

A078/W9.1450

HEC MONTRÉAL

**L'impact économique des changements  
climatiques sur l'agriculture canadienne**

**Laurent Da Silva**

Sciences de la gestion

(Option Économie Appliquée)

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade  
de maître ès sciences (M.Sc.)*

Avril 2009

©Laurent Da Silva, 2009

**DÉCLARATION DE L'ÉTUDIANTE, DE L'ÉTUDIANT  
ÉTHIQUE EN RECHERCHE AUPRÈS DES ÊTRES HUMAINS**

**Recherche sans collecte directe d'informations**

Cette recherche n'impliquait pas une collecte directe d'informations auprès de personnes (exemples : entrevues, questionnaires, appels téléphoniques, groupes de discussion, tests, observations participantes, communications écrites ou électroniques, etc.)

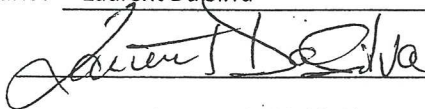
Cette recherche n'impliquait pas une consultation de documents, de dossiers ou de banques de données existants qui ne font pas partie du domaine public et qui contiennent des informations sur des personnes.

Titre de la  
recherche :

L'impact économique des changements climatiques sur l'agriculture  
canadienne

Nom de l'étudiant : Laurent Da Silva

Signature :



Date :

2009-02-13

## Sommaire

Bien que les conséquences des changements climatiques sur les activités humaines soient reconnues par les milieux politiques, économique et scientifique, leur compréhension reste encore aujourd'hui très limitée. Dans l'économie des changements climatiques, l'agriculture fait partie des secteurs pour lesquels une estimation précise est loin de faire consensus. Cette recherche s'intéresse à l'impact économique des changements climatiques sur l'agriculture canadienne. Elle tente d'abord de répondre à un manque de littérature dans le domaine, en particulier dans les études au niveau national canadien, et ensuite d'introduire une approche nouvelle venant corriger les failles de l'approche traditionnelle en coupe transversale (approche Ricardienne). La méthodologie utilisée est un modèle à effets fixes élaboré par Deschênes et Greenstone (2007) qui estime l'effet des variations annuelles aléatoires du climat sur les profits agricoles pour ensuite prévoir l'impact des variations de températures et de précipitations dues aux changements climatiques sur l'activité agricole. Cette méthode permet entre autres de corriger le problème de variables omises que présente l'approche Ricardienne tout en modélisant un agriculteur dit rationnel au sens économique du terme, ce que la méthode agronomique ne faisait que partiellement.

Les résultats de l'estimation du modèle sont frappants et contraires à ce que les recherches au niveau canadien ont obtenu à ce jour. En effet, nous prévoyons un impact fortement négatif pour l'agriculture canadienne dans l'horizon 2071-2100 (entre - 51,2 % et - 29,5 %). Les résultats régionaux montrent que l'Ontario sera la province la plus avantagée par les changements climatiques alors que les Prairies

seront les principaux perdants. L'augmentation trop importante des températures combinée à la faible augmentation des précipitations fera en sorte que la fréquence des sécheresses sera accrue, ce qui pourrait expliquer les prévisions pessimistes pour les Prairies canadiennes.

Somme toute, bien que les résultats de cette recherche représentent la borne inférieure de l'impact des changements climatiques sur l'agriculture canadienne, ils sonnent tout de même un cri d'alarme aux autorités gouvernementales afin de préparer le secteur agricole canadien à affronter un des défis les plus importants qu'il ait connu depuis fort longtemps.

## Remerciements

Ce mémoire est né de ma curiosité pour les questions touchant la planète Terre et d'un désir de comprendre l'influence de l'homme sur son environnement. Toutefois, il s'est vraiment concrétisé par la collaboration et l'aide de quelques êtres chers sans qui cette recherche n'aurait sûrement jamais abouti.

D'abord, mes parents pour leur support inconditionnel, ma soeur Béatrice pour son aide plus qu'appréciée et M. Bock pour sa disponibilité incomparable. Ensuite, mon directeur, Jean Boivin, qui a su me remettre sur le droit chemin lorsque je ne voyais plus clairement mon trajet à parcourir. Je me dois également de le remercier pour son financement qui m'a permis de me concentrer exclusivement sur mon projet de recherche. Je voulais aussi porter une attention particulière aux organismes gouvernementaux canadiens, particulièrement le SCF, pour leur support et l'accessibilité aux données et le CRSH pour le financement de recherche.

Également, je ne peux passer sous le silence la contribution involontaire, mais si précieuse de mes collègues du HEC avec qui j'ai si souvent discuté et qui m'ont fait réaliser certaines choses sans même qu'ils ne s'en rendent compte. Un merci spécial à Caro et son téléphone.

Finalement, je remercie ma chère Mémé, ma muse, mon amour, qui m'a écouté avec tant d'attention et de patience lorsque l'angoisse du mémoire m'envahissait.

# Table des matières

<b>Sommaire</b>	<b>i</b>
<b>Remerciements</b>	<b>iii</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Mise en contexte . . . . .	1
1.2 Émergence du phénomène de changements climatiques . . . . .	2
1.3 Impacts des changements climatiques sur les activités humaines . . . . .	5
1.4 Impacts des changements climatiques sur l'agriculture . . . . .	5
<b>2 Revue de la littérature</b>	<b>9</b>
2.1 Interaction et interdépendance des impacts . . . . .	9
2.2 Hétérogénéité de l'impact . . . . .	10
2.3 Les modèles d'estimation . . . . .	11
2.3.1 L'approche fonction de production . . . . .	11
2.3.2 L'adaptation agricole comme outil de mitigation . . . . .	12
2.3.3 L'approche Ricardienne ou hédonique . . . . .	14
2.3.4 L'approche Deschênes-Greenstone . . . . .	16
2.4 Modélisation idéale . . . . .	17
2.5 Impacts prévus des changements climatiques pour le Canada . . . . .	19
2.5.1 Impacts sur les variables agroclimatiques canadiennes . . . . .	19
2.5.2 Impact sur les rendements agricoles canadiens . . . . .	20

