | 12                | 86%  | 3                     | 30%  | 4                 | 40%  | 4                           | 40%  | 4                 | 40%  |
| Régulateur de croissance             | 4                 | 29%  | 1                     | 10%  | 0                 | 0%   | 0                           | 0%   | 0                 | 0%   |
| Fongicide 2 <sup>e</sup> application | 12                | 86%  | 7                     | 70%  | 0                 | 0%   | 0                           | 0%   | 0                 | 0%   |
| Récolte                              | 14                | 100% | 10                    | 100% | 10                | 100% | 10                          | 100% | 10                | 100% |
| Récolte à forfait                    | 0                 | 0%   | 0                     | 0%   | 0                 | 0%   | 0                           | 0%   | 0                 | 0%   |
| Séchage                              | 14                | 100% | 10                    | 100% | 10                | 100% | 10                          | 100% | 10                | 100% |
| Séchage au centre des grains         | 13                | 93%  | 9                     | 90%  | 10                | 100% | 10                          | 100% | 10                | 100% |

Tableau A.7 Résumé des parcelles expérimentales (4)

| Blé de printemps<br>Opération       | Régie biologique  | Obs. 11<br>parcelles |
|-------------------------------------|-------------------|----------------------|
|                                     | Total (parcelles) | %                    |
| Travaux d'automne                   | 11                | 100%                 |
| Travaux de printemps 1 passage      | 4                 | 36%                  |
| Travaux de printemps 2 passages     | 7                 | 64%                  |
| Semi direct / pas de travaux de sol | 0                 | 0%                   |
| Semis                               | 11                | 100%                 |
| Semis- engrais vert                 | 8                 | 73%                  |
| Rouleau                             | 3                 | 27%                  |
| Fumier/Lisier                       | 7                 | 64%                  |
| Engrais organique                   | 1                 | 9%                   |
| Utilisation des peignes             | 7                 | 64%                  |
| Récolte                             | 11                | 100%                 |
| Récolte à forfait                   | 0                 | 0%                   |
| Séchage                             | 11                | 100%                 |

Tableau A.8 Machineries – Régie non-biologique intensive, conventionnelle et agriculture raisonnée)

|            | Régies non-biologiques                       | Charrue               | obs.3     | Chisel     | obs.2     | Herse à disque | obs.3     | Vibro      | obs.3     | Cultivateur | obs.2     | Épandeur_Fumier/lisier | obs.3     |
|------------|--|-----------------------|-----------|------------|-----------|----------------|-----------|------------|-----------|-------------|-----------|------------------------|-----------|
|            | Moy.   | E.T.                  | Moy.      | E.T.       | Moy.      | E.T.           | Moy.      | E.T.       | Moy.      | E.T.        | Moy.      | E.T.                   |           |
| Équipement | Largeur (m)                                  | 2,65                  | 0,48      | 2,50       | -         | 4,95           | 1,65      | 7,95       | 0,49      | 9,05        | 2,05      | 7,99                   | 4,27      |
|            | Vitesse de travail (km/heure)                | 7,67                  | 2,52      | 10,00      | 2,83      | 13,67          | 1,53      | 10,00      | 1,00      | 11,50       | 0,71      | 9,50                   | 2,89      |
|            | Profondeur de travail (cm)                   | 16,93                 | 1,67      | 20,00      |           | 5,75           | 3,18      | 7,54       | 2,50      | 7,50        | 3,54      | -                      | -         |
|            | Capacité de chargement (tonnes)              | -                     | -         | -          | -         | -              | -         | -          | -         | -           | -         | -                      | -         |
|            | Capacité de remplissage (gallons)            | -                     | -         | -          | -         | -              | -         | -          | -         | -           | -         | 5366,00                | 602,00    |
|            | Valeur à neuf (\$)                           | 42 667 \$             | 23 692 \$ | 15 000 \$  |           | 38 750 \$      | 5 303 \$  | 38 667 \$  | 18 583 \$ | 38 000 \$   | 16 971 \$ | 73 750 \$              | 11 500 \$ |
|            | Utilisation annuelle (heure/an)              | 170                   | 170       | 45         | -         | 75             | 35        | 65         | 21        | 150         | -         | 218                    | 196       |
|            | Âge actuel (année)                           | 11                    | 8         | 10         | 7         | 4              | 2         | 19         | 12        | 8           | 1         | 11                     | 13        |
| Tracteur   | Puissance du tracteur utilisé (kW)           | 145                   | 15        | 142        | 10        | 144            | 21        | 242        | 26        | 134         | -         | 192                    | 36        |
|            | Type de traction                             | Quatre roues motrices |           |            |           |                |           |            |           |             |           |                        |           |
|            | Type de carburant                            | Diesel                |           |            |           |                |           |            |           |             |           |                        |           |
|            | Valeur à neuf tracteur(\$)                   | 145 000 \$            | 8 660 \$  | 150 000 \$ | 70 711 \$ | 133 333 \$     | 70 238 \$ | 241 667 \$ | 14 434 \$ | 140 000 \$  | -         | 197 750 \$             | 60 830 \$ |
|            | Utilisation annuelle du tracteur (heures/an) | 533,33                | 351,19    | 1250,00    | 1060,66   | 883,33         | 975,11    | 305,00     | 192,55    | 500,00      | -         | 525,00                 | 287,23    |
|            | Âge actuel du tracteur (an)                  | 9                     | 5         | 8          | 4         | 9              | 3         | 10         | 6         | 12          | -         | 4                      | 1         |

