

NDEGUE FONGUE MOÏSE KOUAKOU

**EFFICIENCE TECHNIQUE ET EFFICIENCE
ENVIRONNEMENTALE EN AGRICULTURE**

Mémoire présenté
à la Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université Laval
dans le cadre du programme de maîtrise en économique
pour l'obtention du grade de Maître ès arts (M.A)

DÉPARTEMENT D'ÉCONOMIQUE
FACULTÉ DES SCIENCES SOCIALES
UNIVERSITÉ LAVAL
QUÉBEC

2011

Résumé

Malgré l'imposition de diverses normes environnementales strictes au Québec, la pollution agricole, et plus spécifiquement la qualité de l'eau, demeurent problématiques dans la région de Chaudière-Appalaches. Cette région est intensive en productions animale et végétale ce qui entraîne des surplus de phosphore, d'azote et de sédiments. L'objectif que nous poursuivons à travers cette étude est d'évaluer l'efficacité technique et l'efficacité environnementale des producteurs agricoles du bassin de la rivière Chaudière localisé au Sud de la ville de Québec. De plus, nous évaluons le degré de corrélation existant entre les deux mesures d'efficacité. Nous analysons les liens entre les mesures d'efficacité et les caractéristiques des fermes et des opérateurs. Nous adoptons une approche stochastique paramétrique appliquée aux fonctions de distance pour analyser les efficacités techniques et environnementales des exploitations agricoles. Les données utilisées ont été collectées en 2005 et portent sur 210 fermes agricoles. Les résultats obtenus montrent qu'il existe une forte corrélation entre les deux efficacités. De plus, comme le montrent d'autres études, la performance environnementale entraîne des coûts additionnels au niveau des exploitations agricoles.

Avant-propos

Tout d'abord, j'adresse mes sincères remerciements à mon directeur de recherche, le professeur Bruno Larue et à mon codirecteur, le professeur Lota D. Tamini pour leurs nombreux conseils et le temps qu'ils ont investi dans ma formation de chercheur.

Je suis particulièrement reconnaissant pour le soutien financier offert par le programme « Évaluation des Pratiques de Gestion Bénéfiques à l'Échelle des Bassins Hydrographiques » d'Agriculture et Agroalimentaire Canada.

J'aimerais aussi remercier mes amis étudiants au CRÉA pour leurs encouragements. Finalement, j'aimerais remercier ma famille pour leur soutien financier, moral et spirituel. Je dédie ce mémoire à ma fille Marina Fongué, ma mère Rita d'Almeida (feu) et ma grand-mère Akofala Grunitzky Baëta (feu).

Table des matières

Résumé.....	ii
Avant-propos.....	iii
Table des matières.....	iv
Liste des tableaux.....	v
Liste des graphiques et figures.....	vi
Chapitre 1	1
Introduction et problématique de recherche.....	1
Pression environnementale de l'agriculture et adoption de mesures réglementaires ...	4
2. 1. Situation problématique : la pression de l'agriculture sur l'environnement.....	4
2.2. L'adoption de PGB comme moyen d'atténuer la pression environnementale des activités agricoles.....	5
2.3. La réglementation comme moyen d'encourager l'adoption de PGB.....	7
2.4. Conclusion : la nécessité de faire des études d'efficience	8
Revue de littérature sur l'efficience	10
3.1. Les approches empiriques d'étude d'efficience technique et les résultats obtenus	14
3.1.1. Les approches de programmation mathématique	14
3.1.2. Les approches économétriques	16
3.2. Les approches empiriques d'étude de l'efficience environnementale et les principaux résultats	20
3.3 Relation entre efficience technique et efficience environnementale	22
3.4. Nos objectifs de recherche	23
Chapitre 4	24
Méthodologie et données	24
4.1. La description des variables de la base de données	24
4.2. Les mesures d'efficience technique et d'efficience environnementale	29
4.2.1. L'efficience technique	29
4.2.2. L'efficience environnementale	29
4.3. La forme fonctionnelle.....	30
4.4. Les composantes des paramètres d'inefficience	32
4.5. Les mesures de performance économique	33
4.5.1. Élasticités output-input	33
4.5.2. Élasticités de substitution output désirable-output indésirable.....	35
4.6. Le prix fictif du phosphore	36

Présentation et interprétation des résultats empiriques.....	38
5.1. Paramètres estimés des fonctions distance	38
5.2. Les Mesures de performance économique.....	41
5.3. Les efficiences technique et environnementale	45
5.4. Le prix fictif du phosphore	53
Chapitre 6	54
Conclusion	54
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	56
Annexes	61

Liste des tableaux

Tableau 1 : Statistiques descriptives des variables utilisées dans l'analyse des deux efficiences.....	28
Tableau 2 : Coefficients estimés des fonctions distance	40
Tableau 2 (suite) : Coefficients estimés des fonctions distance.....	41
Tableau 3 : Élasticités output désirable-input issues des fonctions distances output et hyperbolique.....	43
Tableau 4 : Substituabilité entre outputs désirable et indésirable, $\tau_{y,b}^H$	44
Tableau 5: Coefficients estimés des termes d'inefficience des fonctions distance	46
Tableau 6 : Classement des dix et moins efficientes fermes agricoles selon le modèle des efficiences technique et environnementale	52
Tableau A1 : Description de certains scénarios* et de leurs résultats sur les émissions de flux de sédiments et de phosphore.....	61
Tableau A2 : Priorité relative à chacun des enjeux environnementaux	62
Tableau A3 : Les principales PGB par catégories	63
Tableau A4 : Effets d'interaction potentiels des catégories de PGB vis-à-vis de la qualité de l'eau	63

Liste des graphiques et figures

Figure 1. Le concept d'efficience technique.	12
Graphique 1 : Distribution de l'efficience technique de la fonction distance output ...	48
Graphique 2 : Distribution de l'efficience environnementale de la fonction distance hyperbolique.....	50

Chapitre 1

Introduction et problématique de recherche

À l'instar des autres provinces canadiennes, un des objectifs de la politique agricole québécoise est de stimuler la productivité des fermes. La croissance de la productivité est un des facteurs qui a permis au Québec de développer son agriculture et d'améliorer sa balance commerciale agroalimentaire. Cela s'est fait grâce à la mécanisation, à l'augmentation progressive de la taille des exploitations agricoles et à la spécialisation des fermes, et surtout à l'utilisation plus intensive de fertilisants (azote, phosphore), de pesticides et d'herbicides. Ainsi, la consommation d'engrais minéraux est passée de 311 013 à 517 762 tonnes entre 1972 et 1989 (Korol, 2002). Cet apport massif d'intrants et des changements dans les pratiques agricoles ont contribué à l'augmentation des rendements mais ont également exercé des impacts négatifs sur l'environnement, contribuant à la contamination de l'eau, la dégradation des sols, la détérioration de la biodiversité, et l'émission d'odeurs nauséabondes (Lessard et Vasile, 2007; Boutin, 2004). Ainsi, dans la province de Québec, l'intensification des productions animales et végétales a entraîné des surplus de phosphore, d'azote et de sédiments dans le sol, le gaspillage et la contamination des eaux souterraines et de surface (Gangbazo et Le Page, 2005).

C'est ainsi qu'au cours des dernières décennies un ensemble de programmes et de réglementations ont été mis en œuvre au Québec, pour atténuer les externalités environnementales, et surtout rendre le secteur agricole compétitif et durable. De plus, à partir des années 1990, les autorités québécoises ont encouragé les agriculteurs à adopter certaines pratiques favorisant une agriculture durable ; ces pratiques de gestion bénéfiques à l'environnement (PGB) ont pour objectif de sauvegarder la qualité des sols, des eaux souterraines et de surface, de l'air, ainsi que celle de la biodiversité (Martel et al., 2006).

Ainsi, le thème de l'environnement a été à l'épicentre de nombreux débats relatifs au développement de l'agriculture durant les cinq dernières décennies. Il est essentiel de connaître les implications des réglementations environnementales sur la productivité dans le secteur agricole québécois. Étant donné qu'une certaine variation spatiale et temporelle de la pollution dans les différentes régions agricoles du Québec a été constatée (Michaud et al., 2006), les réglementations ont probablement eu une incidence sur la productivité et les efficiences techniques et environnementales.¹

D'innombrables études ont mesuré les niveaux d'efficience technique des entreprises/fermes. Dans plusieurs cas, on a aussi mesuré l'impact de différents facteurs reliés à l'entreprise/ferme ou au gestionnaire, pour expliquer les différences d'efficience technique d'une entreprise/ferme à une autre. Plus récemment, on essaya d'intégrer les externalités environnementales dans les mesures de productivité et d'efficience, d'où le développement du concept d'efficience environnementale. Comme la théorie n'impose pas de restrictions quant à la relation entre les efficiences technique et environnementale, celle-ci a fait l'objet de quelques études empiriques (Tamini et al., 2010; Chih-Ching et al., 2008; Reinhard et Thijssen, 2000; Reinhard et al., 1999).

L'objectif que nous poursuivons dans cette étude est d'évaluer l'efficience technique et l'efficience environnementale des producteurs agricoles du bassin de la rivière Chaudière localisé au Sud de la ville de Québec et d'évaluer la nature et le degré de corrélation existant entre les deux mesures d'efficience. Cela nous permettra d'évaluer jusqu'à quel point il y a de l'hétérogénéité dans les performances techniques et environnementales des fermes et possiblement d'identifier des facteurs qui pourraient expliquer les écarts de performance. Ces facteurs pourraient servir pour segmenter les fermes et favoriser des interventions ciblées pour améliorer les performances de certains profils de fermes.

Nous adoptons une approche stochastique paramétrique appliquée aux fonctions de distance pour analyser les performances technique et environnementale des exploitations

¹ L'efficience technique mesure la capacité de produire le plus possible d'extrants pour des niveaux d'intrants et de pollution donnés. L'efficience environnementale mesure la capacité de produire le moins de pollution possible pour des niveaux d'extrants et d'intrants donnés.

agricoles. La présente étude apporte ainsi une contribution originale sur des données québécoises même si, sur le plan méthodologique, elle s'inspire de l'étude de Cuesta et al. (2009).

En effet, notre étude porte sur deux cent dix exploitations agricoles localisées dans la région de Chaudière-Appalaches où la production agricole est intensive et les problèmes de pollution sont inquiétants. Gangbazo et Le Page (2005) estiment que la charge excédentaire de phosphore issue de la plupart des bassins versants de cette région doit baisser de 30,8% pour atteindre la norme de 0,030 mg/l qui permettrait d'éviter de sérieux problèmes d'eutrophisation.

Le présent document est structuré de la façon suivante : le contexte de la problématique, c'est-à-dire la pression environnementale de l'agriculture et l'adoption de mesures règlementaires, est décrit au deuxième chapitre. La revue de la littérature relative aux études d'efficience est abordée dans le troisième chapitre. Par la suite, la méthodologie et les données utilisées pour atteindre notre objectif principal sont présentées dans le quatrième chapitre. Les résultats des estimations sont présentés, analysés et interprétés dans le cinquième chapitre. Enfin, le sixième chapitre dresse les implications de ces résultats en guise de conclusion.

Chapitre 2

Pression environnementale de l'agriculture et adoption de mesures réglementaires

2. 1. Situation problématique : la pression de l'agriculture sur l'environnement

Ayant une superficie de 15128 km² et se trouvant sur la rive sud du Saint-Laurent, la région de Chaudière-Appalaches présente différents problèmes environnementaux en raison d'une forte concentration des activités agricoles et à leur intensification (BAPE, 2003)². L'intensification de l'agriculture dans le but d'accroître la productivité a provoqué alors de lourdes conséquences sur l'environnement physique. Ces impacts négatifs sont observés à travers la qualité de l'eau, du sol, de l'air et de la biodiversité. La pollution de l'eau souterraine et de surface est due à l'azote, au phosphore et aux matières en suspension.

Dans la nature, la molécule d'azote est observée sous une multitude de formes : l'azote ammoniacal, les nitrates, l'azote organique et les nitrites. Les concentrations des deux premiers types d'azote sont les plus documentées, avec des mesures moyennes de 0,04 mg/l et 0,62 mg/l pour les bassins versants agricoles québécois; celles des nitrites sont évaluées entre 0,24 mg/l et 2,40 mg/l pour les mêmes bassins. De surcroît, ces concentrations sont inférieures aux critères admissibles de l'eau potable de 0,5 mg N/l et 10 mg N/l (Gangbazo et Le Page, 2005) et respectent donc les normes sanitaires publiques établies par les autorités québécoises.

La particule de phosphore est essentiellement caractérisée par deux formes : le phosphore soluble et le phosphore particulaire. Dans la région de Chaudière-Appalaches

² En 2001, 33% des entreprises porcines québécoises, soit 906 entreprises, se trouvaient dans la région de Chaudière-Appalaches. Ces entreprises s'accaparaient 29% du cheptel québécois (voir p. 178-9 http://www.bape.gouv.qc.ca/sections/rapports/publications/bape179_vol2.pdf).

trois facteurs importants justifient la présence de phosphore soluble (plus absorbable par les plantes aquatiques que le phosphore particulaire) : le ruissellement des eaux de surface, la non absorption du phosphore associé à la matière organique et la remise en suspension des sédiments déposés au fond des rivières (Gangbazo et Le Page, 2005). Les algues d'eaux douces se développent en fixant les molécules de phosphore soluble. Ce phénomène est connu sous le nom d'eutrophisation qui se définit comme étant la modification et la dégradation d'un milieu aquatique, lié en général à un apport exagéré de substances nutritives (Phosphore, nitrate carbone). Cela entraîne une prolifération des algues et des plantes aquatiques.³ Le phosphore pollue la majorité des rivières au Québec. La norme phosphore de 0,03mg P/l fixée par les autorités provinciales est dépassée dans toutes les régions agricoles. Cette charge maximale équivaut à 102 tonnes par année alors que la charge actuelle dans le bassin de la rivière Chaudière s'élève à 147 tonnes par année. Ainsi pour respecter la norme phosphore, les producteurs de cette région doivent adhérer au programme d'assainissement afin de baisser la concentration de phosphore de 45,4 tonnes par an soit 30,8% (Gangbazo et Le Page, 2005).

Ainsi la molécule de phosphore pollue et nuit à la qualité de l'eau plus que l'azote car la concentration de ce dernier est globalement en dessous du seuil fixé. Cette situation a conduit le gouvernement québécois à investir plus de sept milliards de dollars pour établir le programme d'assainissement des eaux polluées (Gangbazo, 2004).

2.2. L'adoption de PGB comme moyen d'atténuer la pression environnementale des activités agricoles

Depuis plusieurs années, les autorités québécoises proposent aux agriculteurs de nouvelles pratiques dites pratiques de gestion bénéfiques (PGB) afin de limiter les niveaux de pollution. Ainsi, Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC, 2000) définit les pratiques de gestion bénéfiques en agriculture comme étant des méthodes agricoles de prévention de la pollution et de la dégradation des milieux physiques.

³ Cette définition est inspirée de Gangbazo et Le Page (2005 p.7).

De leur côté, Martel et al. (2006) définissent les PGB comme étant un ensemble de pratiques de gestion viables qui permettent le maintien ou l'amélioration de la qualité de l'eau de surface ou souterraine, des sols, de l'air et de la biodiversité. Trois types généraux de PGB sont définis par AAC (2000). Il s'agit de :

- i. la gestion des inputs chimiques et organiques ;
- ii. le contrôle de l'érosion et du ruissellement des eaux ;
- iii. la pratique d'écrans protecteurs et de cultures tampons afin d'éviter que les contaminants ne se rendent hors des champs.