2.5.3	Études canadiennes antérieures . . . . .	21
<b>3</b>	<b>Méthodologie</b>	<b>24</b>
3.1	Différences avec l'approche Ricardienne . . . . .	25
3.1.1	Modèle à effets fixes . . . . .	25
3.1.2	Variable dépendante et calcul de la valeur des terres agricoles	26
3.1.3	Adaptation à long terme vs court terme . . . . .	27
3.2	Équilibre partiel . . . . .	29
<b>4</b>	<b>Cadre empirique</b>	<b>34</b>
4.1	Modèle économétrique . . . . .	34
4.1.1	Le rôle de l'irrigation . . . . .	35
4.2	Méthode d'estimation . . . . .	36
4.3	Description des données . . . . .	37
4.3.1	Données agricoles . . . . .	37
4.3.2	Données climatiques . . . . .	40
4.3.3	Autres variables de contrôle . . . . .	47
4.3.4	Manipulations géospatiales . . . . .	48
<b>5</b>	<b>Résultats et discussion</b>	<b>49</b>
5.1	Estimation Nationale . . . . .	52
5.2	Estimation Régionale . . . . .	57
5.3	Limites de l'étude . . . . .	60
5.3.1	Fertilisation au CO <sub>2</sub> . . . . .	60
5.3.2	Manque de variabilité dans les données . . . . .	61
<b>6</b>	<b>Conclusions</b>	<b>63</b>
<b>A</b>	<b>Liste des variables climatiques utilisées</b>	<b>74</b>

# Liste des tableaux

2.1	Divers estimés de l'impact économique sur l'agriculture canadienne . . . . .	22
4.1	Nombre de divisions de recensement par province . . . . .	39
4.2	Profil agricole des divisions de recensement . . . . .	40
4.3	Niveaux actuels et futurs des variables bioclimatiques . . . . .	45
5.1	Estimation de base (modèle à effets fixes) . . . . .	49
5.2	Estimations de l'impact des changements climatiques sur l'agriculture . . . . .	53
5.3	Estimation régionale préféré de l'impact (modèle à effets fixes) . . . . .	58
5.4	Variation du climat observé pour les années 1990-1995-2000-2005 . . . . .	61

## Table des figures

1.1	Impacts potentiels des changements climatiques sur les cultures . . .	7
3.1	Relation entre le profit et la température pour différentes activités . .	28
3.2	Effet d'un choc d'offre sur le prix d'un bien agricole . . . . .	31
5.1	Carte régionale (centroids) - Spécification 1 (CGCM) . . . . .	55
5.2	Carte régionale (moyenne) - Spécification 1 (CGCM) . . . . .	55
5.3	Carte régionale (centroids) - Spécification 5 (CGCM) . . . . .	56
5.4	Carte régionale (moyenne) - Spécification 5 (CGCM) . . . . .	56

## Listes des Abréviations

DJC :	Degrés-jours de croissance
DR :	Division de recensement
GES :	Gaz à effet de serre
GIEC :	Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
MCG :	Modèle de circulation générale
SC :	Saison de culture
SCF :	Service Canadien des Forêts

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Mise en contexte

Le secteur agricole canadien, qui produit près de 3.5 % des exportations mondiales totales de produits agricoles et agroalimentaires (2007), occupe une place importante sur l'échiquier alimentaire mondial. En fait, l'agriculture canadienne combinée à celle des États-Unis, qui partage des conditions agricoles similaires, s'établit comme le garde-manger de la planète étant le plus grand et le plus efficace producteur de nourritures et de fibres (Easterling, 1996).

Malgré son importance économique, l'agriculture canadienne est grandement limitée par un climat nordique et des caractéristiques de sols qui font en sorte que seule une petite partie du territoire canadien (environ 7 %) est cultivable et cultivée (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2000). Ceci étant dit, toute altération éventuelle du climat pourrait venir transformer la capacité des terres à supporter différents types de végétation et donc modifier nécessairement les possibilités de production des agriculteurs canadiens à long terme. De plus, le climat est également un important déterminant de la variation de la production agricole annuelle. Ainsi, dans l'optique des changements climatiques à venir, des conséquences directes sur certains intrants des cultures (températures, précipitations et gaz carbonique) ainsi qu'une modifica-

tion des spécificités des sols arables pourraient redéfinir drastiquement l'allure de la carte agricole canadienne.

Considérant le rôle important que joue l'agriculture canadienne dans le système alimentaire mondial et sa sensibilité potentielle au climat, cette étude cherche donc à comprendre comment l'industrie agricole canadienne va subir, réagir et s'adapter à la nouvelle réalité environnementale qu'imposent les changements climatiques. Des recherches comme celle-ci servent notamment d'outils essentiels dans l'analyse de politiques de ralentissements d'émissions de gaz à effets de serre ou de stratégies d'adaptation dans un climat changeant.

## 1.2 Émergence du phénomène de changements climatiques

C'est depuis la parution du rapport Meadows (1972)<sup>1</sup> commandé par le Club de Rome qu'une conscientisation de l'interdépendance entre l'Homme et son environnement est venue mettre à l'avant-plan les conséquences environnementales de notre société industrielle et la pérennité de notre système économique actuel à long terme. Dès lors, une littérature scientifique grandissante s'est penchée, dans un premier temps, sur l'implication des activités anthropiques sur l'environnement et ensuite, de façon complémentaire, sur l'impact de ce nouvel environnement sur les activités humaines. La parution du 2<sup>ième</sup> rapport du Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat<sup>2</sup> (GIEC) en 1995 fut le premier constat scientifique à identifier clairement

---

1. Ce rapport nommé *The Limit of Growth (Halte à la Croissance)* prédisait que notre société économique s'écroulerait dans la 1<sup>ère</sup> moitié du 21<sup>ème</sup> siècle si aucun amendement ne venait corriger les causes de notre perte future soit la croissance démographique, l'expansion énergétique et la mutation technologique (Meadows *et al.*, 1972).