Tableau A.9 Machineries – Régie-non biologique (intensive, conventionnelle et agriculture raisonnée) (suite)

| Régies non-biologiques |  | Semoir                |           | Pulvérisateur |           | Épandeur-engrais Chimique |           | Moissonneuse-batteuse |           |
|------------------------|--|-----------------------|-----------|---------------|-----------|---------------------------|-----------|-----------------------|-----------|
|                        |  | obs.10                | obs.10    | obs.11        | obs.11    | obs.10                    | obs.10    | obs.9                 | obs.9     |
|                        |  | Moy.                  | E.T.      | Moy.          | E.T.      | Moy.                      | E.T.      | Moy.                  | E.T.      |
| Équipement             | Largeur (m)                                  | 8,35                  | 7,08      | 23,39         | 7,53      | 23,98                     | 7,43      | 8,80                  | 2,63      |
|                        | Vitesse de travail (km/heure)                | 9,89                  | 2,03      | 11,89         | 5,42      | 15,40                     | 2,99      | 4,39                  | 0,79      |
|                        | Profondeur de travail (cm)                   | 2,62                  | 0,78      | -             | -         | -                         | -         | -                     | -         |
|                        | Capacité de chargement (tonnes)              | -                     | -         | -             | -         | 3,70                      | 0,42      | -                     | -         |
|                        | Capacité de remplissage (gallons)            | -                     | -         | -             | -         | 3500                      | -         | -                     | -         |
|                        | Valeur à neuf (\$)                           | 71 100 \$             | 54 852 \$ | 84 591 \$     | 85 675 \$ | 19 611 \$                 | 7 976 \$  | 395 333 \$            | 84 976 \$ |
|                        | Utilisation annuelle (heure/an)              | 89                    | 79        | 128           | 112       | 36                        | 28        | 386                   | 340       |
|                        | Âge actuel (année)                           | 8                     | 7         | 6             | 6         | 10                        | 14        | 8                     | 9         |
|                        | Puissance du tracteur utilisé (kW)           | 150                   | 46        | 114           | 42        | 122                       | 52        | 294                   | 87        |
| Tracteur               | Type de traction                             | Quatre roues motrices |           |               |           |                           |           |                       |           |
|                        | Type de carburant                            | Diesel                |           |               |           |                           |           |                       |           |
|                        | Valeur à neuf tracteur(\$)                   | 145 727 \$            | 91 503 \$ | 109 100 \$    | 73 661 \$ | 120 455 \$                | 73 534 \$ | -                     | -         |
|                        | Utilisation annuelle du tracteur (heures/an) | 631,82                | 504,49    | 488,18        | 233,26    | 652,27                    | 508,24    | -                     | -         |
|                        | Âge actuel du tracteur (an)                  | 7                     | 5         | 8             | 7         | 9                         | 6         | -                     | -         |