À titre d'exemple, Michaud et al. (2006b) évaluent l'effet de divers PGB sur les flux de sédiments et de phosphore dans le bassin versant de la rivière aux Brochets au sud du Québec. Ces auteurs proposent des scénarios regroupés en (i) scénarios agroenvironnementaux de base, (ii) scénarios avec conversions aux pratiques agricoles de conservation et (iii) scénarios avec substitution de cultures. Le tableau A1 (présenté en Annexe) décrit 3 de ces scénarios et leurs résultats sur les flux de phosphore et de sédiments. Michaud et al. (2006b) montrent que, selon les PGB mises en œuvre, les résultats sur la réduction de la pollution sont variables. Il semble exister une interaction entre les différentes catégories de PGB de telle sorte que l'effet d'interaction potentielle devrait être négatif entre la fertilisation et le travail du sol ainsi que le couvert végétal; toutefois on souhaite que cet effet soit positif entre la fertilisation et la protection des cultures, l'élevage et les effluents ainsi que l'aménagement du parcellaire. Cela est également montré par Martel et al. (2006).

Étant donné que notre problématique se réfère à l'un des quatre enjeux environnementaux⁴ à savoir la qualité de l'eau, nous exposerons brièvement ces variables priorisées et comment celles-ci sont prises en compte dans les PGB. En effet, l'adoption par les producteurs de PGB vise principalement à réduire de façon significative les concentrations d'azote, de phosphore, de pesticides (pertes dans l'eau et apports aux cultures), de matières en suspension pour une meilleure conservation de la qualité de l'eau.

⁴ Voir Annexes : Tableau A2

Dans la province de Québec, le niveau de pollution varie d'une région agricole à une autre en raison de la variabilité spatiale de la pluviométrie, du type de terres agricoles et des pratiques culturales. Par exemple, le phosphore utilisé sur moins d'un dixième du versant agricole, provoque la migration de plus de 50% de celui-ci vers le réseau hydrologique. Cette distribution spatiale du flux de phosphore pousse Michaud et al. (2006a p.58) à estimer "que des proportions relativement faibles des bassins versants en culture sont responsables de la plus grande part des exportations de phosphore dans les eaux de ruissellement." Par ailleurs, ces auteurs font la preuve d'une différence spatiale des effets de l'adoption des PGB sur les flux d'émission de polluants. Ainsi il y a une certaine variation spatiale de la pollution causée par les différents polluants agricoles.

2.3. La réglementation comme moyen d'encourager l'adoption de PGB

Pour une production agricole durable, les autorités québécoises ne cessent d'imposer, depuis le début des années 70 jusqu'à nos jours, une série de réglementations environnementales à leurs producteurs. Ainsi le secteur agricole québécois a connu deux réglementations environnementales majeures: Le règlement sur les exploitations agricoles (REA) et le règlement sur le captage des eaux souterraines.

Dès son entrée en vigueur en 2002, le REA relatif à l'entreposage des déjections animales prohibe scrupuleusement la concentration des amas au champ avec une contrainte de capacité sur la fosse pour éviter tout débordement. En présence de cette nouvelle réglementation, il était attendu que les producteurs québécois hausseraient la capacité de leur fosse (construction, rehaussement, toiture, trémies et entreposage chez un tiers). Avec ce même règlement, il est interdit non seulement d'épandre des matières fertilisantes sur un sol gelé ou enneigé mais la période d'épandage doit aussi se situer entre 1^{er} avril et 1^{er} octobre de chaque année. Le REA concernant le mode d'épandage n'autorise plus le producteur agricole à épandre les déjections animales par le biais d'un équipement d'épandage fixe ou mobile dépassant une distance de 25 mètres. Tous les fumiers liquides doivent impérativement être épandus par l'entremise d'un équipement à rampes basses. Alors ce nouveau REA impose de nouvelles pratiques aux agriculteurs par l'acquisition de nouvelle machinerie ou l'utilisation de travaux à forfait (Nolet et al., 2005).

En ce qui concerne la gestion des matières fertilisantes, le REA contraint les producteurs québécois aux mesures suivantes⁵ :

- En conformité au plan agro-environnemental de fertilisation (PAEF), chaque parcelle faisant l'objet d'épandage des matières fertilisantes doit posséder un registre d'épandage.
- Le PAEF impose que l'épandage des matières fertilisantes soit opéré dans l'optique de fertiliser uniquement le sol.
- L'analyse de la teneur des déjections animales doit être faite au moins une fois par an.
- Une analyse de sol doit être effectuée de façon quinquennale.
- Un bilan sur la concentration de molécules de phosphore est devenu impératif.
- Grâce aux abaques de dépôt maximum annuel exprimés en kilogramme de phosphore par hectare, les superficies nécessaires de l'épandage ont été calculées pour toutes sortes de matières fertilisantes.
- L'équilibre entre la capacité de support en phosphore des sols et la quantité épandue de matière fertilisante devait être a été implémenté au plus tard en 2010.

Suite à ces diverses mesures de REA relatives aux matières fertilisantes, tout producteur agricole devrait adopter de nouvelles pratiques agricoles. Ainsi le producteur est obligé de délimiter les superficies nécessaires pour l'épandage des matières fertilisantes en fonction d'une norme phosphore plus restrictive que celle d'azote. Par ailleurs, il est anticipé que les producteurs subissent des coûts supplémentaires liés au plan d'agro-environnemental de fertilisation, aux analyses de sol, aux déjections animales et au bilan phosphore.

2.4. Conclusion : la nécessité de faire des études d'efficience

L'adoption de PGB se traduit en général par une modification du niveau et de la trajectoire de la production et donc des revenus des entreprises agricoles. Il est donc

⁵ L'énumération de ces mesures se base sur Nolet et al. (2005 p.32-33) et Debailleul (2004).

important de pouvoir associer des études économiques aux études techniques afin d'évaluer les conséquences du changement de pratiques sur la rentabilité des entreprises agricoles.

Relativement peu d'études économiques scientifiquement rigoureuses ont été réalisées dans la province de Québec sur l'utilisation des PGB (Tamini, 2008). À quelques exceptions près (voir par exemple Ghazalian et al., 2010), les études réalisées dans le contexte du Québec l'ont été par la méthodologie de la budgétisation partielle et n'ont traité que de l'adoption de PGB considérées individuellement. Cela est très limitant étant donné que les cibles environnementales fixées aux producteurs impliquent très souvent l'adoption de plusieurs PGB aux effets synergiques. Les données physiques disponibles indiquent qu'il existe une grande variabilité spatio-temporelle et cela à l'intérieur d'un même bassin versant. Il est donc important que des études économiques viennent compléter l'important travail de collecte de données biophysiques qui est réalisé à l'échelle des bassins versants. Ce travail est d'autant plus important qu'il est de plus en plus suggéré que les politiques visant l'adoption de PGB soient spécifiques. Dans le souci d'atteindre les objectifs environnementaux, ces études devront impérativement s'appuyer sur la multiplicité des PGB.

En définitive, l'analyse des PGB sur les niveaux d'efficacités technique et environnementale des producteurs nous permettra d'établir jusqu'à quel point l'adoption de PGB nuit ou stimule la productivité et l'efficacité et par conséquent si des incitatifs financiers sont nécessaires pour favoriser leur adoption.

Chapitre 3

Revue de littérature sur l'efficacité

En 1951, Koopmans fut le premier à formaliser le concept d'efficacité technique qui mesure la capacité d'obtenir le plus haut niveau d'outputs à partir de quantités d'inputs données (Kumbhakar et Lovell, 2000; Amara et Romain, 2001). En outre le concept d'efficacité allocative consiste à mesurer les proportions dans lesquelles les facteurs de production (travail, capital, herbicide et fertilisant) sont utilisés en se référant à leurs prix relatifs. Enfin le concept d'efficacité d'échelle évalue si une firme bénéficie de rendements d'échelle⁶ croissants, décroissants ou constants; ce concept nous permet d'évaluer si la firme produit trop ou pas suffisamment par rapport à la taille optimale de l'exploitation. Le concept de l'efficacité environnementale est quant à lui très récent. Il peut se définir comme étant "Le ratio de l'utilisation minimum et de l'utilisation observée d'un input nuisible à l'environnement, pour des niveaux donnés d'outputs désirables et d'inputs conventionnels" (Reinhard et al., 1999 p.48). L'efficacité environnementale implique une utilisation optimale des inputs (eau, charbon, azote..) pour obtenir une quantité d'outputs donnée en causant le moins possible d'externalités négatives à l'environnement physique. Ces concepts nous réfèrent à la technologie de production qui se définit comme étant l'état de connaissance ou d'information dont dispose un entrepreneur et qui lui permet de produire plusieurs quantités d'outputs à partir d'une multitude d'inputs. Les outputs peuvent être catégorisés en deux groupes : les bons/désirables, qui incluent les cultures et le bétail, et les mauvais/indésirables qui désignent les externalités environnementales qui sont

⁶ Les rendements sont croissants si la production augmente plus vite que les facteurs de production. On parle d'économies d'échelle lorsque tous les intrants sont doublés et la production fait plus que doubler. Les rendements sont dits décroissants lorsque la production augmente par un moindre multiple que celui qui est appliqué à tous les facteurs de production. On est en présence de déséconomies d'échelle lorsque les quantités d'intrants sont doublées et que la production augmente par un multiple inférieur à deux. Enfin les rendements sont dits constants lorsque la production varie dans la même proportion que les facteurs de production.

produites conjointement avec les cultures et le bétail. Les mauvais incluent les quantités de phosphore, d'azote et de sédiments.

La technologie peut être décrite et analysée par le biais de plusieurs fonctions : fonction de production, de coût, de profit et de distance. La fonction la plus couramment utilisée dans les études sur l'efficacité est la fonction de production, qui associe la production Y d'un bien donné à différents niveaux d'inputs x_i :

$$Y = F(x_1, \dots, x_n)$$

La fonction de production est continue, croissante en x et quasi-concave, c'est-à-dire qu'elle est associée à des isoquants qui sont convexes. L'inefficacité « u » est généralement introduite dans une version stochastique de la relation décrite ci-dessus en ajoutant un terme aléatoire $v \sim N(0, \sigma_v^2)$ et $u \geq 0$ de sorte que :

$$Y = F(x_1, \dots, x_n) - u + v$$

Fonction de production :

La fonction de production définit alors une frontière d'efficacité. Lorsque $n=2$, on peut illustrer le concept à l'aide d'un isoquant qui est défini comme étant les combinaisons d'input qui permettent de produire un niveau d'output donné Y^* : $x_2 = f(x_1, Y^*)$ tel que $Y^* = F(x_1, x_2)$. Toutes les combinaisons d'inputs permettant de produire Y^* qui sont sur l'isoquant sont dites efficaces.

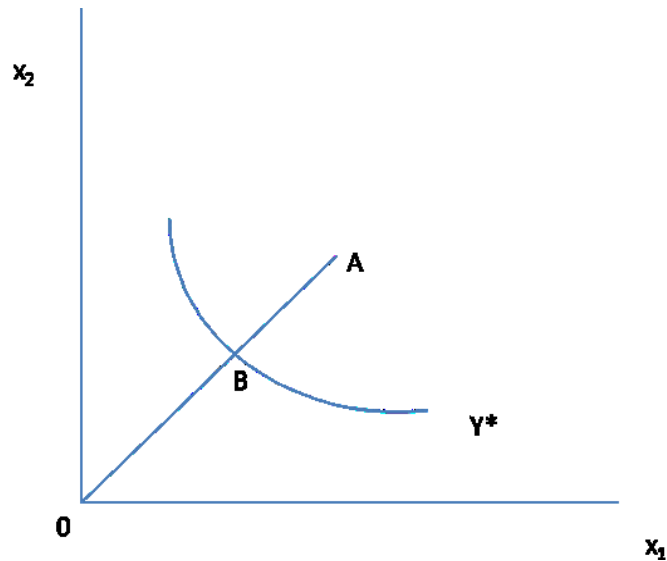


Figure 1. Le concept d'efficacité technique.

Le producteur qui a besoin d'une combinaison d'inputs définie par le point A ci-dessous pour produire le niveau d'output Y^* a un niveau d'efficacité donné par le ratio des distances radiales OB/OA .

L'élasticité d'échelle est une statistique d'intérêt qui est mesurée à partir d'une fonction de production en calculant : $E = \sum_{i=1}^n \frac{\partial F / \partial x_i}{F / x_i}$, où le numérateur et le dénominateur désignent

respectivement le produit marginal et le produit moyen de l'input i . L'élasticité d'échelle nous indique si les rendements sont croissants, constants ou décroissants, c'est-à-dire que si suite à une augmentation de 1% de tous les inputs l'output augmente par plus de 1%, par 1% ou par moins de 1%.⁷

Fonction de coût

Avec l'introduction de l'hypothèse comportementale des producteurs qui minimisent leur coût de production pour des niveaux donnés d'outputs, la mesure de l'efficacité technique devient plus exacte avec les frontières de coût que les frontières de production⁸.

⁷ Une autre statistique d'intérêt est la productivité totale des facteurs qui est la part de la croissance de l'output qui est non-attribuable aux variations dans les facteurs de production. .

⁸ Kumbhakar et Lovell, 2000 p.51

Kumbhakar et Lovell (2000) caractérisent la mesure de l'efficacité du coût comme le ratio du coût minimum et du coût observé : $CE(y, x, w) = c(y, w) / w^T x$. Le plus près de un est la mesure, le plus efficace est la firme.

Fonction de distance

La notion de fonctions distance fut indépendamment développée en 1953 par Malmquist et Shephard mais celle-ci ne gagna en popularité que trois ou quatre décennies plus tard (Kumbhakar et Lovell, 2000; Coelli et al., 2005). Les fonctions de distance décrivent non seulement la structure de la technologie de production,⁹ mais elles permettent également d'estimer l'efficacité technique.

Pour étudier les liens technologiques entre plusieurs outputs et plusieurs inputs, on se réfère souvent aux fonctions distance qui sont soit définies dans l'espace « output » soit dans celui « input ».¹⁰

Selon Kumbhakar et Lovell (2000), la fonction de distance input est :

$$D_I(y, x) = \max \{ \lambda : x / \lambda \in L(y) \}.$$

Cette fonction nous donne la quantité maximale par laquelle le vecteur d'inputs d'un producteur peut être contracté tout en continuant de permettre la production du vecteur d'outputs (Kumbhakar et Lovell, 2000). Cette technologie de production est aussi spécifiée comme une proportion minimale de réduction du vecteur d'inputs dans le but d'atteindre un niveau optimal de production donné (Coelli et al., 2005).

Notre étude va porter sur l'utilisation de la fonction distance basée sur les outputs dont nous présentons la définition et les propriétés dans le paragraphe suivant.

Selon Cuesta et al (2009), la fonction de distance axée sur les outputs est définie :

$$D_{OT}(x, y, b) = \inf \{ \theta > 0 : (x, y / \theta, b) \in F \} \quad (1)$$

⁹Kumbhakar et Lovell, 2000.

¹⁰ La fonction distance input sous certaines conditions est duale à la fonction de coût alors que celle de l'output l'est pour la frontière de revenu. Cette propriété duale des fonctions de distance explique leur popularité dans la réalisation d'études empiriques (Kumbhakar et Lovell, 2000 p.28).

où x = les inputs; y = outputs; b = émissions polluantes et F = la frontière de la technologie de production.

La fonction de distance axée sur les outputs nous dit jusqu'à quel point la production peut augmenter sans que les inputs changent. Elle est bornée comme suit: $0 < D_{OT}(x, y, b) \leq 1$

Cette fonction possède les propriétés théoriques suivantes :

a) Homogène de degré 1 par rapport à tous les outputs :

$$D_{OT}(x, \theta y, b) = \theta D_{OT}(x, y, b) \quad \forall \theta > 0 \text{ (T1.)}$$

b) Non-décroissante en outputs :

$$D_{OT}(x, \alpha y, b) \leq D_{OT}(x, y, b), \alpha \in [0, 1] \text{ (T2)}$$

c) Non-croissante en outputs indésirables :

$$D_{OT}(x, y, \alpha b) \leq D_{OT}(x, y, b), \alpha \geq 1 \text{ (T3)}$$

d) Non-croissante en inputs :

$$D_{OT}(\alpha x, y, b) \leq D_{OT}(x, y, b), \alpha \geq 1 \text{ (T4)}$$

En ce qui concerne les études d'efficacité technique, la littérature existante distingue de nombreuses approches empiriques. Nous décrivons dans les paragraphes suivants non seulement toutes ces approches mais nous discuterons aussi des résultats de plusieurs de ces études.