2. Ou Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) en anglais. Le GIEC a été créé en 1988 par deux organismes de l'ONU soit l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). « Le GIEC a pour mission d'évaluer, sans parti



croître au courant des prochaines décennies (GIEC, 2007). Cette augmentation modifiera inévitablement le climat et devrait mener à moyen ou à long terme à un changement majeur dans l'équilibre climatique mondial (GIEC, 2001 ; 2007). Ainsi, d'après les dernières estimations des Modèles de Circulation Générale (MCG), on prévoit que la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère terrestre, qui s'est accrue depuis l'ère préindustrielle (avant 1750) de 280 parties par million (ppm) à 379 ppm en 2005 (GIEC, 2007 ; Stern, 2007), devrait doubler, à 550 ppm, entre 2030 et 2060 (GIEC, 2007). À ce niveau, la température moyenne globale de la Terre se réchaufferait entre 2 et 5°C, la fréquence des événements extrêmes augmenterait, les patterns de précipitations seraient perturbés et le niveau de la mer augmenterait de façon significative (Stern, 2007)<sup>5</sup>.

Alors qu'il y a quelques années les climatologues n'avaient toujours pas détecté un signal significatif de réchauffement climatique, la réalité actuelle est tout autre et la Terre se réchauffe déjà. En effet, nous assistons à une augmentation significative des températures moyennes globales par rapport au niveau du 19<sup>ième</sup> siècle (GIEC, 2007). Les plus récentes études indiquent que la Terre s'est réchauffée de 0.7°C comparativement à la moyenne 1861-1900 (Brohan *et al.*, 2006) à un rythme d'environ 0.2°C par décennie au courant des trois dernières décennies (Hansen *et al.*, 2006). En fait, la planète présenterait à l'heure actuelle la température globale moyenne la plus chaude au courant de la dernière ère interglaciaire qui a commencé il y a de cela 12 000 ans (Hansen *et al.*, 2006).

D'un point de vue économique, devant l'imminence d'un chamboulement climatique majeur, il devient pressant de comprendre en quoi cette altération du climat va affecter les systèmes de production et ultimement le bien-être humain dans le futur.

---

5. Voir Church et White (2006) pour plus de détails sur la hausse du niveau de la mer.

### 1.3 Impacts des changements climatiques sur les activités humaines

Les domaines de la santé humaine, de l'industrie forestière, de l'agriculture, de la biodiversité, de l'eau, du tourisme, des écosystèmes, des paysages et de la consommation d'énergie sont ceux qui ont rapidement intéressé les économistes en changements climatiques<sup>6</sup>. Évidemment, ce qui suscitait l'intérêt pour ces secteurs particuliers était leur grande sensibilité face au climat changeant. C'est pourquoi ils représentent, à l'heure actuelle, les domaines où l'impact des changements climatiques est le plus étudié et où la compréhension est la plus avancée. Cependant, malgré l'avancement des méthodologies et des techniques, ces études présentent encore aujourd'hui un degré d'incertitude élevé en raison de l'incorporation d'hypothèses fortes liées notamment à l'aspect temporel éloigné des changements climatiques (Tol *et al.*, 2000). Et donc, bien que ces études ne puissent nous donner une image parfaite de ce que sera le système économique mondial dans 100 ans, elles nous aident à réfléchir davantage sur le défi à venir et nous permet de nous pencher sur les questions de société à formuler par rapport à notre mode de vie actuelle et aux conséquences de celui-ci sur les générations à venir.

### 1.4 Impacts des changements climatiques sur l'agriculture

Dès lors que la communauté scientifique a pris conscience de l'imminence des changements climatiques à venir, le secteur agricole s'est vu attribuer une attention particulière. En fait, le secteur agricole occupe une place cruciale dans la survie quotidienne de millions de gens et sa grande sensibilité aux fluctuations du climat a engendré énormément d'inquiétudes quant à la capacité de l'agriculture mondiale à

---

6. Voir Tol (2002) pour des calculs détaillés des impacts dans ces différents secteurs.

satisfaire les besoins en nourriture de toute la planète suite aux changements climatiques. C'est pourquoi la problématique de l'agriculture est celle qui a retenu le plus d'attention jusqu'à aujourd'hui (voir notamment Adams, 1989 ; Adams *et al.*, 1995 ; Adams *et al.*, 1999 ; Adams *et al.*, 1990 ; Deschênes et Greenstone, 2007).

La sensibilité de l'agriculture face au climat prend naissance dans un ensemble de facteurs physiologiques, climatiques, géologiques et biologiques interdépendants qui s'entremêlent au courant d'une saison de culture pour aboutir, à la fin de celle-ci, en un rendement déterminé pour les différents plants et les différentes cultures. Ainsi, des facteurs fondamentaux comme la longueur de la saison de culture (saison sans gel), le timing du gel, l'accumulation de chaleur (température), le niveau de précipitations, l'évapotranspiration, les heures d'ensoleillement, l'humidité disponible, ainsi que la concentration de dioxyde de carbone, agissent directement sur le rendement d'une culture. Viennent s'ajouter à cela des facteurs indirects comme une augmentation potentielle des infestations d'insectes et des pathogènes, une modification des caractéristiques de sols et/ou un changement dans les besoins d'eau pour l'irrigation. Ces facteurs qui sont pour certains positifs et pour d'autres négatifs pour l'agriculture s'entrechoquent, annulant les effets de l'un et de l'autre et rendant l'estimation de l'impact net très difficile à prédire (voir figure 1.1<sup>7</sup>) (Brklacich *et al.*, 1998 ; Gouvernement du Canada, 2004). Et donc, même si règle générale la littérature économique décrit l'agriculture des pays nordiques comme celle qui bénéficiera le plus du réchauffement climatique, il y a encore énormément d'incertitude entourant l'estimation de l'impact réel, notamment au Canada. Cette étude cherche donc à capter l'effet des facteurs agronomiques les plus influents pour ensuite pouvoir estimer l'impact économique des changements climatiques sur l'agriculture canadienne.