Tableau A.10 Machinerie-Régie biologique

| Régie biologique                             | Charrue                                 |                  | Chisel                |            | Vibro     |            | Cultivateur |            | Épandeur - Fumier/lisier |            | Semoir    |            | Moissonneuse-batteuse |            |            |
|--|---|------------------|-----------------------|------------|-----------|------------|-------------|------------|--------------------------|------------|-----------|------------|-----------------------|------------|------------|
|  | Moy.                                    | obs.3 E.T.       | Moy.                  | obs.3 E.T. | Moy.      | obs.2 E.T. | Moy.        | obs.2 E.T. | Moy.                     | obs.5 E.T. | Moy.      | obs.7 E.T. | Moy.                  | obs.7 E.T. |            |
| Équipement                                   | Largeur (m)                             | 3,80             | 3,64                  | 5,98       | 2,80      | 6,70       | 0,86        | 10,21      | 3,49                     | 6,04       | 1,28      | 7,03       | 3,11                  | 7,51       | 2,65       |
|  | Vitesse de travail (km/heure)           | 5,65             | 1,91                  | 9,00       | 1,00      | 8,00       | -           | 10,38      | 1,61                     | 11,25      | 1,19      | 9,14       | 3,44                  | 6,07       | 1,56       |
|  | Profondeur de travail (cm)              | 17,83            | 0,29                  | 19,17      | 5,20      | 5,00       | -           | 8,76       | 1,75                     | -          | -         | 3,01       | 1,11                  | -          | -          |
|  | Capacité de chargement (tonnes)         | -                | -                     | -          | -         | -          | -           | -          | -                        | 6,00       | -         | 1,80       | -                     | 3,25       | 0,35       |
|  | Capacité de remplissage (gallons ou m3) | -                | -                     | -          | -         | -          | -           | -          | -                        | 21,50      | 16,26     | -          | -                     | -          | -          |
|  | Valeur à neuf (\$)                      | 7 833 \$         | 3 753 \$              | 56 333 \$  | 12 662 \$ | 8 500 \$   | 707 \$      | 43 200 \$  | 23 435 \$                | 51 400 \$  | 34 443 \$ | 50 083 \$  | 50 385 \$             | 243 571 \$ | 216 116 \$ |
|  | Utilisation annuelle (heure/an)         | 85               | -                     | 183        | 29        | -          | -           | 262        | 368                      | 186        | 90        | 44         | 20                    | 128        | 189        |
|  | Âge actuel (année)                      | 17,00            | 2,83                  | 1,67       | 1,15      | 15,00      | -           | 11,25      | 6,29                     | 11,40      | 7,02      | 12,57      | 8,81                  | 12,57      | 9,98       |
|  | Puissance du tracteur utilisé (kW)      | 88,00            | 10,39                 | 277,33     | 46,58     | 82,00      | -           | 243,75     | 82,26                    | 145,63     | 96,52     | 94,40      | 33,63                 | 233,21     | 118,72     |
|  | Tracteur                                | Type de traction | Quatre roues motrices |            |           |            |             |            |                          |            |           |            |                       |            |            |
| Type de carburant                            |   | Diesel           |                       |            |           |            |             |            |                          |            |           |            |                       |            |            |
| Valeur à neuf tracteur(\$)                   |   | 42 333 \$        | 15 044 \$             | 275 000 \$ | 66 144 \$ | 45 000 \$  | 9 899 \$    | 198 400 \$ | 101 908 \$               | 132 400 \$ | 87 386 \$ | 100 714 \$ | 64 319 \$             | -          | -          |
| Utilisation annuelle du tracteur (heures/an) |   | 267              | 29                    | 667        | 351       | 225        | 35          | 585        | 312                      | 610        | 251       | 467        | 309                   | -          | -          |
| Âge actuel du tracteur (an)                  |   | 15,00            | 3,46                  | 5,67       | 8,14      | 13,00      | -           | 8,58       | 5,17                     | 6,00       | 4,90      | 7,33       | 6,42                  | -          | -          |

## **Annexe B Exemple numérique de la programmation linéaire**

Exemple: un système de production avec deux intrants et un extrant ( Cooper et al., 2007)

Supposons que 6 fermes utilisent deux intrants de production pour produire une unité d'extrait ( $y$ ) :

| Ferme       | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6  |
|-------------|---|---|---|---|---|----|
| Intrant 1   | 4 | 7 | 8 | 4 | 2 | 10 |
| Intrant 2   | 3 | 3 | 1 | 2 | 4 | 1  |
| Extrait $y$ | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  |

Le programme linéaire de la ferme 1 est écrit de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \max_{0 \leq x \leq 1} \theta &= uy \\ \text{s.c.} \quad &4x_1 + 3x_2 = 1 \\ &4x_1 + 3x_2 \geq u(1) && 7x_1 + 3x_2 \geq u(2) \\ &8x_1 + x_2 \geq u(3) && 4x_1 + 2x_2 \geq u(4) \\ &2x_1 + 4x_2 \geq u(5) && 10x_1 + x_2 \geq u(6) \\ &x_1, x_2, u \geq 0 \end{aligned}$$

Où  $x_1, x_2$  représentent les « poids » de chaque intrant,  $u$  représente le score d'efficacité de la ferme. Pour résoudre le programme linéaire,  $x_2$  peut être exprimé par l'équation suivante :  $x_1$ ,

$$x_2 = \frac{(1 - 4x_1)}{3}$$

et

$$\begin{aligned} 4x_1 + 3 \times \frac{(1 - 4x_1)}{3} &\geq u(1) && 7x_1 + 3 \times \frac{(1 - 4x_1)}{3} &\geq u(2) \\ 8x_1 + \frac{(1 - 4x_1)}{3} &\geq u(3) && 4x_1 + 2 \times \frac{(1 - 4x_1)}{3} &\geq u(4) \\ 2x_1 + 4 \times \frac{(1 - 4x_1)}{3} &\geq u(5) && 10x_1 + \frac{(1 - 4x_1)}{3} &\geq u(6) \end{aligned}$$