3.1. Les approches empiriques d'étude d'efficacité technique et les résultats obtenus

L'étude de l'efficacité technique fait appel soit aux approches de programmation mathématique connues sous le nom d'analyse par enveloppement des données (AED) soit aux approches économétriques connues sous le nom de frontières stochastiques. Ces deux approches sont détaillées respectivement dans les sous paragraphes suivants.

3.1.1. Les approches de programmation mathématique

Cette approche est dite non paramétrique et découle des travaux de Farrell (1957). Elle a donc l'avantage de ne pas imposer une forme fonctionnelle à la fonction de production

définissant les frontières de production. Les frontières de production sont construites en utilisant la programmation linéaire pour solutionner les problèmes primal et dual d'optimisation¹¹ AED. On dénote deux types d'AED. Le premier fait l'hypothèse de rendements d'échelle constants tandis que le deuxième admet des rendements d'échelle variables¹².

La méthode d'AED est populaire à cause de certains avantages: (1) absence de restrictions quant à la forme fonctionnelle de la fonction de production, (2) absence de restrictions quant à la distribution du terme d'inefficacité, (3) estimation des frontières de production, (4) mesure de nombreux outputs ou de plusieurs inputs pouvant ne pas posséder la même unité de mesure (5) mesure d'efficacité par observations individuelles et pour l'échantillon, (6) absence de spécification particulière ou de connaissance a priori des pondérations et des prix des inputs ou outputs.

Cependant, la méthode d'AED subit certaines critiques en raison du fait que les erreurs aléatoires sur les données peuvent rendre l'estimation de la frontière de possibilité de production (FPP) biaisée. De plus, il est difficile de réaliser des tests statistiques lors de la réalisation d'études en utilisant cette approche. L'approche d'AED a été utilisée à de nombreuses reprises pour analyser la performance de firmes dans les domaines pharmaceutique, bancaire et agricole.

Applications au secteur agricole

Galanopoulos et al. (2006) ont eu recours à l'AED pour mesurer l'efficacité des producteurs porcins en Grèce. La mesure radiale¹³ d'efficacité technique pour l'échantillon est de 0,828 sous l'hypothèse de rendements d'échelle variables. Ce résultat implique que les fermes porcines grecques pourraient produire le même niveau d'output en réduisant

¹¹ Une unité de décision est dite efficiente dans un échantillonnage si aucune autre unité de décision ne produit plus d'outputs avec la même quantité d'inputs (Borodak, 2007). Le problème primal se résume à accroître de façon optimale le volume d'extrait tandis que le problème dual vise à réduire les prix relatifs des intrants ayant servi à obtenir le volume optimal d'output.

¹² Dans leur revue de littérature sur les approches AED, Amara et Romain (2000) signalent que l'AED à rendements d'échelle constants découle des travaux de Charnes et al. (1978). Par contre AED du type rendements d'échelle variables est initié par Banker et al. (1984).

¹³ La distance radiale exprime l'écart entre une unité de production observée et la projection radiale de cette unité localisée sur la frontière efficiente de l'ensemble de production (Ambapour, 2004).

leurs inputs (Travail, capital, aliments et autres dépenses) de 17,2%. Leur estimation confirme généralement que les grosses fermes porcines sont plus efficaces techniquement que les petites fermes porcines. Cependant cette mesure d'efficacité technique ne tient pas compte de l'émission d'outputs indésirables.¹⁴

Lansink et Reinhard (2004) ont également utilisé l'AED pour examiner les possibilités de croissance technique, économique et la performance environnementale des fermes porcines néerlandaises. D'une part la valeur moyenne globale de l'efficacité technique de leur échantillon est 0,90 sous des rendements d'échelle variables; cela implique que chaque fermier peut réduire de 10% l'utilisation de chacun de leurs inputs afin d'obtenir la même quantité d'output. Cette mesure d'efficacité technique tient compte de la production d'un mauvais output. D'autre part une large proportion de cet échantillon opère généralement à une échelle optimale car l'échelle d'efficacité est de l'ordre de 0,98 ce qui est très élevé.

Chih-Ching et al. (2008) incluent non seulement les outputs indésirables, mais également une variable importante de mesure de réglementation environnementale. Ils utilisent des données de la filière porcine taïwanaise pour estimer une fonction distance output pour illustrer les efficacités technique et environnementale. Pour ces auteurs, les véritables efficacités techniques ne peuvent être atteintes que si les outputs indésirables sont négligés. Leurs calculs montrent que les grosses fermes sont plus efficaces que les petites mais la conclusion est floue pour ce qui est de l'impact des mesures de régulation selon la taille des fermes porcines taïwanaises.

3.1.2. Les approches économétriques

Les approches économétriques sont fondées sur une spécification particulière de la technologie de production.¹⁵ La mesure de l'efficacité technique est opérée à base du terme d'erreur de la fonction de production. Pour ce faire, il existe trois approches paramétriques à savoir les frontières de production déterministes, probabilistes et stochastiques.

¹⁴ "Undesirable outputs" signifient en français les nuisances ou les atteintes environnementales observées lors du processus de production telles que les excédents de phosphore, d'azote et les émissions de dioxyde de soufre ou de carbone.

¹⁵ À partir de cette spécification des paramètres, on la nomme aussi dans la littérature, l'approche paramétrique.

3.1.2.1. Les fonctions de production déterministes

En 1957, Farrell initie l'approche déterministe en imposant l'approximation de la fonction de production efficace par une forme fonctionnelle connue à priori. Ainsi il emploie la fonction de type Cobb-Douglas basée sur les rendements d'échelle constants pour estimer les performances productives agricoles des quarante-huit États américains (Amara et Romain, 2000). En effet le modèle déterministe comporte deux parties : (i) l'ensemble des observations de l'échantillon doit se situer soit sur la frontière soit sous celle-ci, (ii) le terme d'erreur décrivant le degré d'efficacité technique. Cette technique d'estimation est très peu adoptée par les spécialistes car elle est très sensible aux erreurs de mesure. Par ailleurs, cette approche souffre de plusieurs lacunes : pas de différenciation entre les effets provenant des bruits statistiques des chocs extérieurs ou hors de l'emprise de l'entreprise et des effets de pure source d'inefficacité technique (Borodak, 2007). Ces lacunes précitées sont ressorties dans l'étude de van den Broeck et al. (1980) puisque de considérables différences dans les valeurs des paramètres estimés sont observées d'une année à l'autre. Pour diminuer la sensibilité de la frontière estimée aux erreurs purement aléatoires, les approches probabiliste et stochastique furent développées.

3.1.2.2. Les fonctions de production probabilistes et stochastiques

L'approche probabiliste fut développée par Timmer (1971). Elle consiste à réduire la sensibilité de la frontière due aux erreurs véritablement aléatoires en permettant alors à certaines observations correspondant à des firmes très efficaces de se trouver au-dessus de la FPP. En effet, on effectue des itérations successives compte tenu du nombre d'observations de l'échantillon pour obtenir la fonction de production frontière. Cette technique d'estimation fut appliquée pour le secteur laitier par Bravo-Ureta (1986) qui à partir d'un échantillon de 222 fermes laitières de la Nouvelle Angleterre trouva des niveaux d'efficacité technique variant entre 57,69 % et 100% avec une moyenne de 82,17. Par ailleurs les résultats de Romain et Lambert (1995) montrent que le niveau d'efficacité technique des entreprises laitières québécoises est plus élevé pour les entreprises de grande

taille. Toutefois, la différence est relativement faible.¹⁶ En Ontario, le niveau d'efficacité technique n'est pas statistiquement affecté par la taille du troupeau. Hormis la taille du troupeau, le niveau d'efficacité est aussi influencé par des variables de gestion (participation à un programme de contrôle laitier, l'endettement, participation aux activités des syndicats de gestion), le niveau d'utilisation des inputs de production (énergie, fourrage, soins vétérinaires, concentrés, travail, capital) ou encore des variables spécifiques à l'exploitant principal (niveau de scolarité).

Ces différentes approches d'estimation de la frontière de production présentées ci-haut soulignent non seulement que toutes les firmes affichent un même mode de production mais en plus que tout écart constaté par rapport à la frontière est absolument due à l'inefficacité. Ainsi elles oublient que la performance d'une firme peut également être fonction de plusieurs facteurs : les aléas climatiques, les mauvais rendements des machines, les pénuries des inputs, les maladies et autres facteurs exogènes (Amara et Romain, 2000 et Reinhard et al, 1999).

Compte tenu des différentes raisons évoquées ci-dessus, la frontière stochastique est privilégiée dans le domaine agroalimentaire pour effectuer l'estimation des efficacités technique et environnementale. Cette approche a été proposée par Aigner et al. (1977). Elle sera plus tard améliorée par Jondrow et al. (1982) dans le but d'effectuer l'estimation des indices d'efficacité technique spécifique de chaque firme. Ainsi le modèle stochastique stipule que le terme d'erreur est composé de deux parties indépendantes : une composante purement aléatoire et une composante traduisant l'inefficacité technique. En effet l'hypothèse relative à l'estimation de la frontière nécessite que ces deux composantes suivent des distributions indépendantes. La composante aléatoire représente un vecteur d'erreurs aléatoires suivant une densité normale pendant que la composante d'inefficacité reste une variable aléatoire non négative exprimant le niveau d'inefficacité technique. Cette approche est souvent utilisée dans les travaux empiriques pour estimer le score d'efficacité technique des unités de production (Yérou et al., 2010).

¹⁶ Le niveau d'efficacité technique s'accroît de 0,87 point si la taille du troupeau subit une hausse de 10 vaches. En outre en comparant une ferme laitière possédant un niveau d'efficacité de 80% avec une autre ayant 10 vaches supplémentaires, alors le niveau d'efficacité technique de celle-ci serait de 80,87% (Romain et Lambert, 1995).

Tamini et al. (2010) ont recours à l'approche de frontière stochastique. Ils utilisent une fonction de distance axée sur les inputs approximée par une forme fonctionnelle Translog qui modélise les émissions de polluants comme une variable exogène. Les résultats de Tamini et al. (2010) indiquent un score moyen d'efficacité technique de l'ordre de 0,432. Les producteurs à prédominance animale affichent un niveau d'efficacité plus élevé que ceux à prédominance végétale : respectivement 0,466 et 0,428 pour une différence significative au seuil de 5%. L'efficacité technique maximale est de 0,989 et la minimale de 0,186. Enfin les gros producteurs et ceux présentant un niveau de scolarisation d'au moins du niveau du secondaire sont les plus efficaces.

Par ailleurs Reinhard et al. (1999) ont estimé une frontière de production stochastique de forme Translog sur des données panel provenant du secteur laitier néerlandais. Ces auteurs trouvent qu'environ 90% des 613 fermes néerlandaises possèdent généralement un haut niveau d'efficacité technique, du moins durant la période 1991 à 1994.

Reinhard et Thijssen (2000) se servent de la fonction de coût avec des prix implicites pour l'azote pour mesurer l'efficacité technique et l'efficacité environnementale. Reinhard et Thijssen (2000) utilisent une forme fonctionnelle flexible de type Translog pour estimer cette fonction de coût. Leur échantillon est formé de 2 589 observations issues de 434 fermes laitières lors de la période de 1985-1995. Le résultat de leur estimation affiche 0,845 au seuil de 5% comme le score moyen d'efficacité technique (Reinhard et Thijssen, 2000).

De tout ce qui précède, il ressort que les niveaux moyens d'efficacité technique varient significativement selon la méthode d'estimation et la forme fonctionnelle utilisées par les différents auteurs. De plus la mesure de cette efficacité semble être influencée par la prise en compte des biens indésirables, à savoir le(s) polluant(s).

3.2. Les approches empiriques d'étude de l'efficacité environnementale et les principaux résultats

À l'occasion du sommet de la Terre en 1992, le concept d'efficacité environnementale fut proposé par le *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD)¹⁷. Le WBCSD a identifié sept importants facteurs pour assurer le succès de ce concept :

- 1) réduction de l'intensité de consommation des biens et services
- 2) réduction de l'intensité énergétique des biens et services
- 3) réduction de l'émission des substances toxiques
- 4) augmentation de la recyclabilité de la matière
- 5) maximisation de l'usage soutenable des ressources renouvelables.
- 6) réduction de la durabilité de substance
- 7) croissance de la qualité des biens et services

Le concept d'efficacité environnementale prend en compte les dimensions économique (rentabilité, satisfaction des besoins, innovation, capacités techniques, croissance, etc.), sociale et écologique (capacité de support, empreinte écologique, résilience des systèmes, etc.). Cela suppose une certaine efficacité environnementale des entreprises qui peut être définie comme étant : "Le ratio de l'utilisation minimum et de l'utilisation observée d'un input nuisible à l'environnement, pour des niveaux d'outputs désirables et d'inputs conventionnels" (Reinhard et al., : 1999 p.48). Cette définition suggère qu'une ferme est dite plus efficace du point de vue environnemental lorsqu'elle dépense un faible coût en terme d'inputs pour diminuer les nuisances environnementales afin d'atteindre un certain niveau de production (Murty et al., 2006). En se basant sur cette définition, Reinhard et al. (1999) calculent un score d'efficacité environnementale basé sur une estimation d'une fonction de production stochastique dans laquelle le polluant est modélisé comme output. Ces auteurs obtiennent un score d'efficacité environnementale moyen pour l'azote de 0,441. Reinhard et Thijssen (2000) utilisent une fonction de coûts implicites et concluent que la moyenne de l'efficacité environnementale dans l'utilisation de l'azote est de 0,561 (les scores minimum et maximum sont respectivement 0,33 et 0,88).

¹⁷ Ce terme en français signifie le Conseil mondial des entreprises pour le développement durable.

Estimant l'efficacité environnementale de l'industrie sucrière indienne avec une fonction de distance axée sur les inputs, Murty et al. (2006) obtiennent une moyenne de 0,853. Leur recherche a porté sur 108 observations portant sur 36 firmes durant la période allant de 1996-1999. Les résultats obtenus montrent qu'en raison des contraintes environnementales, ces entreprises sucrières doivent encourir un coût en terme d'inputs d'environ 15% ($1-0,853 = 0,147$) pour produire la même quantité de bon output.

Tamini et al. (2010) appliquent une approche stochastique à l'estimation d'une fonction de distance (d'input) dans laquelle un bien agricole agrégé est modélisé comme *shifter* d'une fonction de production d'un polluant (phosphore). Ces auteurs trouvent une efficacité environnementale moyenne de l'ordre de 0,486. De façon particulière cette moyenne est plus élevée dans les entreprises agricoles à prédominance animale : 0,504 versus 0,380 dans les entreprises à prédominance végétale. Les résultats d'efficacité environnementale obtenus en utilisant cette approche sont plus faibles que ceux obtenus en utilisant celle proposée par Reinhard et al. (1999).

Cuesta et al. (2009) est également une application récente centrée sur la fonction de distance. Dans cette étude, le bien indésirable fait parti du panier de biens produits, la moyenne de l'efficacité environnementale trouvée est 0,9336.

Des approches AED ont également été appliquées aux études d'efficacité environnementale. Ainsi, mesurant la performance environnementale en terme du surplus de phosphore et des émissions de l'ammoniac (NH_3), Lansink et Reinhard (2004) rapportent un score de 86%. Ce résultat implique que les fermes porcines engraisantes des Pays-Bas pourraient produire le même output en baissant de 14% leurs surplus de phosphore et les émissions de NH_3 . Ces auteurs concluent que généralement, l'introduction de nouvelles technologies est susceptible d'accroître les performances environnementales. Chi-Chang et al. (2008), s'appuyant sur l'AED trouvent que 9,8% du potentiel de production de porcs étaient sacrifiés en raison de la réglementation environnementale en vigueur au Taïwan. Ainsi plus les fermes porcines sont efficaces plus elles subiront probablement des coûts d'opportunité importants en terme de pertes de porcs commercialisables. Enfin le score moyen de l'efficacité environnementale, fondé sur l'AED output, calculé par Cuesta et al (2009) est 0,8650 pour les entreprises électriques

américaines. Cette moyenne montre donc que celles-ci pourraient accroître leur performance productive en augmentant la production électrique de l'ordre de 15,60% ($1/0,8650 = 1,1560$) avec une réduction conséquente de 13,50% ($1-0,8650 = 0,1350$) du dioxyde de soufre.