La méthodologie adoptée dans ce papier, inspirée de Deschênes et Greenstone (2007), viendra corriger les failles des approches traditionnelles en adoptant une for-

---

7. Inspiré de : Climate change impacts and adaptation : A Canadian perspective, Gouvernement du Canada. p. 56. 2004.

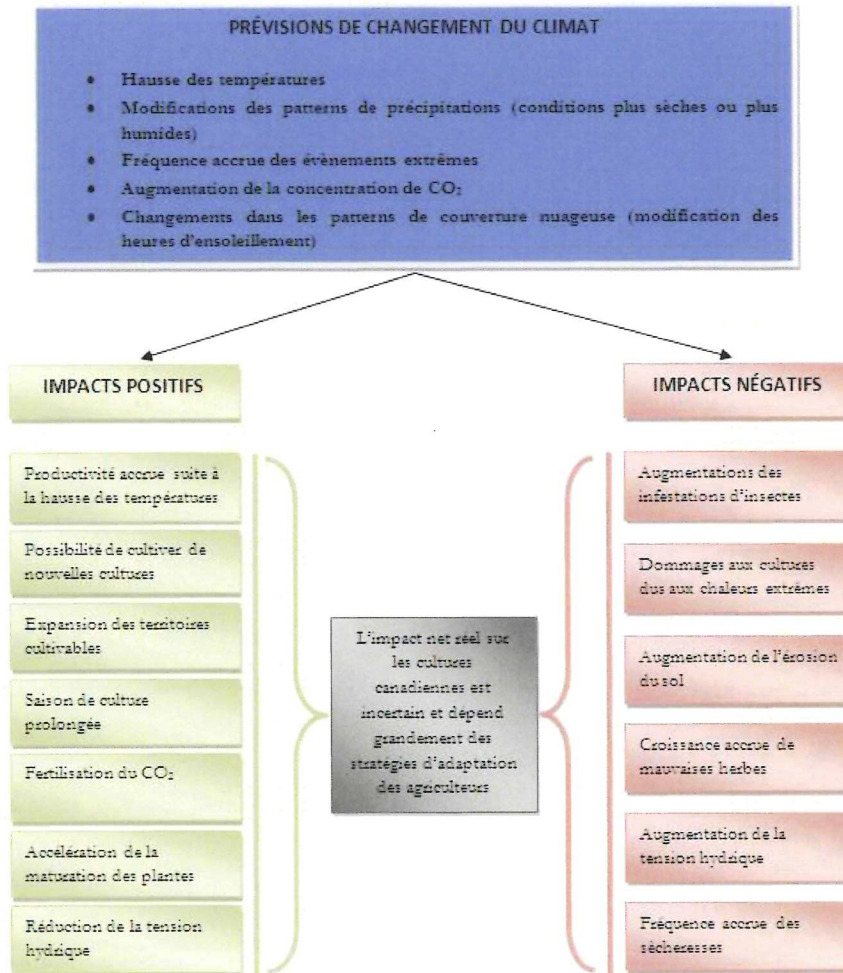


FIGURE 1.1 – Impacts potentiels des changements climatiques sur les cultures

mulation économétrique en données de panel et en s'inspirant de grands principes agronomiques reconnus. Suite à des recommandations dans la littérature, nous introduirons également des variables captant l'effet de la variabilité du climat sur la production agricole qui possède une influence tout aussi importante que l'effet d'une hausse des températures moyennes (Belliveau *et al.*, 2006 ; Mendelsohn *et al.*, 2007). Cette étude tentera du même coup de combler un vide dans la littérature canadienne qui se limite souvent à des analyses régionales (au niveau provincial) et qui ne permet pas d'établir un estimé national ni même de comparer l'impact entre les différentes

provinces puisque la plupart des études utilisent différentes méthodologies qui ne sont pas compatibles (Brklacich *et al.*, 1998).

Le reste de cette recherche se dessine comme suit. Le chapitre 2 dresse un portrait de la littérature sur l'impact des changements climatiques sur l'agriculture. D'abord en étudiant les divers modèles existants et ensuite en examinant la littérature canadienne sur le sujet. Le chapitre 3 dresse la méthodologie utilisée pour estimer l'impact sur l'agriculture canadienne. Le chapitre 4 détaille le modèle économétrique ainsi que les données utilisées. Le chapitre 5 présente, discute et interprète les résultats obtenus. Le chapitre 6 conclut et émet des recommandations concernant d'éventuelles recherches dans le domaine.

## Chapitre 2

### Revue de la littérature

#### 2.1 Interaction et interdépendance des impacts

Une note importante sur l'incorporation de l'interaction et de l'interdépendance entre les différents secteurs et pays touchés s'impose avant d'aller plus loin. S'il est simple de comprendre que les changements climatiques affectent simultanément une variété de secteurs interreliés aux quatre coins de la planète, il est beaucoup plus difficile de le considérer dans l'analyse. Quoiqu'il soit toujours possible de contrôler pour ce phénomène en utilisant un modèle d'équilibre général qui incorpore l'ensemble des secteurs et des pays touchés, ces modèles intégrés comportent énormément d'hypothèses et ont un pouvoir explicatif limité. C'est pourquoi la grande majorité des études se concentre sur un secteur d'activité dans une région géographique particulière en considérant fixe les autres secteurs et les autres pays (*ceteris paribus*). Comme cette avenue reflète la littérature existante, c'est également la méthodologie utilisée dans cette recherche.

## 2.2 Hétérogénéité de l'impact

La littérature cherchant à quantifier les impacts des changements climatiques sur le secteur de l'agriculture a vraiment pris son envol au début des années 1980. Depuis, diverses avenues ont été explorées afin de modéliser de la façon la plus réaliste possible l'impact des changements climatiques sur ce secteur. C'est d'abord une différenciation géographique qui est venue catégoriser les premières approches utilisées. Ainsi, certains auteurs ont préféré se pencher sur le problème au niveau mondial (voir par exemple Bosello et Zhang, 2005 ; Darwin, 1999 ; Darwin *et al.*, 1995 ; Fischer *et al.*, 1994 ; Reilly et Hohmann, 1993 ; Rosenzweig et Parry, 1994). Généralement, ces études ont montré que, malgré le fait que l'agriculture serait affectée par les changements climatiques, cela ne mettrait pas en péril l'alimentation mondiale (Adams *et al.*, 1995 ; Darwin *et al.*, 1995 ; Rosenzweig et Parry, 1994).