Nous obtenons ensuite une relation entre  $x_1$  et  $u$ , les solutions optimales est  $x^*_1 = 0,1429$ ;  $x^*_2 = 0,1429$ ;  $u^* = 0,8571$

Le score d'efficacité de la ferme 1 est 0,86 et le poids de chaque intrant de production est 0,14.

Le programme linéaire de la ferme 2 :

$$\begin{aligned} \max_{0 \leq x \leq 1} \theta &= uy \\ \text{s.c.} \quad &7x_1 + 3x_2 = 1 \\ &4x_1 + 3x_2 \geq u(1) && 7x_1 + 3x_2 \geq u(2) \\ &8x_1 + x_2 \geq u(3) && 4x_1 + 2x_2 \geq u(4) \\ &2x_1 + 4x_2 \geq u(5) && 10x_1 + x_2 \geq u(6) \\ &x_1, x_2, u \geq 0 \end{aligned}$$

La solution optimale pour la ferme 2 est  $x^*_1 = 0,0526$ ;  $x^*_2 = 0,2105$ ;  $u^* = 0,6316$

Le programme linéaire de la ferme 3 :

$$\begin{array}{ll}
 \max_{0 \leq x \leq 1} \theta = uy & \\
 \text{s.c.} & 8x_1 + x_2 = 1 \\
 4x_1 + 3x_2 \geq u(1) & 7x_1 + 3x_2 \geq u(2) \\
 8x_1 + x_2 \geq u(3) & 4x_1 + 2x_2 \geq u(4) \\
 2x_1 + 4x_2 \geq u(5) & 10x_1 + x_2 \geq u(6) \\
 & x_1, x_2, u \geq 0
 \end{array}$$

La solution optimale pour la ferme 3 est  $x^*_1 = 0,0833$ ;  $x^*_2 = 0,3333$ ;  $u^* = 1$

Le programme linéaire de la ferme 4 :

$$\begin{array}{ll}
 \max_{0 \leq x \leq 1} \theta = uy & \\
 \text{s.c.} & 4x_1 + 2x_2 = 1 \\
 4x_1 + 3x_2 \geq u(1) & 7x_1 + 3x_2 \geq u(2) \\
 8x_1 + x_2 \geq u(3) & 4x_1 + 2x_2 \geq u(4) \\
 2x_1 + 4x_2 \geq u(5) & 10x_1 + x_2 \geq u(6) \\
 & x_1, x_2, u \geq 0
 \end{array}$$

La solution optimale pour la ferme 4 est  $x^*_1 = 0,1667$ ;  $x^*_2 = 0,1667$ ;  $u^* = 1$

Le programme linéaire de la ferme 5 :

$$\begin{array}{ll}
 \max_{0 \leq x \leq 1} \theta = uy & \\
 \text{s.c.} & 2x_1 + 4x_2 = 1 \\
 4x_1 + 3x_2 \geq u(1) & 7x_1 + 3x_2 \geq u(2) \\
 8x_1 + x_2 \geq u(3) & 4x_1 + 2x_2 \geq u(4) \\
 2x_1 + 4x_2 \geq u(5) & 10x_1 + x_2 \geq u(6) \\
 & x_1, x_2, u \geq 0
 \end{array}$$

La solution optimale pour la ferme 5 est  $x^*_1 = 0,2143$ ;  $x^*_2 = 0,1429$ ;  $u^* = 1$

Le programme linéaire de la ferme 6 :

$$\begin{array}{ll}
 \max_{0 \leq x \leq 1} \theta = uy & \\
 \text{s.c.} & 10x_1 + x_2 = 1 \\
 4x_1 + 3x_2 \geq u(1) & 7x_1 + 3x_2 \geq u(2) \\
 8x_1 + x_2 \geq u(3) & 4x_1 + 2x_2 \geq u(4) \\
 2x_1 + 4x_2 \geq u(5) & 10x_1 + x_2 \geq u(6) \\
 & x_1, x_2, u \geq 0
 \end{array}$$

La solution optimale pour la ferme est  $x^*_1 = 0$ ;  $x^*_2 = 1$ ;  $u^* = 1$

Les fermes ayant un score de « 1 » ( $u=1$ ) sont les plus efficaces.

La frontière d'efficacité peut être présentée graphiquement :