3.3 Relation entre efficacité technique et efficacité environnementale

L'internalisation des externalités environnementales peut engendrer des augmentations substantielles de coût et miner la compétitivité des firmes réglementées. Toutefois Porter estime que : “ *Strict environmental regulations do not inevitably hinder competitive advantage against foreign rivals, they often enhance it*” (Porter, 1991, p.162, cité par van der Vlist et al., 2007, p.165). Porter et van der Linde (1995) soutiennent que des contraintes environnementales peuvent stimuler l'innovation et l'efficacité et ainsi améliorer et non nuire à la compétitivité des firmes. L'existence éventuelle d'une corrélation entre les gains de productivité et la régulation environnementale favoriserait l'implémentation de technologies moins polluantes. L'hypothèse de Porter et de van der Linde (1995) est supportée par les travaux empiriques de Murty et Kumar (2003), van der Vlist et al (2007) et Tamini et al. (2010). Cependant, Palmer et al. (1995) remettent en question la validité de l'hypothèse de Porter et de van der Linde et il en va de même pour Marklund (2003), Kumar et Rao (2003) et Managi et al. (2005). D'autres études (ex., Boy et al., (2002) et Jaffe et Palmer (1997), citées par Kriechel et Ziesemer, 2007, p.38) soutiennent que l'imposition de réglementations environnementales plus strictes n'a pas d'incidence significative sur la compétitivité.

Dans la logique de Porter et de van der Linde, l'adoption de pratiques respectueuses de l'environnement entraîne non seulement une baisse des coûts absolus de contrôle de la pollution mais aussi une chute des coûts externes émanant de la dégradation de l'environnement. Dans cet ordre d'idées la relation “gagnant/gagnant” est respectée entre l'économie et l'environnement. On dénote également la présence des gains de productivité accompagnés d'une meilleure efficacité allocative (minimisation des coûts des inputs), d'une qualité améliorée des biens et services et d'une hausse de profits de l'entreprise soumise aux normes environnementales. Les règles environnementales pourraient être à l'origine de croissance pour les firmes d'un pays qui les aurait adoptées avant les autres

puisqu'elles bénéficieraient d'un avantage compétitif vis-à-vis les firmes des autres pays¹⁸ (Ambec et Barla, 2005 et van der Vlist et al. 2007). Une corrélation positive entre l'efficacité technique et l'efficacité environnementale n'est pas une condition suffisante pour supporter l'hypothèse de Porter qui demeure controversée.

3.4. Nos objectifs de recherche

Suite à la revue de littérature effectuée ci-haut et les résultats obtenus par les divers auteurs, nous formulons les objectifs de recherche suivants:

1. Les efficacités technique et environnementale sont corrélées.
2. Les mesures d'efficacité sont conditionnées par différentes variables socio-démographiques. Plus spécifiquement,
 - 2.1 Un haut niveau d'éducation des producteurs agricoles fait augmenter le niveau des efficacités technique et environnementale.
 - 2.2 Une relation inverse existe entre l'âge des agriculteurs et le niveau des efficacités technique et environnementale.
 - 2.3 Les efficacités technique et environnementale sont corrélées avec la taille des exploitations agricoles.
3. L'adoption de pratiques de gestion bénéfique a un impact positif sur les efficacités technique et environnementale.
4. La réduction des nuisances agricoles provoque un coût pour chaque producteur qui croît à un taux croissant avec la taille de la réduction.

¹⁸ Ces autres pays implémenteront, à une étape postérieure, les normes environnementales rigoureuses.

Chapitre 4

Méthodologie et données

Le présent chapitre est consacré à la présentation de l'approche méthodologique retenue pour tester nos hypothèses de recherche. Dans la section 4.1 nous présentons la description des variables de notre base de données alors que la section 4.2 est réservée aux mesures d'efficacité technique et d'efficacité environnementale en adoptant la démarche de Cuesta et al. (2009). Les termes des paramètres d'inefficacité technique et d'inefficacité environnementale sont élucidés dans la section 4.3. Enfin les sections 4.4 et 4.5 sont réservées respectivement aux mesures de performance économique et au calcul du prix fictif du polluant.

4.1. La description des variables de la base de données

Notre base de données est constituée de 210 observations et provient de l'enquête réalisée dans le cadre du projet WEB (Watershed evaluation of BMP).¹⁹ Les données ont été collectées par le biais d'un questionnaire postal auprès des producteurs localisés dans le bassin de la rivière Chaudière grâce à l'appui des coordinateurs du Ministère de l'Agriculture, des pêcheries et de l'alimentation du Québec (MAPAQ). L'enquête a été exécutée entre mai et septembre 2007. L'année de référence utilisée dans le questionnaire est 2006.

« *Bons outputs* »

¹⁹ Les projets WEBs sont financés par AAC et sont menés à l'échelle de tout le Canada.

Deux principales productions constituent « les bons outputs » soit les productions animales et les productions végétales.

Les productions animales sont constituées de bovins, de vaches laitières et de porcs. Les producteurs qui sont dans le secteur de la production des bovins représentent 59,5% alors que ceux qui produisent les vaches laitières occupent une proportion de 52,9% ; ceux qui sont dans le secteur des porcs représentent une proportion de 20,8%. La variable *animale* est exprimée en milliers de dollars canadiens dans le but d'uniformiser toutes les productions animales ; sa moyenne est 6,56 avec un écart-type de l'ordre de 22,16. Plusieurs fermes sont mixtes, produisant deux ou trois types de productions animales.

Les productions végétales, (le foin, la luzerne, les légumineuses, le maïs et autres céréales) sont cultivées sur une superficie totale de 13 352 hectares. Les productions végétales affichent une valeur moyenne 103,09 avec un écart-type de 325,41. L'unité de mesure de la production végétale est également en milliers de dollars canadiens.

La *taille* de la ferme est présente dans notre base de données pour traduire une relation potentielle entre les efficacités et le volume de production agricole. En effet, pour la variable binaire *production importante* assume la valeur 1 lorsque la valeur de la production végétale est plus élevée que celle de la production animale et la valeur 0 pour le cas contraire.

Émissions polluantes

Les émissions polluantes agricoles sont constituées de phosphore, d'azote et des sédiments et sont exprimées en kilogramme. Seul le *phosphore* est utilisé lors des estimations économétriques car les trois polluants sont fortement corrélés. Le choix du phosphore se justifie par le fait que dans la plus part des bassins versants, les objectifs environnementaux du secteur agricole portent sur ce polluant. La variable *phosphore* a une valeur moyenne de 6,35 accompagnée d'un écart-type de 5,63.

Inputs de production

Les variables inputs sont composées du travail, des fertilisants et des herbicides. La variable *travail* est mesurée en heures de travail et a une moyenne de 27,56 et un écart-type de 91,59. La variable *herbicide*, exprimée en kilogramme, a une moyenne de 0,56 et un écart-type de 0,68. La variable *fertilisant* est également exprimée en kilogramme et a une moyenne de 1,16 et un écart-type de 1,39.

Le *capital* est approximé par la valeur de la machinerie louée ou non, incluant les tracteurs, les camions et autres équipements pour labourer et récolter, comme les moissonneuses. La valeur moyenne du capital issue de notre échantillon est de 137771,80 \$ et son écart-type est de 115103,80 \$.

Pratiques de gestion bénéfiques à l'environnement

Nous avons identifié cinq variables binaires traduisant l'adoption de pratiques de gestion bénéfiques à l'environnement. Ces variables prennent la valeur 1 en cas d'adoption et 0 autrement. Les PGB prises en compte sont la rotation des cultures ($r_{Rotation\ de\ cultures}$), l'injection dans le sol dans les 24 heures suivant l'épandage initial du fumier liquide et semi-liquide ($r_{fumier\ liquide}$) et du fumier solide ($r_{fumier\ solide}$), l'adoption du contrôle d'herbicide et de mesures de sa réduction ($r_{contrôle\ d'\ herbicides}$), l'établissement et le maintien de la bande riveraine d'au moins un mètre ($r_{bande\ riveraine}$).

Autres caractéristiques de production et de gestion

La variable représentant l'adhésion à un groupe environnemental est ($\hbar_{\dots\ ment}$). Elle prend la valeur 1 si le producteur appartient à un groupe environnemental et 0 sinon. La moyenne et l'écart-type sont respectivement 0,595 et 0,492. La variable binaire ($\hbar_{\dots\ iques}$), a pour but d'isoler l'effet découlant de la possession d'un certificat pour les produits biologiques ; ainsi elle prend la valeur 1 lorsque le producteur produit des produits biologiques et 0 sinon. Elle possède une moyenne et un écart-type qui sont respectivement 0,029 et 0,167.

Variables socio-économiques

Enfin notre base de données contient un certain nombre de variables socio-économiques pouvant jouer un rôle dans l'efficacité des entreprises agricoles. Ainsi, la variable *résidence sur ferme*, exprime la résidence des producteurs sur sa ferme. Elle prend la valeur 1 lorsque le producteur vit sur sa propre ferme et la valeur 0 autrement. La variable caractérisant le sexe du producteur est également considérée comme une variable binaire prenant ainsi la valeur 1 s'il s'agit d'une productrice et 0 dans le cas contraire. Le niveau d'éducation, *éducation* prend les valeurs suivantes : 1 lorsque l'école primaire est atteinte par le producteur, 2 lorsque l'école secondaire est accomplie par le fermier, 3 quand le producteur obtient un diplôme d'études techniques, 4 quand le producteur est détenteur d'un diplôme d'études collégiales et 5 quand le producteur a un diplôme du niveau universitaire.

Pour capter l'expérience des producteurs agricoles, la variable *âge* a été construite comme une variable binaire prenant la valeur 0 lorsque l'âge est inférieur à 55 ans et la valeur 1 si l'âge est supérieur à 55 ans. Ainsi l'âge moyen des producteurs est de 49 ans avec un écart allant de 17 à 81 ans.

D'autre part la variable télécommunication « *télécom* » exprimée en milliers de dollars, permet de capter l'accessibilité des producteurs à plus d'information ; cette variable représente le niveau de dépenses annuelles relatives aux télécommunications. Sa moyenne et son écart-type sont respectivement 1102\$ et 812\$.

La décomposition des deux mesures d'efficacités se fera en fonction des variables préalablement exposées ci-haut. Le tableau 1 résume la description de ces variables :

Tableau 1 : Statistiques descriptives des variables utilisées dans l'analyse des deux efficiences

Variable	Moyenne	Écart-type	Minimum	Maximum
Animal (10 ³ \$)	6,55705	22,15949	0,01000	260,00010
Végétal (10 ³ \$)	103,09110	325,41420	0,14979	2696,16500
Azote (kg)	14,84675	12,51234	0,23401	46,97963
Phosphore (kg)	6,35367	5,63456	0,00201	20,54893
Sédiments (kg)	1,51595	1,38411	0,00028	6,13073
Travail	27,55624	91,58667	0,02805	730,09660
Herbicides (kg)	0,56083	0,67607	0,00271	4,98714
Fertilisants (kg)	1,15881	1,39003	0,00593	10,90697
Capital (10 ³ \$)	137,77180	115,10380	1,78690	784,50000
Fumier liquide	0,41905	0,49458	0,00000	1,00000
Rotation de cultures	0,70000	0,45935	0,00000	1,00000
Bande riveraine	0,55714	0,49791	0,00000	1,00000
Contrôle d'herbicides	0,38095	0,48678	0,00000	1,00000
Fumiers solides	0,12857	0,33552	0,00000	1,00000
Âge (ans)	49,35714	10,10050	17,00000	81,00000
Âge ₂ (ans)	0,60000	0,49107	0,00000	1,00000
Âge ₃ (ans)	0,23809	0,42694	0,00000	1,00000
Genre	0,03810	0,19188	0,00000	1,00000
Résidence sur ferme	0,88571	0,31892	0,00000	1,00000
Éducation ₁	2,28571	1,05099	1,00000	5,00000
Éducation ₂	0,45238	0,49892	0,00000	1,00000
Éducation ₃	0,14762	0,35557	0,00000	1,00000
Éducation ₄	0,17143	0,37778	0,00000	1,00000
Club environnement	0,59524	0,49202	0,00000	1,00000
Productions biologiques	0,02857	0,16700	0,00000	1,00000
Production importante ₁	0,77143	0,42092	0,00000	1,00000
Production importante ₂	0,22857	0,42092	0,00000	1,00000
Télécom (10 ³ \$)	1,10205	0,81190	0,05000	4,00000
Taille	158,46470	563,53210	0,58435	5835,28800

Source : Ce tableau est obtenu à partir des données issues de l'enquête du projet WEB.

4.2. Les mesures d'efficacité technique et d'efficacité environnementale

Nous utilisons la fonction distance output (FDO) pour mesurer l'efficacité technique et la fonction de distance hyperbolique (FDH) pour mesurer l'efficacité environnementale. En effet la FDO permet de mesurer uniquement la quantité maximale du vecteur de bons outputs nécessaires pour atteindre la limite de technologie disponible. La FDH consiste à évaluer simultanément la quantité maximale du vecteur de bons outputs et la quantité minimale du vecteur de mauvais outputs nécessaires pour rester sur la frontière (F) de la technologie de production sans que les inputs changent (Cuesta et al., 2009 p.2234).

4.2.1. L'efficacité technique

En se référant à la définition et aux propriétés théoriques de la FDO du chapitre 3 et de la discussion dans Paul et Nehring (2005), on peut établir l'homogénéité linéaire (propriété

T1) en posant $\theta = \frac{1}{y_1} \cdot D_{OT} \left(x_m, \frac{y_i}{y_1}, b_z \right) = D_{OT} \left(x_m, \tilde{y}_i, b_z \right)$. Cette condition s'interprète comme

suit : lorsque l'on fait varier les bons-outputs dans une proportion de θ , la fonction distance output varie dans une proportion identique. La fonction est normalisée en fonction d'un output pour imposer l'homogénéité linéaire. Elle peut alors être utilisée pour évaluer l'efficacité technique car elle est également définie sur l'intervalle]0, 1] (Cuesta et al., 2009). Une ferme agricole est dite pleinement efficace lorsqu'elle produit un volume d'outputs sur l'ensemble (F) de la frontière définissant la technologie; le score d'efficacité technique est alors égal à 1. Elle produit donc une quantité minimale de nuisance agricole (phosphore, azote ou sédiment). Toutefois si la ferme n'est pas pleinement efficace sur le plan technique, elle produit moins d'outputs désirables pour le même vecteur d'inputs et d'outputs indésirables qu'une ferme efficace.

4.2.2. L'efficacité environnementale

En suivant Cuesta et al. (2009), nous définissons la fonction de distance hyperbolique axée sur les outputs de la façon suivante:

$$D_H(x, y, b) = \inf \{ \varphi > 0 : (x, y / \varphi, b) \in F \} \quad (2)$$

où x = les inputs; y = outputs; b = émissions polluantes et F = la frontière de la technologie de production. Elle est comprise entre 0 et 1.