D'autres, qui se sont plutôt concentrés sur une région ou un pays spécifique, ont conclu, dans la majorité des cas, que l'agriculture des pays occidentaux, particulièrement celle des États-Unis et du Canada, ne serait que très légèrement affectée par les changements climatiques (voir par exemple Deschênes et Greenstone, 2007 ; Mendelsohn, Nordhaus et Shaw, 1994 ; Reinsborough, 2003). Ces résultats peuvent être attribués à une résilience structurelle de l'agriculture des pays industrialisés (Adams *et al.*, 1990 ; Lewandrowski et Schimmelpfennig, 1999)<sup>1</sup>. Cependant, ces mêmes études ont également présenté une importante hétérogénéité entre les régions d'un même pays. En fait, l'impact réel dans une région spécifique varie selon plusieurs facteurs, dont les conditions climatiques actuelles et futures, mais également en fonction des conditions du sol et de l'utilisation des terres (types de cultures) (Smit *et al.*, 1989). D'un point de vue économique, cette identification des perdants et des gagnants revêt une importance particulière dans la planification de stratégies ou de politiques visant

---

1. Cette résilience est une caractéristique de l'agriculture des pays industrialisés qui est beaucoup plus apte à absorber un choc externe. Ainsi, il est généralement reconnu que les pays pauvres sont beaucoup plus vulnérables aux changements climatiques que les pays riches (Tol 2000).

à réduire les effets négatifs des changements climatiques et permet d'orienter les efforts gouvernementaux d'adaptation vers les régions les plus vulnérables (Adams *et al.*, 1988). Pour un pays aussi grand que le Canada, ces différences régionales sont cruciales et c'est pourquoi les études au niveau national procurent une information fondamentale pour les autorités gouvernementales.

## 2.3 Les modèles d'estimation

On distingue fondamentalement deux grandes approches dans l'évaluation de l'impact des changements climatiques sur l'agriculture. Elles se différencient principalement par leur méthodologie qui s'oriente d'un côté vers l'agronomie et de l'autre vers l'économie.

### 2.3.1 L'approche fonction de production

Le modèle agronomique, communément appelé l'approche fonction de production<sup>2</sup>, est une approche expérimentale qui tente de mesurer les effets directs d'une modification du climat sur les différentes cultures et sur leurs besoins en intrants (luminosité, pesticides, herbicides, engrais, etc.) à l'aide de modèles de simulation biophysique des plantes du type CERES ou SOYGRO<sup>3</sup>. Le clair avantage de ces expérimentations est qu'elles permettent de mesurer très précisément le mécanisme de réponse des cultures face au climat en observant individuellement leur comportement et en contrôlant pour toutes les autres variables susceptibles d'influencer la croissance des plantes. De plus, ces expériences permettent de reproduire des conditions qui ne se sont pas encore produites dans la nature telle qu'une fertilisation au CO<sub>2</sub>. Par contre, ces expérimentations ne sont pas en mesure de prendre en considération les effets

---

2. Voir par exemple Adams *et al.* (1988, 1989, 1990, 1999), et Rosensweig et Parry (1994).

3. Pour avoir une description complète de ces modèles voir Ritchie et Otter (1985) et Jones et Kiniry (1986) pour CERES et Jones *et al.* (1988) pour SOYGRO.

de modifications indirectes de l'environnement dans lequel les cultures poussent. Par exemple, l'augmentation d'insectes dû à un temps plus chaud et à un hiver plus doux, la détérioration de la qualité des terres ou bien l'augmentation de la variabilité du climat. Cependant, de ces résultats, on calcule tout de même les dommages causés par les changements climatiques en utilisant les changements prédits dans les rendements des différentes cultures et en les combinant avec des modèles économiques de choix de cultures au niveau des fermes en utilisant des outils de programmation linéaire ou non linéaire<sup>4</sup>. Finalement, ces manipulations nous offrent un portrait de ce que serait la situation agricole résultante, en projetant l'état de l'économie dans 20, 50 ou 100 ans ou en faisant l'hypothèse du statu quo économique.

### 2.3.2 L'adaptation agricole comme outil de mitigation

L'utilisation de ces modèles économiques qui simulent les dynamiques de marchés permet de saisir une certaine forme d'adaptation, particulièrement au niveau du choix des cultures, mais n'est pas en mesure de capter la gamme complète des stratégies d'adaptation possibles des agriculteurs. Conséquemment, bien que l'approche fonction de production dresse une image intéressante des conséquences des changements climatiques sur l'agriculture, elle omet un aspect important de la problématique en ne faisant intervenir qu'un « dumb-farmer » qui est passif face aux changements dans le climat.

Même s'il n'est pas complètement faux de supposer cette passivité de l'agriculteur puisque celui-ci répondrait davantage aux incitatifs financiers que directement aux variations du climat (Smit, McNabb et Smithers, 1996), lorsque le climat menacera ses revenus, l'agriculteur réagira. Smit, McNabb et Smithers (1996) en sondant un groupe représentatif d'agriculteurs en Ontario sur une période de six ans s'aperçoivent que la plupart des agriculteurs sont conscients de l'influence du climat sur leurs activités,

---

4. Citons le modèle économique le plus utilisé à cette fin soit le Agricultural Sector Model (ASM) (Pour plus de détails voir McCarl *et al.* (1993) et Adams *et al.* (1999)).

mais que bien peu d'entre eux entreprennent des stratégies d'adaptation en réponse au climat (20 %) comparativement aux stimulés économiques (environ 60 %). Ces résultats sont en ligne avec d'autres études qui, utilisant des sondages ou des groupes de discussion, en sont venues à la conclusion que la réaction des agriculteurs face au stress imposé par le climat sur les activités agricoles ne fait partie que d'un plus grand processus de décisions découlant d'une stratégie globale de gestion du risque (André et Bryant, 2001 ; Skinner *et al.*, 2001).