La fonction distance output hyperbolique a les propriétés théoriques suivantes²⁰ :

E1) Quasi-homogène de degré 1 en outputs désirables et de -1 en outputs indésirables :

$$D_H(x, \theta y, \theta^{-1} b) = \theta D_H(x, y, b), \theta > 0$$

E2) Non-décroissante en outputs désirables :

$$D_H(x, \theta y, b) \leq D_H(x, y, b), \theta \in [0, 1]$$

E3) Non-croissante en outputs indésirables :

$$D_H(x, y, \alpha b) \leq D_H(x, y, b), \alpha \geq 1$$

E4) Non-croissante en inputs :

$$D_H(\alpha x, y, b) \leq D_H(x, y, b), \alpha \geq 1$$

La mesure de l'efficacité environnementale est obtenue en normalisant les outputs et le niveau de nuisance. La quasi-homogénéité (propriété E1) est obtenue en posant $\theta = \frac{1}{y_1}$.

Nous pouvons mesurer l'efficacité environnementale en exploitant les interactions entre les bons outputs et les émissions polluantes pour des niveaux d'inputs fixes (Cuesta et al., 2009).

4.3. La forme fonctionnelle

²⁰ Les propriétés théoriques de la fonction distance output hyperbolique et environnementale sont issues de Cuesta et al (2009). La quasi-homogénéité est établie davantage dans Lau (1972).

La forme fonctionnelle retenue pour notre étude est la Translog. Cette fonction est dite flexible car elle permet une approximation de deuxième degré de n'importe quelle technologie (Chambers, 1988 p.164). La forme Translog de la fonction distance output se spécifie empiriquement comme suit:

$$\begin{aligned}
 \ln(D) = & \gamma_o + \sum_{p=1}^6 \gamma_p \ln r_{pf} + \sum_{q=1}^4 \gamma_q \ln h_{vq} + \sum_{m=1}^4 \gamma_m \ln x_{mf} + \\
 & \left(\frac{1}{2}\right) \sum_{m=1}^4 \sum_{n=1}^4 \gamma_{mn} \ln x_{mf} \ln x_{nf} + \sum_{i=1}^{i-1} \gamma_i \ln \tilde{\tau}_{vi} \\
 & \left(\frac{1}{2}\right) \sum_{i=1}^{i-1} \sum_{j=1}^{j-1} \gamma_{ij} \ln \tilde{\tau}_{vi} \ln \tilde{\tau}_{vj} + \sum_{i=1}^{i-1} \sum_{m=1}^4 \gamma_{im} \ln \tilde{\tau}_{vi} \ln x_{mf} \\
 & \sum_{z=1}^3 \gamma_z \ln b_{zf} + \left(\frac{1}{2}\right) \sum_{s=1}^3 \sum_{z=1}^3 \gamma_{sz} \ln b_{sf} \ln b_{zf} + \\
 & \sum_{m=1}^4 \sum_{z=1}^3 \gamma_{mz} \ln x_{mf} \ln b_{zf} + \sum_{i=1}^{i-1} \sum_{z=1}^3 \gamma_{iz} \ln \tilde{\tau}_{vi} \ln b_{zf} + \varepsilon_f
 \end{aligned} \tag{3}$$

En normalisant la fonction distance output par un des outputs, on a une nouvelle variable $\tilde{\tau}_{vi}$ permettant de mesurer l'efficacité technique suite à l'imposition de l'homogénéité linéaire. Ainsi, nous estimons l'efficacité technique en posant $\tilde{\tau}_{v1} = \frac{1}{y_1}$ et $\tilde{\tau}_{vi} = \frac{y_i}{y_1}$. Nous dénotons la fonction de distance permettant de mesurer l'efficacité technique par D_{OT} dans le reste du document.

Pour l'estimation de l'efficacité environnementale, nous avons $\tilde{\tau}_{e1} = \frac{1}{y_1}$ et $\tilde{\tau}_{ei} = \frac{y_i}{y_1}$.

La fonction distance permettant d'estimer l'efficacité environnementale est dénotée par D_H dans le reste du document. Par ailleurs en suivant Cuesta et al. (2009) et en se basant sur l'équation (3), la forme générale de la fonction distance estimée dans notre étude s'établit comme suit :

$$\ln\left(\frac{1}{y_i}\right) = \begin{bmatrix} \gamma_o + \sum_{p=1}^6 \gamma_p \ln r_{pf} + \sum_{q=1}^4 \gamma_q \ln \tilde{h}_{\nu} & \gamma_m \ln x_{mf} + \\ \left(\frac{1}{2}\right) \sum_{m=1}^4 \sum_{n=1}^4 \gamma_{mn} \ln x_{mf} \ln x_{nf} + \gamma_{i\tilde{\nu}} \tilde{\nu} & \\ \gamma_{ii} \ln \tilde{\nu} & \tilde{\nu} \quad \dots \quad \dots \quad \dots \quad \tilde{\nu} \quad \dots \\ \gamma_z \ln b_{zf} + \gamma_{zz} \ln b_{zf} \ln b_{zf} + \sum_{m=1}^4 \gamma_{mz} \ln x_{mf} \ln b_{zf} + \\ \gamma_{iz} \ln \tilde{\nu} & \tilde{\nu} \end{bmatrix} + (-u_f + v_f) \quad (4)$$

4.4. Les composantes des paramètres d'inefficience

Le terme d'erreur ε_f a deux composantes : une composante purement aléatoire normalement distribuée avec une moyenne nulle, $v_f \sim N(z\delta', \sigma_v^2)$ et une composante u_f symbolisant l'inefficacité technique distribuée selon une loi semi-normale.²¹ Comme la moyenne d'une variable aléatoire suivant une loi semi-normale a une moyenne positive, elle peut être décomposée à l'aide d'un vecteur de variables explicatives z et d'un vecteur de coefficients δ mesurant l'impact de chacune des variables sur le terme d'inefficacité technique. Les variables considérées sont : *Productions totales* (la somme des productions animale et végétale), *éducation*, *production importante*, *télécom*, *résidence sur ferme*, *âge* et *genre*. Le terme u_f est donc décomposé de la manière suivante :

$$\begin{aligned} u_f = & \delta_{\text{Productions totales}} \text{Productions totales} + \delta_{\text{Éducation}_2} \text{Éducation}_2 + \delta_{\text{Éducation}_3} \text{Éducation}_3 \\ & + \delta_{\text{Éducation}_4} \text{Éducation}_4 + \delta_{\text{Télécom}} \text{Télécom} + \delta_{\text{Genre}} \text{Genre} + \delta_{\text{Résidence sur ferme}} \text{Résidence sur ferme} \\ & + \delta_{\text{Production importante}} \text{Production importante} + \delta_{\text{Âge}_2} \text{Âge}_2 + \delta_{\text{Âge}_3} \text{Âge}_3 \end{aligned} \quad (5)$$

²¹ La distribution semi-normale est la fonction cumulative de la valeur absolue d'une variable aléatoire normalement distribuée. Supposons que $\psi \sim N(0, \sigma_\psi^2)$ et $u_f = |\psi|$, les deux premiers moments de u_f sont donnés par : $E[u_f] = \sigma_\psi \sqrt{\frac{2}{\pi}}$ et $\text{var}(u_f) = \sigma_\psi^2 \left(1 - \frac{2}{\pi}\right)$.

4.5. Les mesures de performance économique

Il existe plusieurs indicateurs de performance économique permettant d'évaluer le processus de production d'une ou plusieurs fermes agricoles. Nous rapportons plusieurs indicateurs sous forme d'élasticités pour éviter les problèmes d'unités de mesure et ainsi faciliter l'interprétation des résultats. Une élasticité mesure le changement d'une variable en pourcentage suite à un changement de 1% d'une autre variable. Les fonctions de distance peuvent générer des élasticités pour décrire tous les aspects des technologies, que cela soit l'élasticité d'un output désirable par rapport aux inputs, le degré de substitution ou de complémentarité entre les inputs ou le degré de complémentarité entre les outputs désirables et indésirables (Cuesta et al., 2009 p.2238).

4.5.1. Élasticités output-input

L'élasticité output-input représente la variation relative de la fonction distance output suite à la variation relative d'un input, *ceteris paribus*²². La formule utilisée pour calculer les différentes élasticités liées à la fonction distance output et la fonction distance hyperbolique sont présentées dans les sections suivantes.

Élasticités outputs désirables –inputs de premier degré:

$$\mathcal{E}_{y,m}^{OT} = \frac{\partial \ln y}{\partial \ln x_m} = \gamma_m + \sum_{n=1}^4 \gamma_{mn} \ln x_{nf} + \sum_{i=2}^{i-1} \gamma_{im} \ln \tilde{z}_{ij} - \sum_{z=1}^{\infty} \gamma_{mz} \ln b_{zf} \quad (6)$$

$$\mathcal{E}_{y,m}^H = \frac{\partial \ln y}{\partial \ln x_m} = \gamma_m + \sum_{n=1}^4 \gamma_{mn} \ln x_{nf} + \sum_{i=1}^{i-1} \gamma_{im} \ln \tilde{z}_{ij} - \sum_{z=1}^{\infty} \gamma_{mz} \ln \tilde{l}_{zf} \quad (7)$$

²² La variation dans l'utilisation d'un intrant est provoquée par un changement dans le prix relatif de cet intrant.

Les équations (6) et (7) représentent le changement en pourcentage d'un output (ex., la production animale) en réponse à un changement d'une unité de pourcentage d'un input (ex., travail) lorsque tous les autres outputs et inputs restent constants. Des effets de second degré, comme l'effet du niveau d'un input tiers sur l'élasticité outputs désirables-input, peuvent aussi être mesurés à travers le calcul d'élasticités de second degré.

Élasticités outputs désirables –inputs de second degré

$$\psi_{m,n}^{OT} = \psi_{m,n}^H = \frac{\partial \varepsilon_{y,m}^{OT}}{\partial \ln x_m} = \gamma_{mn}$$

(8)

$$\xi_{m,n} = \gamma_{mn} \times \ln x_n$$

(9)

L'équation (8) représente la dérivée de l'élasticité de premier degré. Elle nous dit comment l'élasticité de premier degré change en pourcentage suite à une augmentation de 1% d'un input, en gardant tous les autres inputs et outputs constants. L'interprétation donnée dans Cuesta et al. (2009, p.2238) exploite le lien entre l'équation (8) et l'élasticité du produit marginal définie comme la variation en pourcentage du produit marginal d'un input suite à une augmentation de 1% d'un autre input : $\partial \ln PM_{mn} / \partial \ln x_k$. Comme la productivité d'un input augmente lorsque le niveau d'un input complémentaire augmente, un effet positif est attendu lorsque les inputs sont complémentaires, toutefois, si la variable dépendante de l'équation estimée est négative, alors les signes des dérivées croisées indiquent des relations de substituabilité (+) ou de complémentarité (-) entre les inputs car l'équation (8) est une élasticité du produit marginal pondérée, on peut la multiplier par $\ln x_n$ pour obtenir une mesure plus intuitive, d'où l'équation (9).

4.5.2. Élasticités de substitution output désirable-output indésirable

Pour évaluer l'interaction entre l'output désirable et l'output indésirable, nous calculerons les élasticité premières (dérivées premières) par rapport à l'output désirable et l'output indésirable :

Élasticité premières output désirable-output désirable

$$\varepsilon_{D_{OT}, y} = \frac{\partial D_{OT}}{\partial y_{if}} = \frac{\partial D_{OT}}{\partial \tilde{y}_{if}} - \alpha_{if} \left[\sum_{j=1}^{j-1} \gamma_{ij} \ln \tilde{y}_{ij} - \sum_{m=1}^4 \gamma_{im} \ln x_{mf} + \sum_{z=1}^3 \gamma_{sz} \ln b_{sf} \right] \quad (10)$$

$$\varepsilon_{D_{H}, y} = \frac{\partial D_H}{\partial y_{if}} = \frac{\partial D_H}{\partial \tilde{y}_{if}} - \alpha_{if} \left[\sum_{j=1}^{j-1} \gamma_{ij} \ln \tilde{y}_{ij} - \sum_{m=1}^4 \gamma_{im} \ln x_{mf} + \sum_{z=1}^3 \gamma_{sz} \ln \tilde{y}_{zj} \right] \quad (11)$$

Les équations (10) et (11) expriment l'effet d'une augmentation d'un output désirable sur les fonctions distance lorsque les autres facteurs restent inchangés. Les équations suivantes font la même chose pour une augmentation d'un output indésirable.

Élasticité premières output désirable-output indésirable

$$\varepsilon_{y,b}^{OT} = \frac{\partial \ln y}{\partial \ln b} = \gamma_z + \gamma_{sz} \ln b_{sf} + \sum_{m=1}^4 \gamma_{mz} \ln x_{mf} + \sum_{i=1}^{i-1} \gamma_{iz} \ln \tilde{y}_{ij} \quad (12)$$

$$\varepsilon_{y,b}^H = \frac{\partial \ln y}{\partial \ln \tilde{y}_{if}} = \gamma_{sz} \ln \tilde{y}_{zj} + \sum_{m=1}^4 \gamma_{mz} \ln x_{mf} + \sum_{i=1}^{i-1} \gamma_{iz} \ln \tilde{y}_{ij} \quad (13)$$

On comprend à travers les équations (12) et (13) qu'il existe un taux marginal de transformation entre les outputs désirables et les outputs indésirables par la mesure des élasticité premières. Ces deux mesures d'élasticité sont similaires à celles liées aux inputs obtenues dans les équations (6) et (7) .

On peut également obtenir l'un de ces deux types d'élasticité, en tenant compte des conditions de quasi homogénéité (Cuesta et al., 2009) :

$$\varepsilon_{D_{OT},y} = 1 + \varepsilon_{y,b}^{OT} \quad (14)$$

Ainsi le ratio des élasticités, mesurant la substituabilité entre l'output désirable et l'output indésirable, s'établit de la façon suivante :

$$\tau_{y,b}^{OT} = \left(\frac{\varepsilon_{D_{OT},y}}{\varepsilon_{y,b}^{OT}} \right) = \left(\frac{\frac{\partial D_{OT}}{\partial \tilde{y}_v}}{\frac{\partial \ln y}{\partial \ln b}} \right) \quad (15)$$

$$\tau_{y,b}^H = \left(\frac{\varepsilon_{D_H,y}}{\varepsilon_{y,b}^H} \right) = \left(\frac{\frac{\partial D_H}{\partial y_{if}^*}}{\frac{\partial \ln y}{\partial \ln \tilde{l}}} \right) \quad (16)$$

Ces ratios d'élasticités varient en fonction des outputs désirables et indésirables. C'est-à-dire que l'effet d'une diminution de l'output indésirable sur la production d'outputs désirables dépend du niveau d'output indésirable (Cuesta et al., 2009).

4.6. Le prix fictif du phosphore

En pratique nous connaissons les prix des « *bons outputs* » puisque les prix des bovins, des porcs et des cultures sont mis à la disposition du public. Cependant, il n'existe pas de marché pour générer des prix pour les « *mauvais outputs* » tels que le phosphore, l'azote et le dioxyde de soufre. Pour déterminer les prix de ces « *mauvais outputs* », on distingue plusieurs méthodes mais celle que nous allons utiliser pour calculer le prix du phosphore,

est celle utilisée par Cuesta et al. (2009) qui exploite la dualité entre la fonction distance hyperbolique et la fonction de profit.²³ Selon Cuesta et al. (2009), le ratio d'élasticité de substitution ($\tau_{y,b}^H$) permet d'évaluer le coût d'opportunité économique entre la production désirable et la production indésirable. Notre fonction de profit s'écrit comme suit :

$$\pi(x, p, q) = \max_{y,b} \{py / qb : D_H \leq 1\} \quad (17)$$

où p et q représentent respectivement les prix d'outputs désirables et d'outputs indésirables de chaque producteur.