En faisant l'hypothèse que les changements climatiques vont apporter avec eux des modifications majeures dans l'équilibre climatique qui d'une manière ou d'une autre vont affecter les revenus agricoles, il est tout à fait logique de penser que l'agriculteur se dotera d'outils et de stratégies d'adaptation qui vont lui permettre de réduire le risque d'impacts négatifs du climat. Ainsi, rationnellement, l'agriculteur qui tente de maximiser ses profits d'exploitation face à un changement du climat évalue la gamme complète des stratégies d'adaptation qui s'offre à lui et choisit la ou les options qui maximisent son bien-être. Par exemple, il lui est possible de modifier l'utilisation de fertilisants et de pesticides, de diversifier ses cultures et son entreprise, de modifier la gestion de sa terre et de l'eau, de devancer le moment de plantation, d'adopter de nouvelles technologies, d'introduire l'irrigation dans ses champs, de changer de cultures ou carrément de changer la fonction de sa terre vers d'autres activités à valeur ajoutée.

L'approche fonction de production a malgré tout connu d'importantes améliorations au courant des années afin de répondre à sa principale lacune. Des modélisations théoriques de certaines stratégies d'adaptation possibles ont été intégrées aux modèles économiques et ont permis de les perfectionner en intégrant l'utilisation de l'irrigation ou l'utilisation de pesticides par exemple. Cependant, l'approche fonction de production de par sa conception expérimentale ne sera jamais en mesure de prendre en compte la gamme complète des ajustements potentiels et repose essentiellement sur des hypothèses entourant les comportements envisageables des agriculteurs face

aux changements climatiques au lieu d'observer leur comportement réel sur le terrain (Segerson et Dixon, 1999). Sachant que l'agriculture est un secteur reconnu pour sa grande capacité d'adaptation face aux modifications de facteurs influençant ses capacités de production, l'omission d'une modélisation de la gamme complète des stratégies d'adaptation possibles, tel que le fait l'approche fonction de production, biaise l'estimation en surestimant les dommages causés par les changements climatiques (Mendelsohn, Nordhaus et Shaw, 1994 ; 1996 ; 1999). Ainsi, idéalement l'estimation de l'impact des changements climatiques sur l'agriculture cherche donc également, au-delà de l'unique influence du climat sur le rendement agricole, à modéliser le comportement des agriculteurs dans le nouveau climat. Le producteur dit rationnel doit donc être proactif dans la gestion de sa terre, minimisant ses pertes en s'adaptant face aux impacts négatifs et maximisant ses profits en capitalisant sur les effets positifs des changements climatiques sur ses activités (Gouvernement du Canada, 2004).

### 2.3.3 L'approche Ricardienne ou hédonique

Mendelsohn, Nordhaus et Shaw (1994) ont fourni une réponse à la grande lacune de l'approche fonction de production en introduisant l'approche Ricardienne<sup>5</sup>. Essentiellement, cette approche tente de mesurer directement l'effet du climat sur la valeur des terres et le rendement agricole en utilisant une étude en coupe transversale. Cette méthode repose sur l'hypothèse d'efficacité des marchés et donc sur le fait que la valeur des terres agricoles reflète la valeur actualisée des revenus futurs issus de l'exploitation la plus productive de la terre. En s'intéressant au prix des terres agricoles dans différents environnements, cette approche étudie implicitement la gamme complète des stratégies d'adaptation possibles des agriculteurs. En fait, en étudiant

---

5. Cette approche fut nommée d'après le célèbre économiste David Ricardo en raison de sa théorie qui assume que la rente foncière refléterait la productivité nette des terres agricoles. Ainsi, la valeur des terres agricoles refléterait la valeur actualisée des productivités nettes futures (Mendelsohn et Dinar, 2003).

le comportement des agriculteurs dans leur climat respectif, l'on observe du même coup comment ils se sont adaptés face au climat qui les entoure. Par exemple, cette méthode analyse comment la production agricole et l'agriculteur de la chaude vallée de l'Okanagan (Colombie-Britannique) se comportent en comparaison à la production agricole et de l'agriculteur du Saguenay Lac St-Jean (Québec). Ces agriculteurs sont donc soumis aux mêmes contraintes de production (même fonction de production) mais sont soumis à des climats différents (intrants dans la fonction). En se fiant sur le comportement de l'agriculteur dans le climat plus chaud, on peut déduire comment l'agriculture de la région plus nordique va réagir suite aux changements climatiques qui rendent son environnement disons plus chaud et plus humide dans le futur. À première vue, cette approche semble attirante, car elle vient mettre à l'avant-scène un agriculteur rationnel tel que la théorie économique le conçoit. Cependant, l'approche Ricardienne comporte elle aussi ses défauts. Premièrement, elle doit être interprétée comme la borne supérieure des bénéfices potentiels des changements climatiques sur l'agriculture. D'abord, parce qu'elle sous-estime les contraintes liées aux stratégies d'adaptation en omettant de modéliser certaines variables telles que des caractéristiques de la composition des sols qui peuvent limiter la migration des cultures ou la disponibilité en eau d'irrigation dans certaines régions (Cline, 1996; Reinsborough, 2003). Ensuite, parce qu'elle étudie la réponse agricole dans les conditions climatiques actuelles qui ne sont pas nécessairement représentatives de la réalité climatologique dans le futur (Weber et Hauer, 2003). Finalement, parce qu'elle suppose que l'agriculteur réagit directement aux stimuli climatiques tandis que plusieurs études ont démontré que les agriculteurs sont lents à utiliser des stratégies d'adaptation en réponse à l'environnement climatique notamment en raison de l'inertie causée par les programmes gouvernementaux et les assurances agricoles (Smit et McLeman, 2006; Smit, McNabb et Smithers, 1996). En conséquence, alors que l'approche fonction de production a tendance à surestimer les dommages causés par les changements climatiques sur l'agriculture l'approche Ricardienne quant à elle a tendance à sous-évaluer

ceux-ci. C'est pourquoi bien souvent les deux approches présentent des résultats diamétralement opposés.