Les conditions de premier ordre du programme de maximisation du profit sont :

$$py / qb = \lambda (\partial \ln D_H / \partial \ln y) \cdot D_H \quad (18)$$

$$py / qb = -\lambda (\partial \ln D_H / \partial \ln b) \cdot D_H \quad (19)$$

Pour dériver le prix fictif de phosphore, Cuesta et al. (2009) supposent :

$$\lambda = 1^{24} \quad (20)$$

$$\tau_{y,b}^H = \varepsilon_{D,y}^H / \varepsilon_{D,b}^H = -1 \quad (21)$$

En tenant compte de la condition de quasi-homogénéité de D_H , Cuesta et al. (2009) supposent :

$$\varepsilon_{D,y}^H - \varepsilon_{D,b}^H = 1 \Rightarrow \varepsilon_{D,y}^H = -\varepsilon_{D,b}^H = 0,5 \quad (22)$$

D'après toutes ces conditions exposées préalablement, le calcul du prix fictif du phosphore est alors :

$$q = py / |0,5| \cdot D_H b \quad (23)$$

²³ Färe et al. (2005) ont aussi utilisé une fonction de profit pour calculer le prix fictif du SO₂.

²⁴ Cette condition non contraignante sur le multiplicateur de Lagrange λ est discutée dans Färe et al. (2005).

Chapitre 5

Présentation et interprétation des résultats empiriques

Ce chapitre présente, analyse et interprète les résultats des estimations économétriques des efficiences technique et environnementale associées aux deux fonctions distance spécifiées au chapitre 4. Les estimations économétriques ont été réalisées avec le logiciel *Stata11*. La commande frontière de *Stata11* nous permet de maximiser la fonction de log-vraisemblance en utilisant la méthode de Newton-Raphson. En plus l'estimation de variance-covariance est calculée comme étant l'inverse du négatif de l'Hessien (matrice des dérivées partielles secondes). Plus spécifiquement, les équations (4) et (5) ont été estimées par la procédure *z* qui permet d'estimer des frontières d'efficacité et la décomposition de l'inefficacité par le maximum de vraisemblance.

5.1. Paramètres estimés des fonctions distance

Nous analysons tout d'abord les résultats obtenus en estimant l'équation (4). Le tableau 2 présente les résultats obtenus. Le graphique de la distribution d'efficacité technique ainsi que celui de l'efficacité environnementale sont présentés dans les paragraphes suivants.

Outputs

Les coefficients reliés à la production animale, $\gamma_{Animale}$ sont positifs pour les fonctions distance mesurant les efficiences technique et environnementale. Ce coefficient est significatif au seuil de 5% pour la fonction distance output mais ne l'est pas pour la fonction distance hyperbolique. Les résultats de l'estimation des deux fonctions montrent que le paramètre $\gamma_{Phosphore}$ captant l'effet direct des émissions polluantes est négatif, ce qui

implique qu'une baisse des émissions de phosphore diminue la valeur des deux fonctions de distance mais elle fait accroître le score des deux efficacités.

Dans le tableau 2, les valeurs -0,00168 et -0,06963 correspondent respectivement aux émissions polluantes de phosphore ($\gamma_{\text{Phosphore}}$) des fonctions distances output et hyperbolique. Ainsi une baisse du phosphore de 1% entraînerait des baisses dans les fonctions de distance de 0,16% et de 6,9%, qui peuvent être interprétées comme une hausse des efficacités technique et environnementale; le résultat similaire a été obtenu dans Cuesta et al. (2009, p.2237).

Les effets d'interaction entre le *phosphore*, la production *animale*, le *travail*, le *capital* et les *herbicides* est négatif pour la fonction distance hyperbolique. Comme l'indique le signe du coefficient de la variable *phosphore* \times *phosphore*, l'effet marginal du phosphore sur la fonction de distance hyperbolique est décroissant. Par contre, la dose de fertilisant a un impact positif sur l'effet marginal du phosphore; cela s'explique par le fait qu'une hausse de l'utilisation des *fertilisants* diminue l'impact négatif du phosphore sur la fonction de distance.

Inputs

Seul le coefficient γ_{Travail} lié à la variable input travail est statistiquement différent de zéro pour les fonctions distance output et hyperbolique contrairement aux autres variables inputs: *capital*, *fertilisants* et *herbicides*. De plus, les coefficients d'interaction entre le travail et les deux autres inputs (*fertilisants* et *herbicides*) sont statistiquement différents de zéro pour les deux fonctions distance; tel n'est pas le cas pour l'input *capital*.

Impact de l'adoption des PGB et des autres caractéristiques de production et de management sur la fonction de distance

Nous remarquons que les coefficients relatifs à la possession d'un certificat pour les produits biologiques, $\gamma_{\text{Productions biologiques}}$ et à la rotation des cultures, $\gamma_{\text{Rotation de cultures}}$ sont négatifs et statistiquement différents de zéro au seuil de 5%.

Par contre, seul le coefficient captant la possession d'un certificat des produits biologiques, $\gamma_{Productions\ biologiques}$ est négatif et significatif au même seuil pour la fonction distance hyperbolique mesurant l'efficacité environnementale.

Tableau 2 : Coefficients estimés des fonctions distance

Paramètres	D_{OT}	D_H	Paramètres	D_{OT}	D_H
γ_0	-0,98327 (0,62260)	-0,75777 (0,65194)	$\gamma_{HerbicidesxFertilisants}$	0,44161 (0,23163)	0,35541 (0,22704)
$\gamma_{Animale}$	0,21924 (0,09515)	0,16193 (0,09185)	$\gamma_{FertilisantsxFertilisants}$	-0,24853 (0,14590)	-0,18819 (0,14109)
$\gamma_{Phosphore}$	-0,00168 (0,10491)	-0,06963 (0,10302)	$\gamma_{TravailxAnimale}$	-0,00772 (0,00874)	-0,00593 (0,00938)
$\gamma_{PhosphorexAnimale}$	-0,00801 (0,00742)	-0,00828 (0,00717)	$\gamma_{FertilisantsxAnimale}$	-0,10573 (0,07409)	-0,05625 (0,07007)
$\gamma_{Capital}$	0,00970 (0,18292)	0,02660 (0,18076)	$\gamma_{HerbicidesxAnimale}$	0,08374 (0,07361)	0,03759 (0,06952)
$\gamma_{Travail}$	-0,57021 (0,14496)	-0,63187 (0,16724)	$\gamma_{CapitalxAnimale}$	-0,01561 (0,01433)	-0,00592 (0,01342)
$\gamma_{Herbicides}$	0,12088 (0,67990)	0,17596 (0,67164)	$\gamma_{PhosphorexTravail}$	-0,03461 (0,01378)	-0,01443 (0,01344)
$\gamma_{Fertilisants}$	-0,26025 (0,66665)	-0,25010 (0,65613)	$\gamma_{PhosphorexFertilisants}$	0,02090 (0,06928)	0,02766 (0,06850)
$\gamma_{CapitalxCapital}$	-0,00767 (0,01997)	-0,00489 (0,01915)	$\gamma_{PhosphorexHerbicides}$	-0,01203 (0,06661)	-0,05069 (0,06682)
$\gamma_{CapitalxTravail}$	-0,01453 (0,01997)	0,01448 (0,03196)	$\gamma_{PhosphorexCapital}$	0,00121 (0,01778)	-0,01301 (0,01590)

Tableau 2 (suite) : Coefficients estimés des fonctions distance

Paramètres	D_{OT}	D_H	Paramètres	D_{OT}	D_H
$\gamma_{\text{CapitauxFertilisants}}$	0,10734 (0,12163)	0,10146 (0,11605)	$\gamma_{\text{Rotation de cultures}}$	-0,13600 (0,05789)	-0,08362 (0,05571)
$\gamma_{\text{CapitauxHerbicides}}$	-0,07706 (0,11770)	-0,07694 (0,11233)	$\gamma_{\text{Bande riveraine}}$	-0,04221 (0,04922)	-0,05619 (0,04706)
$\gamma_{\text{TravauxTravail}}$	-0,01083 (0,01046)	-0,00141 (0,01505)	$\gamma_{\text{Contrôle d'herbicides}}$	0,04063 (0,05487)	0,05311 (0,05334)
$\gamma_{\text{TravauxFertilisants}}$	-0,23012 (0,07995)	-0,21931 (0,09732)	$\gamma_{\text{Fumiers solides}}$	-0,03301 (0,09151)	-0,01549 (0,08744)
$\gamma_{\text{TravauxHerbicides}}$	0,21506 (0,07796)	0,22655 (0,09600)	$\gamma_{\text{Fumiers liquides}}$	0,01031 (0,05874)	0,02695 (0,05685)
$\gamma_{\text{HerbicidesxHerbicides}}$	-0,18324 (0,10525)	-0,16093 (0,10435)	$\gamma_{\text{Club environnement}}$	-0,04461 (0,04908)	-0,05238 (0,04658)
$\gamma_{\text{PhosphorexPhosphore}}$	0,01174 (0,00502)	-0,00150 (0,00414)	$\gamma_{\text{Produits biologiques}}$	-0,37147 (0,17683)	-0,40191 (0,04658)

N.B : Dans les parenthèses se trouvent les écarts-types. D_{OT} : Fonction distance output de type Translog mesurant l'efficacité technique; D_H : Fonction distance hyperbolique mesurant l'efficacité environnementale.

5.2. Les Mesures de performance économique

En analysant les coefficients issus du calcul des élasticités premières présentés dans le tableau 3, nous constatons que les coefficients liés au travail ($\varepsilon_{Y, X_2} = -\partial \ln D / \partial \ln X_2 = \partial \ln Y / \partial \ln X_2$) sont statistiquement distincts de zéro au seuil de 5% respectivement pour la mesure des efficacités technique et environnementale :

-0,82557 et -0,78436. Ainsi, une augmentation de 1% dans la quantité de travail provoquera une hausse de 0,82% et 0,78% de la production animale pour les fonctions distance output et hyperbolique lorsque toutes les autres productions sont inchangées. Ce résultat analogue est trouvé par Tamini et al. (2010)²⁵ : -0,621. De leur côté, Cuesta et al. (2009) obtiennent des valeurs de -0,0260 et -0,0294.

Entre autres, seuls les coefficients en interaction avec le facteur de production capital sont significatifs au seuil de 5% pour les fonctions distance output et hyperbolique :

$\xi_{x_1, x_1}, \xi_{x_2, x_1}, \xi_{x_3, x_1}, \xi_{x_4, x_1}$. Le grand nombre de paramètres à estimer a l'avantage d'isoler plusieurs effets technologiques mais cela pourrait également entraîner un problème de multicollinéarité engendrant de plus faibles niveaux de signification.

Fonction distance output

D'une part la mesure d'efficacité technique montre que le capital et le travail sont des inputs complémentaires car (-0,06641<0 et -0,02451<0). Dans le processus de production le facteur capital est forcément requis pour compléter le rôle du facteur travail et vice-versa. D'autre part les inputs fertilisants et herbicides sont également complémentaires parce que (-0,21078<0 et 0,54543<0). Cette complémentarité entre les fertilisants et herbicides est également trouvée par Ghazalian et al. (2010)²⁶.

Fonction distance hyperbolique

Sur le plan environnemental, étant donné que 0,06617>0 et 0,02442>0 au tableau 3, les inputs capital et travail sont des substituts. En effet, une augmentation de capital a un effet plus fort sur la productivité du travail plus qu'une augmentation du travail en a sur la productivité du capital. Par ailleurs, les agriculteurs devraient investir en machinerie lourde et non en main d'œuvre pour être respectueux envers l'environnement.

Les inputs fertilisants et herbicides sont mutuellement complémentaires sur le plan technique : (-0,16964<0 et -0,43896<0). Les herbicides augmentent la productivité des

²⁵ Ces auteurs ont utilisé une fonction distance input pour dériver l'élasticité liée au facteur travail

²⁶ Bien que ces auteurs aient utilisé une fonction de coût Translog, nous aboutissons à la même conclusion quant au lien qui existe entre les intrants fertilisants et herbicides.

fertilisants et vice-versa. En ce qui concerne les interactions entre les autres inputs, les signes des élasticités secondes ne sont pas identiques et l'on ne peut pas conclure.

Tableau 3 : Élasticités output désirable-input issues des fonctions distances output et hyperbolique

Inputs	D_{OT}				D_H			
	X ₁ -Capital	X ₂ -Travail	X ₃ -Fertilisants	X ₄ -Herbicides	X ₁ -Capital	X ₂ -Travail	X ₃ -Fertilisants	X ₄ -Herbicides
γ_m	0,00970 (0,18292)	-0,57021 (0,14496)	-0,26025 (0,66665)	0,12088 (0,67990)	0,02660 (0,18076)	-0,63187 (0,16724)	-0,25010 (0,65613)	0,17596 (0,67164)
$\varepsilon_{y,m}$	0,04972 (0,05521)	-0,82557 (0,09714)	-0,19250 (0,36665)	-0,15817 (0,50266)	0,04017 (0,05338)	-0,78436 (0,08223)	-0,19193 (0,31731)	-0,11168 (0,42539)
ξ_{m,x_1}	-0,03504 (0,00732)	-0,06641 (0,01388)	0,49059 (0,10252)	-0,35221 (0,07360)	-0,02236 (0,00467)	0,06617 (0,01383)	0,46369 (0,09690)	-0,35163 (0,07348)
ξ_{m,x_2}	-0,02451 (0,02520)	-0,01826 (0,01878)	-0,38815 (0,39909)	0,36274 (0,37297)	0,02442 (0,02511)	-0,00237 (0,00244)	-0,36990 (0,38033)	0,38212 (0,39290)
ξ_{m,x_3}	-0,05123 (0,13988)	0,10984 (0,29988)	0,11862 (0,32387)	-0,21078 (0,57548)	-0,04842 (0,13221)	0,10467 (0,28578)	0,08982 (0,24524)	-0,16964 (0,46314)
ξ_{m,x_4}	0,09518 (0,10358)	-0,26562 (0,28907)	-0,54543 (0,59359)	0,22631 (0,24630)	0,09503 (0,10342)	-0,27981 (0,30452)	-0,43896 (0,47772)	0,19876 (0,21631)

N.B : Les chiffres entre les parenthèses de chaque case, représentent les écarts-types associés à chaque coefficient. Ces élasticités sont obtenues à partir de la méthode Delta qui consiste à calculer les intervalles de confiance des variances d'un échantillon de grande taille; elles sont reportées à leur moyenne respective.

Les résultats présentés au tableau 4 indiquent une complémentarité entre l'output désirable et l'output non désirable pour les efficacités technique et environnementale; on ne peut pas produire d'animaux ou des végétaux sans produire du phosphore.

Dans la mesure des deux efficacités, toutes les valeurs liées à l'élasticité de substituabilité sont négatives. Ces valeurs sont petites et expriment un coût d'opportunité faible de

l'output désirable en termes de l'output indésirable et réciproquement. Par conséquent, Donc les producteurs de Chaudière-Appalaches ont un coût de renonciation relativement faible pour la production animale par rapport à l'émission polluante agricole, le phosphore. L'on remarque que la plupart des rivières des bassins agricoles du Québec ont des fortes concentrations de phosphore supérieures à 0,1mg/ L (Gangbazo et Le Page, 2005). Il se pourrait qu'un tel comportement des producteurs soit dû au délai au moratoire accordé à ce secteur sur la norme de phosphore jusqu'en 2010 par les autorités québécoises.