### 2.3.4 L'approche Deschênes-Greenstone

Une autre des déficiences majeures de l'approche Ricardienne concerne des problèmes liés à des erreurs de spécification. À la lumière de Deschênes et Greenstone (2007), l'approche Ricardienne, en omettant de contrôler pour des caractéristiques non observables, mais qui sont corrélées avec le climat (telles que le micro climat ou la qualité des sols), pourrait confondre l'impact du climat avec l'impact d'autres facteurs qui sont importants dans la détermination de la production agricole et dans la valeur des terres. Même si les signes et ampleurs des biais résultant des variables omises sont inconnus, cela pourrait expliquer la grande variabilité que présentent les résultats obtenus par Mendelsohn, Nordhaus et Shaw (1994 ; 1996 ; 1999) lorsqu'on étudie la robustesse de leurs estimations. En fait, en modifiant l'échantillon (l'année de recensement), les variables de contrôle ou la méthode de pondération choisie, l'approche Ricardienne présente des résultats qui varient de manière extrême passant d'un impact de -288.6 à +321.3 milliards de dollars pour l'agriculture américaine (Deschênes et Greenstone, 2007). Cette grande sensibilité de l'approche Ricardienne à des décisions mineures concernant les spécifications du modèle met en doute ses capacités à estimer adéquatement l'impact des changements climatiques sur l'agriculture (Deschênes et Greenstone, 2007).

Cette méthodologie cherchera donc à corriger les failles des deux approches, en modélisant d'une part l'agriculteur rationnel et d'autre part une réponse biophysique des plantes au climat plus réaliste que ce que l'approche Ricardienne a modélisé au Canada jusqu'à maintenant. D'abord, en adoptant une méthodologie en données de panel, cela nous permettra d'introduire des effets spécifiques de comtés et de temps qui viendront corriger le problème de variables omises de l'approche Ricardienne. Ensuite, en incorporant l'utilisation de variables climatiques issues de la littérature

agronomique telle que l'accumulation de chaleur (degré-jour de croissance) au lieu des mesures de moyennes, nous tenterons de mieux modéliser la réponse biophysique des différentes cultures face au climat. L'introduction de variables explicatives de variabilité du climat se démarque de ce que Deschênes et Greenstone (2007) ont fait, mais vient répondre à des recommandations de plus en plus insistantes dans la littérature économique (Mendelsohn *et al.*, 2007).

Au-delà des spécificités techniques du modèle, son intuition économique est quant à elle très simple : en supposant que les variations annuelles de températures et de précipitations sont aléatoires, le modèle cherche à estimer l'effet des années plus chaudes et plus humides sur le profit des agriculteurs. Ainsi, s'il nous est possible d'obtenir des estimations significatives de l'impact des variations de précipitations et de températures sur les profits générés tout en contrôlant pour les autres variables explicatives, il sera facile d'utiliser les scénarios de prévisions de changements climatiques les plus récents issus des recherches découlant du dernier rapport du GIEC (2007) pour ainsi calculer l'effet des changements climatiques sur l'agriculture canadienne.

## 2.4 Modélisation idéale

En s'intéressant à la modélisation idéale de l'impact des changements climatiques sur l'agriculture, nous sommes en mesure de voir que notre modèle, bien qu'il soit encore imparfait, tente de se rapprocher le plus possible de cette référence en construisant sur les connaissances des modèles employés jusqu'à ce jour. Il est cependant clair que notre approche présente certaines limites importantes concernant la modélisation de certains facteurs spécifiques du phénomène de changements climatiques sur l'agriculture. La liste suivante<sup>6</sup> présente les facteurs importants que comporte l'étude des changements climatiques et de l'agriculture :

---

6. Tiré de Bosello et Zhang (2005). *Assessing Climate Change Impacts : Agriculture*. Fondazione Eni Enrico Mattei, Working Papers : 2005.94. Traduction libre de l'auteur.

- considérer la modification des variables climatiques : variabilité et hausse de la température, augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub>, modification des patterns de précipitations,
- considérer les conséquences indirectes causées par les changements environnementaux : modification de la qualité des sols, disponibilité de l'eau, fréquence et intensité des évènements extrêmes,
- déterminer l'effet biophysique sur la croissance et la diffusion des cultures,
- considérer minimalement les principales stratégies d'adaptation au niveau des fermes : changement dans le timing, la localisation et le choix des différentes cultures,
- considérer l'impact sur/des principaux mécanismes d'ajustement économiques au niveau national et international : effet sur les prix, déplacement de la demande et de l'offre nationale et internationale,
- finalement, idéalement prendre en considération le feedback des nouvelles conditions sur le climat.

Cette modélisation « idéale » n'existe cependant pas à ce jour, c'est pourquoi encore aujourd'hui, les recherches ne s'entendent toujours pas sur le signe, mais surtout sur l'amplitude de l'impact des changements climatiques sur l'agriculture.

Ainsi, malgré une amélioration constante des modèles, certains aspects de l'impact des changements climatiques sur l'agriculture ne s'insèrent pas dans l'un ou l'autre des modèles existants à ce jour. Souvent, ce qui est la force de l'un des modèles est la faiblesse de l'autre et vice-versa. C'est pourquoi on distingue les modèles selon leur orientation et donc leur spécialisation. Le modèle agronomique capte bien la réponse biologique des plantes tandis que l'approche Ricardienne saisit l'importance de l'adaptation dans le modèle. Pour ce qui est de cette approche, elle trace un juste milieu entre les deux méthodes. Nous verrons plus loin que cela lui confère plusieurs avantages, mais également quelques inconvénients.

## 2.5 Impacts prévus des changements climatiques pour le Canada

Une multitude d'études d'impact des changements climatiques sur l'agriculture ont été entreprises au Canada souvent se prononçant sur les effets des changements climatiques sur les rendements de différentes cultures sans toutefois y apposer d'estimation économique. En fait, la littérature canadienne sur le sujet est généralement issue de recherches menées par des géographes plutôt que des économistes, c'est pourquoi les efforts se sont concentrés sur le rendement des cultures plutôt que sur une estimation monétaire de l'impact (voir par exemple Brklacich et Smit, 1992; Singh *et al.*, 1998). Par contre, même si ces études ne nous informent pas sur l'effet économique du problème et incorporent que partiellement les stratégies d'adaptation possibles, puisqu'elles se basent sur l'approche fonction de production, elles permettent tout au moins de saisir l'ampleur de la tâche qui attend les agriculteurs canadiens dans un climat changeant.