Tableau 4 : Substituabilité entre outputs désirable et indésirable, $\tau_{y,b}^H$

	D_{OT}	D_H
$\tau_{y,b}^H$	0,18509 (14,61511)	-29,96530 (423,30670)
$\mathcal{E}_{D,y}^H$	0,07227 (0,05075)	0,06987 (0,04303)
$\mathcal{E}_{D,b}$	-0,00768 (0,05433)	-0,08171 (0,05237)

5.3. Les efficiences technique et environnementale

Variables explicatives de l'inefficience des fonctions distance output et hyperbolique

Comme précédemment indiqué, nous avons formulé l'hypothèse selon laquelle l'inefficience technique et l'inefficience environnementale dépendent de différentes variables explicatives, comme l'éducation et l'âge de l'opérateur. Les coefficients liés à l'éducation, $\delta_{Éducation_2}$, la résidence sur ferme $\delta_{Résidence\ sur\ ferme}$, et l'âge, $\delta_{Âge_3}$ sont statistiquement différents de zéro au seuil de 5%. Le signe négatif des coefficients, $\delta_{Éducation_2}$ et $\delta_{Éducation_4}$ (voir tableau 5), nous déduisons que moins les producteurs de la région de Chaudières-Appalaches sont instruits plus ils seront inefficients sur le plan technique et environnemental. Intuitivement, des producteurs avec un plus un niveau d'éducation devrait avoir un avantage au niveau de l'acquisition et l'assimilation de nouvelles informations, ce qui devrait les avantager au niveau de la gestion. Ce résultat est donc contraire à celui que nous nous attendions à trouver. Enfin le signe négatif du coefficient du groupe d'âge affiché par les fonctions distance output et hyperbolique ($\delta_{Âge_3}$) montre que plus l'âge des producteurs augmente, moins ils seront inefficients sur le plan technique et environnemental. L'expérience joue donc un rôle important sur l'efficacité, un élément qui est ressorti aussi dans Mosheim et Lovell (2009) dans leur analyse de l'efficacité et des économies d'échelle dans l'industrie laitière américaine.

Tableau 5: Coefficients estimés des termes d'inefficience des fonctions distance

Paramètres	D_{OT}	D_H
σ_O	-2,79400 (0,18191)	-2,90003 (0,19695)
$\delta_{Télécom}$	-0,17376 (0,23741)	-0,22835 (0,24095)
$\delta_{Productions\ totales}$	0,00082 (0,00062)	0,00059 (0,00063)
$\delta_{Production\ impor\ tant\ e_2}$	-0,23678 (0,46107)	0,10992 (0,47063)
$\delta_{Éducation_2}$	-1,00748 (0,41807)	-1,15624 (0,43235)
$\delta_{Éducation_3}$	0,03658 (0,47575)	0,03789 (0,46897)
$\delta_{Éducation_4}$	-0,05529 (0,50095)	-0,08203 (0,49086)
$\delta_{Résidence\ sur\ ferme}$	-0,88119 (0,39015)	-0,84741 (0,40140)
δ_{Genre}	-3,02932 (2,07172)	-2,23864 (1,62988)
$\delta_{Âge_2}$	-0,09836 (0,37132)	-0,16406 (0,37327)
$\delta_{Âge_3}$	-3,11963 (1,11047)	-2,90769 (0,94096)
σ_v	0,24734 (0,02250)	0,23457 (0,02310)

Dans les parenthèses se trouvent les écarts-types. D_{OT} : Fonction distance output de type Translog mesurant l'inefficience technique; D_H : Fonction distance hyperbolique mesurant l'inefficience environnementale.

Les scores des Fonctions distance

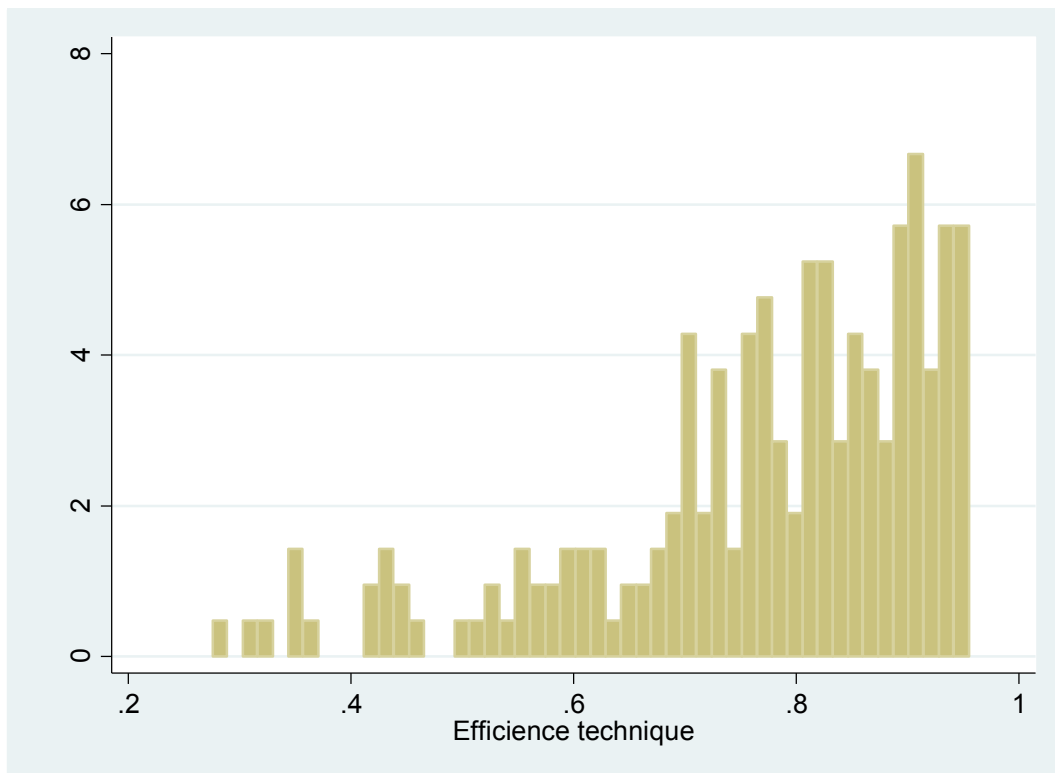
Fonction distance output : Efficience technique

Le score moyen de l'inefficience technique issu de notre échantillon de 210 observations s'établit à 22,83% associé à une déviation standard de l'ordre de 15,35%; ce qui montre que le score moyen d'efficience technique est de 77,17% pour les producteurs québécois de la région de Chaudière-Appalaches contre 43,20% trouvé dans Tamini et al (2010)²⁷.

En outre le graphique 1 montre que l'efficience technique est inégalement répartie avec un score minimum de 0,28 et un score maximum de 0,96 respectivement pour la ferme la moins efficiente et celle qui est la plus efficiente. L'efficience technique varie peu selon les secteurs animal et végétal. Ainsi la moyenne d'efficience technique est légèrement plus élevée dans le secteur végétal que dans le secteur animal : 0,77332 (écart-type de 0,15444) > 0,76655 (écart-type de 0,15191). Compte tenu de la taille des écarts-type, on peut conclure que la différence dans les moyennes n'est pas statistiquement significative. Dans Tamini et al. (2010), les scores moyens d'efficience technique sont respectivement 0,466 et 0,428 pour le secteur animal et le secteur végétal.

²⁷ Reinhard et Thijssen (2000), en étudiant les fermes laitières, trouvent une valeur de 0,845 comme score moyen d'efficience technique. Atkinson et Dorfman (2005) obtiennent, dans le secteur électrique des États-Unis d'Amérique, une moyenne pondérée d'efficience technique de l'ordre de 0,55. Enfin Cuesta et al (2009) calcule 0,9373 comme score moyen d'efficience technique des firmes électriques américaines.

Graphique 1 : Distribution de l'efficience technique de la fonction distance output

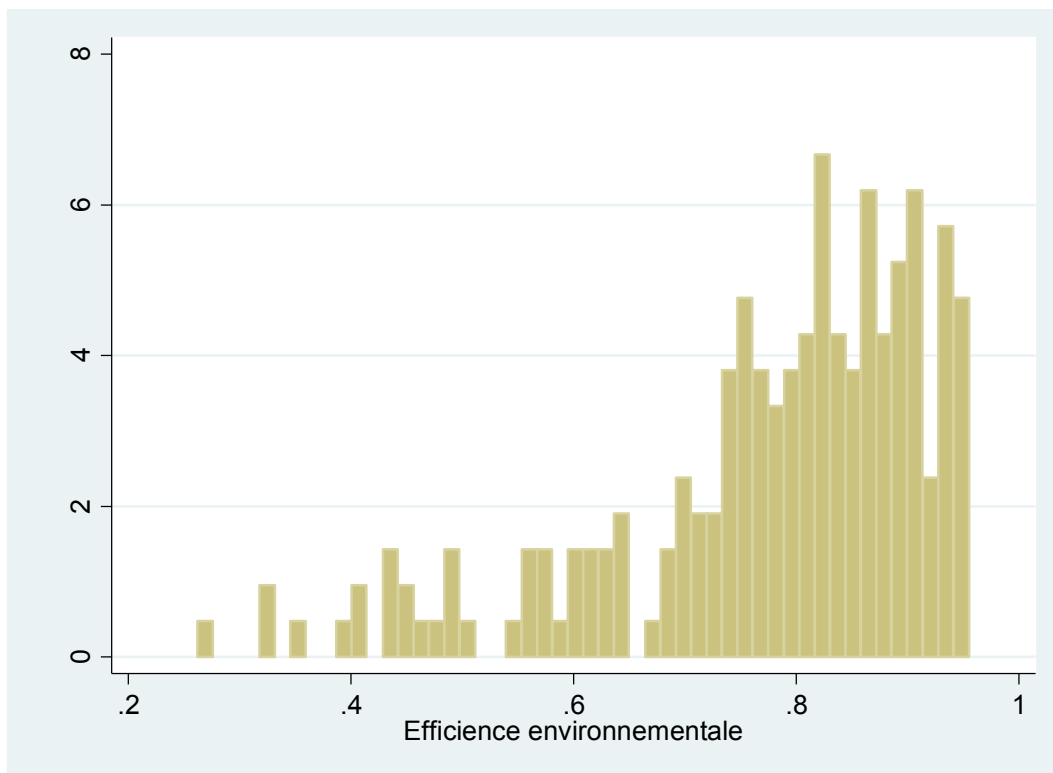


Fonction distance hyperbolique : Efficience environnementale

Le graphique 2 nous montre que la distribution de l'efficience environnementale n'est pas uniformément répartie. En effet la valeur minimale de l'efficience environnementale est de 0,26 ce qui est presque quatre fois plus faible que la valeur maximale de 0,95537. Le score moyen d'efficience environnementale est de 0,77599 indiquant que les producteurs agricoles québécois pourraient accroître soit leur production animale soit leur production végétale de 28,86% ($1/0,77599=1,28868$), avec une réduction simultanée de phosphore de 22,40% ($1-0,77599=0,22401$). Les scores moyens d'efficience environnementale sont de 0,78337 (écart-type de 0,14440) et 0,75106 (écart-type de 0,15392) respectivement pour les secteurs végétal et animal et sont statistiquement distincts de zéro au seuil de 5%. Toutefois, la différence entre ces deux scores moyens est faible par rapport aux écarts-types rapportés.²⁸

²⁸ Cette comparaison est identique à celle trouvée par Tamini et al. (2010) où le score moyen d'efficience environnementale du secteur végétal supplante celui du secteur animal : $0,504 > 0,380$. La performance environnementale des entreprises électriques américaines établie par Cuesta et al (2009) est de 0,9366. Murty et al. (2006) obtiennent une moyenne d'efficience environnementale de 0,853 pour les entreprises sucrières indiennes.

Graphique 2 : Distribution de l'efficacité environnementale de la fonction distance hyperbolique



Analyse de corrélation entre les deux efficacités

Dans ce sous paragraphe nous analysons la corrélation entre les deux efficacités en effectuant un double test non-paramétrique d'hypothèses : test de corrélation de rang de Spearman et test de corrélation de rang de Kendall. Le test de corrélation de Spearman réalisé entre les 210 observations rejette l'hypothèse nulle d'indépendance entre l'efficacité technique et l'efficacité environnementale pour confirmer une forte corrélation (0,9615) entre les efficacités technique et environnementale. Le test de rang de Kendall présenté au tableau 6 montre qu'il existe une corrélation élevée (0,8449) entre les rangs des fermes lorsque classées en fonction des efficacités techniques et environnementales. Le tableau 6 classe les dix meilleures exploitations agricoles et les dix dernières en utilisant le critère d'efficacité environnementale, le principe étant de voir jusqu'à quel point les fermes conservent leur rang lorsque examine leur efficacité technique. Nous constatons beaucoup de similarités dans la classification des entreprises.

Tableau 6 : Classement des dix et moins efficaces fermes agricoles selon le modèle des efficacités technique et environnementale

Fermes	D_{OT}	D_H
<i>Dix fermes les plus efficaces</i>		
1	3	1
2	1	2
3	8	3
4	10	4
5	2	5
6	6	6
7	11	7
8	5	8
9	4	9
10	7	10
<i>Dix fermes les moins efficaces</i>		
201	200	201
202	198	202
203	192	203
204	206	204
205	197	205
206	208	206
207	205	207
208	210	208
209	209	209
210	207	210

5.4. Le prix fictif du phosphore

Nos calculs du prix fictif moyen lié aux émissions polluantes d'un kilogramme de phosphore donnent 386,84\$/kg. Ce prix fictif s'interprète comme la valeur des productions totales (animale et végétale) qui doit être sacrifiée, dès que toute inefficience est supprimée, afin de permettre aux productions animale ou végétale d'atteindre la frontière d'efficience (Färe et al., 2005). En d'autres termes le montant de 386,8397\$ représente le coût en termes de quantités d'animaux et végétaux qui seraient abandonnées afin de réduire d'un kilogramme les émissions de phosphore. Tamini et al. (2010) trouvent comme valeur moyenne de 73,668\$ pour la fonction de sous-coût lié au phosphore; ce qui implique qu'une réduction de 10% du ruissellement de phosphore aurait pour coût 461,24\$. Étant donné la moyenne de l'échantillon de Tamini(2010) cela représente une réduction des émissions de phosphore de 6,35 kg et donc un prix implicite du phosphore de 11,60 \$/kg. Ghazalian et al. (2008) trouvent une valeur moyenne du sous-coût d'émission d'azote dans les eaux de ruissellement de l'ordre de 234,50\$ traduisant ainsi que le coût associée pour une diminution de 10% d'azote serait de 324,1\$. En utilisant le même raisonnement que celui-ci-dessus, le prix implicite de l'azote serait alors de 15,74\$/kg.

Chapitre 6

Conclusion

Dans notre étude nous avons évalué les efficiences technique et environnementale en suivant l'approche proposée par Cuesta et al. (2009). Celle-ci s'appuie sur une analyse de frontière stochastique paramétrique appliquée aux fonctions distance. Cette approche consiste à mesurer l'efficacité technique avec la fonction distance output traditionnelle alors que l'efficacité environnementale est estimée grâce à une fonction distance hyperbolique dans laquelle nous avons normalisé en utilisant un des outputs désirables comme numéraire.

Les résultats empiriques issus de ces deux formes fonctionnelles soulignent qu'il y a une corrélation relativement élevée entre l'efficacité technique et l'efficacité environnementale. Dans les fermes à prédominance production animale, le score moyen d'efficacité technique est plus faible que celle à prédominance végétale ; il en est autant pour la moyenne de l'efficacité environnementale. La distribution des scores des efficiences technique et environnementale n'est pas corrélée à la taille des exploitations agricoles.

Nos résultats montrent aussi que le niveau d'éducation élevé des producteurs de Chaudière-Appalaches améliore le score des deux efficiences. De surcroît plus l'âge des producteurs augmente, moins ils sont efficaces sur le plan technique et environnemental.

Le calcul des élasticités d'output par rapport aux inputs indique non seulement la présence de complémentarité entre les fertilisants et les herbicides mais aussi la substituabilité entre le capital et le travail. En plus, la complémentarité entre la production animale et le phosphore est prouvée. Ce coût d'opportunité est faible entre les deux outputs pourrait ne pas provenir du délai moratoire fixé sur la norme phosphore jusqu'en 2010 par le gouvernement québécois ?

Enfin la dualité existant entre la fonction de profit et la fonction distance hyperbolique provenant de l'évaluation de coût d'opportunité économique nous a permis d'évaluer le prix fictif lié à l'émission de phosphore. Ceci montre que pour réduire d'un kilogramme les émissions de phosphore dans les eaux de Chaudière-Appalaches, les producteurs devraient sacrifier 386,8397\$ en termes de produits animaux et végétaux.

Pour des prochaines études, il serait possible d'utiliser une autre forme fonctionnelle dans le but de comparer la distribution des scores des efficiences (Giannakas et al., 2001). Des analyses non-paramétrique des fonctions distance, AED pourrait nous permettre de comparer les résultats obtenus avec cette méthode et ceux de l'analyse stochastique paramétrique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). 2000.** Les meilleures pratiques de gestion agricoles. Disponible à l'adresse <http://www.agr.gc.ca/pfra/water/agribtm.pdf>. Site consulté le 11 janvier 2008.
- Aigner, D. J., C. A. K. Lovell and P.J. Schmidt. 1977.** "Formulation and Estimation of Stochastic Frontier Production Function Models". *Journal of Econometrics* 6: 21-37.
- Amara, N. et Romain, R. 2001.** "Mesure de l'efficacité technique : Revue de la littérature". Série de Recherche.00.07 Centre de Recherche en Économie Agroalimentaire CRÉA.
- Ambapour, S. 2004.** "Efficacité technique comparée des systèmes de santé en Afrique subsaharienne : une application de la méthode de DEA ". Document de travail. Bureau d'application des méthodes statistiques et informatiques.
- Ambec, S. et Barla, P. 2006.** "Can Environmental Regulations Be Good for Business? An Assessment of the Porter Hypothesis". *Energy Studies Review* Vol. 14 No.2: 42-62
- Atkinson, S. E. et J. H. Dorfman. 2005.** "Bayesian Measurement of Productivity and Efficiency in the Presence of Undesirable Outputs: crediting electric utilities for reducing air pollution". *Journal of Econometrics* 126: 445-468.
- Banker, R. D., A. Charnes and W. W. Cooper 1984.** "Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis." *Management Science*, 30, 1078-1092.
- BAPE. 2003.** Les préoccupations et les propositions de la population au regard de la production porcine, Consultation publique sur le développement durable de la production porcine au Québec, Rapport d'enquête et d'audience publique, Rapport 179. Disponible au : <http://www.bape.gouv.qc.ca> (consulté le 08 Juin 2009).
- Battese, G. E. 1992.** "Frontier Production Functions and Technical Efficiency: A Survey of Empirical Applications in Agricultural Economics". *Agricultural Economics* 7: 185-208.
- Borodak, D. 2007.** "Les outils d'analyse des performances productives utilisés en économie et gestion : la mesure de l'efficacité technique et ses déterminants". Cahier de recherche du Centre d'Études et de Recherches (C.E.R). Groupe ESC Clermont.
- Boutin, D. 2004.** Réconcilier le soutien à l'agriculture et la protection de l'environnement : Tendances et perspectives. Conférence présentée dans le cadre du 67^e Congrès de l'Ordre des agronomes du Québec « Vers une politique agricole visionnaire ».
- Bravo-Ureta, B.E. 1986.** "Technical Efficiency Measures for Dairy Farms Based on a Probabilistic Frontier Function Model". *Canadian Journal of Agricultural Economics* 34: 399-415.
- Chambers, R.G. 1988.** *Applied Production Analysis: A Dual Approach*. New York: Cambridge University Press.

- Charnes, A., W. W. Cooper and E. Rhodes. 1978.** “Measuring the Efficiency of Decision Making Units”. *European Journal of Operational Research* 2: 429-444.
- Chih-Ching, Y., Ching-Kai, H et Ming-Miin Y., 2008.** “Technical Efficiency and Impact of Environmental Regulations in Farrow-to-Finish Swine Production in Taiwan”. *Agricultural Economics* 39: 51-61.
- Coelli, T. S., Rao, D. S. P., O’Donnell, C. J. et Battese, G. E. 2005.** An Introduction to Efficiency and Productivity Analysis. Second Edition. Springer.
- Cuesta, R. A., Lovell, C. A. K. et Zofio, J., L. 2009.** “Environmental Efficiency Measurement with Translog Distance Functions: A Parametric Approach”. *Ecological Economics* 68: 2232-2242.
- Debailleul, G. 2004.** “Analyse comparative des réglementations environnementales concernant les productions animales et position relative du Québec”. Rapport rédigé pour le ministère de l’Environnement du Québec, faculté des Sciences de l’Agriculture et de l’alimentation. Université Laval.
- Färe, R., Grosskopf, S., Noh, D.-W. et Weber, W.L. 2005.** “Characteristics of a Polluting Technology: Theory and Practice”. *Journal of Econometrics* 126: 469–492.
- Farrell, M.J. 1957.** “The Measurement of Productive Efficiency.” *Journal of the Royal Statistical Society*, 120(3): 253-290.
- Galanapoulos, K., Aggelopoulos, S., Kamenidou, I. et Mattas, K. 2006.** “Assessing the Effects of Managerial and Production Practices on the Efficiency of Commercial Pig Farming”. *Agricultural Systems* 88: 125-141.
- Gangbazo, G., Roy, J. et Le Page, A. 2005.** Capacité de support des activités agricoles par les rivières : le cas du phosphore total, ministère du Développement durable, de l’Environnement et des Parcs, Direction des politiques en milieu terrestre, Environdoq n° ENV/2005/0096. Disponible à l’adresse : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/capacite-phosphore.pdf>(consulté le 4 juin 2010).
- Gangbazo, G. et Le Page, A. 2005.** Détermination d’objectifs relatifs à la réduction des charges d’azote, de phosphore et de matières en suspension dans les bassins versants prioritaires. Direction des politiques de l’eau, Bureau de la gestion par bassin versant, Ministère du Développement durable, de l’Environnement et des Parcs, Québec, EnvirondocENV/2005/0215. Disponible à l’adresse : <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/reduction.pdf> (consulté le 16 juin 2009).
- Gangbazo, G. 2004.** Gestion intégrée de l’eau par bassin versant : concepts et application. Direction des politiques de l’eau, Bureau de la gestion par bassin versant. Ministère de l’environnement, Québec, Environdoq, ENV/2004/0062. Disponible à l’adresse <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/concepts.pdf>. (Consulté le 16 Juin 2009).
- Gangbazo, G. et Babin, F. 2000.** “ Pollution de l’eau des rivières dans les bassins versants agricoles ”. *Vecteur Environnement*, Vol. 33, no 4, p. 47-57.

- Ghazalian, P. L., Larue, B. et West, G. E. 2010.** “Best Management Practices and the Production of Good and Bad Outputs” *Canadian Journal of Agricultural Economics* 58: 283-302.
- Giannakas, K., Tran, K. C. et Tzouvelekas, V. 2001.** “On the Choice Functional Form in Stochastic Frontier Modeling.” *Empirical Economics* 28: 75-100.
- Jondrow, J., C. A. Lovell, I. S. Materov and P Schmidt. 1982.** “On the Estimation of Technical Inefficiency in the Stochastic Frontier Production Function Model”. *Journal of Econometrics* 19: 233-238.
- Karagiannis, G., et Midmore, P., Tzouvelekas, V. 2004.** “Parametric Decomposition of Output Growth Using a Stochastic Input Distance Function”. *American Journal of Agricultural Economics* 86 (4): 1044-1057.
- Koopmans, T.C. 1951.** “An Analysis of Production as an Efficient Combination of Activities,” in TC Koopmans, ed, *Activity Analysis of Production and Allocation*, Cowles Commission for Research in Economics, Monograph No. 13, New York: Wiley.
- Korol, M. 2002.** Canadian Fertilizer Consumption, Shipments and Trade. Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). Direction générale des politiques Stratégique. Disponible à l'adresse : http://www.cfi.ca/files/publications/statistical_documents/cf01_02_e.pdf (consulté le 11 juin 2009).
- Kriechel, B. et Ziesemer, T. 2007.** “The Environmental Porter Hypothesis: Theory, Evidence and a Model of Timing of Adoption”. United Nations University. Working Papers Series: 024.
- Kumar, S. et Rao, D. N. 2003.** “Environmental Regulation and Production Efficiency: A Case Study of the Thermal-Power Sector in India”. *Journal of Energy and Development* 29(1): 81–94.
- Kumbhakar, S.C. et C.A. K Lovell. 2000.** *Stochastic Frontier Analysis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Lansink, A.O. et Reinhard, S. 2004.** “Investigating Technical Efficiency and Potential Technological Change in Dutch Pig Farming”. *Agricultural Systems* 79: 353-367.
- Lau, L.J. 1972.** “Profit Functions of Technologies with Multiple Inputs and Outputs”. *Review of Economics and Statistics* 54: 281-289.
- Lessard, G. et Vasile, C. 2007.** “Agriculture et agroalimentaire : Choisir l’avenir”. Mémoire présenté à la commission sur l’avenir de l’agriculture et agroalimentaire québécois. Conseil régional de l’environnement Chaudière-Appalaches (CRECA).
- Managi, S., Opaluch, J. J., Jin, D. et Grigalunas, T. A.: 2005.** “Environmental Regulations and Technological Change in the Offshore Oil and Gas Industry”. *Land Economics* 81(2): 303-319.
- Marklund, P.-O. 2003.** “Environmental Regulation and Firm Efficiency: Studying the Porter hypothesis Using a Directional Output Distance Function”. Mimeo

- Martel, S., Seydoux, S., et Michaud, A., Beaudin, I. 2006.** “Évaluation des effets combinés des principales pratiques de gestion bénéfiques (PBG)”. Revue de littérature et schéma décisionnel pour la mise en œuvre de PGB. Document rédigé dans le cadre de l’INENA (Initiative nationale d’élaboration de normes agroenvironnementales). Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA).
- Mbaga, M., Romain, R., Larue, B. et Lebel, L. 2003.** “Assessing Technical Efficiency of Quebec Dairy Farms”. *Canadian Journal of Agricultural Economics* 51: 121-137.
- Michaud, A., et Deslandes, J., Beaudin, I. 2006a.** Modélisation de l’hydrologie et des dynamiques de pollution diffuse dans le bassin- versant de la Rivière aux Brochets à l’aide du modèle SWAT. Rapport final remis à l’Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA).
- Michaud, A., I. Beaudin, J. Deslandes, F. Bonn et C. A. Madramootoo. 2006b.** Variabilité spatio-temporelle des flux de sédiments et de phosphore dans le bassin versant de la rivière aux Brochets, au sud du Québec. Partie II : Évaluation de l’effet de scénarios agroenvironnementaux alternatifs à l’aide de SWAT. *Agrosolutions* 17(1): 21-32.
- Mosheim, R., et Lovell, C.A.K. 2009.** “Scale Economies and Inefficiency of U.S. Dairy Farms”. *American Journal of Agricultural Economics* 91(3): 777-794.
- Murty, M. N., Kumar, S. et Paul, M. 2006.** “Environmental Regulation, Productive Efficiency and Cost Pollution Abatement: a Case Study of the Sugar Industry in India”. *Journal of Environmental Management* 79: 1-9.
- Murty, M. N. et Kumar, S. 2003.** “Win-win Opportunity and Environmental Regulation: Testing of Porter Hypothesis for Indian Manufacturing Industries”. *Journal of Environmental Management* 67: 139-144.
- Nolet, J., Sauvé, C., Thériault, V., 2005.** Élaboration d’une méthode visant à identifier les coûts subis par les producteurs agricoles dans le but d’amenuiser l’impact de la production agricole sur l’environnement –Centre d’études sur les coûts de production en agriculture (CECPA). Rapport final Août 2005. Eco Ressources Consultants.
- Palmer, K., Oates, W.E., Portney, P.R., 1995.** ”Tightening Environmental Standards: The Benefit-Cost or no Cost Paradigm”. *Journal of Economic Perspective* 9: 119-132.
- Paul, C.J.M., Nehring, R., 2005.** “Product Diversification, Production Systems, and Economic Performance in U.S. Agricultural Production”. *Journal of Econometrics* 126: 525-548.
- Porter, M., Van der Linde, C., 1995.** Green and Competitive: Ending the stalemate. *Harvard Business Review* 73: 120-137.
- Reinhard, S., Lowell, C. A. K. et Thijssen, G. 1999.** “Econometric Estimation of Technical and Environmental efficiency: An Application to Dutch Dairy Farms”. *American Journal of Agricultural Economics* 81(1): 44-60.
- Reinhard, S. et Thijssen, G. 2000.** “Nitrogen Efficiency of Dutch Dairy Farms: a Shadow Cost System Approach”. *European Review of Agricultural Economics* 27(2) : 167-186.

- Romain, R. et Lambert, R. 1995.** “ Efficacité technique et coûts de production dans les secteurs laitiers du Québec et de l’Ontario”. *Canadian Journal of Agricultural Economics* 43: 37-55.
- Shephard, R.W. 1953.** *Cost and Production Functions*. Princeton: Princeton University Press.
- Tamini, L. D. 2008.** Synthèse des approches méthodologiques utilisées pour l’évaluation économique des meilleures pratiques à l’échelle des exploitations agricoles. IRDA. Rapport final Présenté au Ministère de l’Agriculture, des Pêcheries et de l’Alimentation du Québec. Mars 2008.
- Tamini, L.D., Larue, B. et West, G.E. 2010.** “Technical and Environmental Efficiencies and Best Management Practices in Agriculture”. À venir dans *Applied Economics*.
- Timmer, C. P. 1971.** “Using a Probabilistic Frontier Function to Measure Technical Efficiency”. *Journal of Political of Economics* 79: 776-794.
- Van den Broek, J., Forsund, F.R., Hjalmarsson, L. et Meeusen, W. 1980.** “On the Estimation of Deterministic and Stochastic Frontier Production Functions. A Comparison”. *Journal of Econometrics* 13: 117-138.
- Vlist, A.J. van der; Withagen, C. et Folmer, H. 2007.** “Technical Efficiency under Alternative Environmental Regulatory regimes: The Case of Dutch Horticulture”. *Ecological Economics* 63: 165-173.
- World Business Council for Sustainable Development. 1996.** “Eco-Efficiency and Clear Production”. Charting the Course to Sustainability. UNEP. Environment Programme.
- Yélou, C., Larue, B. et Tran, K. C., 2010.** "Threshold Effects in Panel Data Stochastic Frontier Models of Dairy Production in Canada". *Economic Modelling* 27: 641-647.

Annexes

Tableau A1 : Description de certains scénarios* et de leurs résultats sur les émissions de flux de sédiments et de phosphore.

PGB	Scénario agroenvironnemental de base (8) ²⁹	Scénario avec conversion aux pratiques agricoles de conservation (14)	Scénario avec substitution de cultures (21)
Culture de couverture à la dérobée			C 10 %
Cultures sur résidus et cultures de couverture associées		A 50 %	A 45 %
Incorporation immédiate des fumiers	TOUT	TOUT	TOUT
Culture pérenne (prairie)	PI	PI	PI
Bandes riveraines	TOUT	TOUT	TOUT
Fossés – avaloirs	TOUT	TOUT	C 10 %
RÉSULTATS			
Ruissellement			
Mm (% de réduction)	182 (0 %)	176 (3 %)	175 (4 %)
Sédiments			
Kt (% de réduction)	22,5 (26 %)	17,3 (43 %)	15,0 (51 %)
P total			
T (% de réduction)	36,3 (21 %)	30,5 (34 %)	27,2 (41 %)
P soluble			
T (% de réduction)	11,3 (4 %)	10,3 (12 %)	10,3 (12 %)

* Tiré de Michaud *et al.* (2006).

C = application ciblée du PAAC sur un % de cultures annuelles; A = application aléatoire du PAAC sur un % de cultures annuelles; PI = plaines inondables; TOUT = PAAC appliquée sur la totalité de la superficie agricole.

²⁹ Le chiffre indiqué entre les parenthèses est le numéro du scénario dans les simulations de Michaud et al. (2006).

Tableau A2 : Priorité relative à chacun des enjeux environnementaux

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

↑ Augmentation ou Amélioration. ↓ Diminution

Source : Martel et al., 2006 p.4

Tableau A3 : Les principales PGB par catégories

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

Source : Martel et al., 2006 p.5

Tableau A4 : Effets d'interaction potentiels des catégories de PGB vis-à-vis de la qualité de l'eau

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

Source : Martel et al., 2006 p.8