### 2.5.1 Impacts sur les variables agroclimatiques canadiennes

Naturellement, toutes les régions du Canada connaîtront un réchauffement de leurs températures moyennes, les latitudes plus au nord subissant une augmentation plus importante que les régions du sud du pays (Brklacich et al., 1998). Ainsi pour toutes les régions, cette augmentation de la température se traduira par un allongement de la saison de culture (saison sans gel), un déplacement du premier gel et une augmentation significative de l'accumulation de chaleur. Ce réchauffement du climat pourrait également engendrer une expansion des territoires cultivables dans des régions plus nordiques du pays<sup>7</sup>.

---

7. Une expansion vers le nord des terres cultivables est envisageable dans l'éventualité d'un réchauffement climatique majeur. Cependant, cette expansion potentielle se limitera très probablement à des latitudes au sud du 60°N étant donné que les régions plus au nord présentent des sols arables

### 2.5.2 Impact sur les rendements agricoles canadiens

Les Prairies (Manitoba, Alberta et Saskatchewan) connaîtront une amélioration des conditions agroclimatiques (hausse de la température et des précipitations) ce qui aura un effet bénéfique sur le rendement des cultures en allongeant la saison de culture. Celle-ci sera également plus chaude réduisant du même coup le temps de maturation des plantes et permettant la production de cultures à grande valeur ajoutée comme le maïs, le tournesol et le soya (Arthur et Van Kooten, 1992 ; Weber et Hauer, 2003). De plus, d'après McGinn et al. (1999), le rendement du Canola, du maïs et du blé albertins devrait augmenter entre 21 et 124 %.

Pour le Québec, Singh et Brassard (2008) en considérant l'effet de la fertilisation au CO<sub>2</sub>, prévoient que le rendement du soya devrait augmenter de façon significative, dans une moindre mesure pour la culture de pommes de terre et que le blé et le maïs présenteront aucun ou peu de changement dans leur rendement respectif. En Ontario, le nord de la province bénéficiera d'opportunités pour la culture de grains et de graines oléagineuses, mais le sud de la province sera soumis à des étés plus chauds et plus secs ce qui pourrait affecter négativement le rendement de certaines cultures (Smit et Brklacich, 1992 ; Smit et al., 1989). Les provinces de l'Atlantique en raison des limites géographiques de leur territoire et de l'augmentation trop importante des précipitations sont identifiées comme les provinces canadiennes les plus vulnérables (Brklacich et al., 1998).

L'ensemble de ces estimations doit cependant être mis en perspective sachant que la fréquence des événements extrêmes devrait augmenter avec l'arrivée des changements climatiques (Mehdi, 2006). Ainsi, des périodes de sécheresse plus fréquentes viendraient augmenter la tension d'humidité des plantes et ainsi atténuer les bénéfices prévus par la hausse de températures. La sécheresse qui a frappé le Canada pendant les étés 2001 et 2002 illustre bien cette fragilité de l'agriculture canadienne face aux événements extrêmes. Au courant de ces étés chauds et secs, les agriculteurs de qualité inférieure (Gouvernement du Canada, 2004).

canadiens et plus particulièrement ceux des prairies ont vu le rendement de leurs cultures chuter drastiquement. La production de blé et de canola a reculé de 43 % par rapport à 2000 tandis que l'impact total de la baisse de la production de grains s'est chiffré à près de 5 milliards de dollars (Gouvernement du Canada, 2004).

### 2.5.3 Études canadiennes antérieures

Bien qu'un grand nombre d'études ait tenté de mesurer l'impact des changements climatiques sur le rendement des cultures dans les différentes régions du Canada, peu d'études ont réussi à y incorporer adéquatement l'adaptation agricole. Ainsi, un nombre limité d'études d'impact au niveau canadien ont combiné d'un côté les connaissances acquises sur le rôle de l'adaptation dans l'estimation et de l'autre l'effet du climat sur le rendement des cultures. Encore moins d'études ont tenté de faire cet exercice d'un point de vue économique. En fait, avant 2003 des estimations n'étaient disponibles que pour les régions des Prairies et de l'Ontario. De plus, ces estimations étaient peu indicatives d'une tendance générale puisqu'elles présentaient des intervalles de confiance contenant un changement nul (entre -7 et 5 % pour l'Ontario et les Prairies) (Brklacich et al., 1998). Suite à cela, deux études au niveau national (Reinsborough, 2003; Weber et Hauer, 2003) ont été entreprises, venant combler le besoin évident dans la littérature canadienne. En utilisant sensiblement la même approche (approche Ricardienne), ces deux recherches se sont distinguées principalement par leur échelle de résolution spatiale employée (3665 vs 267 unités d'observations). C'est probablement pourquoi les deux recherches présentent d'importantes différences dans leurs résultats (Weber et Hauer, 2003). Le tableau 2.1 résume les conclusions de ces deux études et inclut certaines recherches globales qui n'ont pas été entreprises par des chercheurs canadiens, mais qui se sont prononcées sur le sort de l'agriculture au Canada suite aux changements climatiques. À l'exception de Darwin (1999), il apparaît évident à la lumière des résultats présentés ici que l'agriculture au Canada ne sera pas désavantagée par les changements climatiques. Pourtant, il

TABLE 2.1 – Divers estimés de l'impact économique sur l'agriculture canadienne

Études	Régions	Scénario	Impacts
Reinsborough, 2003	Canada	Uniforme	Hausse de 0,9-1,5 million du PIB agricole
Weber et Hauer, 2003	Canada	CGCM11	Hausse de 6 milliards du PIB agricole (+ 16 %)
Darwin <i>et al.</i> , 1995	Canada	GISS GSDL UKMO OSU	Hausse entre 1,6 et 2,8 % du PIB globale canadien (+ 12,8 - + 22,4 % du PIB agricole
Darwin, 1999	Canada	GISS GSDL UKMO OSU	Impact entre - 46,78 et + 7,83 % des rentes ricardiennes agri- coles
Tol, 2002	Canada États-Unis	Moyenne de divers scénarios	augmentation de 1 % du PIB agricole

existe encore d'importantes divergences dans les estimations qui font potentiellement foi des lacunes respectives des approches Ricardienne et fonction de production. De plus, comme nous en avons discuté précédemment, les travaux de Weber et Hauer (2003) qui utilisent l'approche Ricardienne et qui représentent jusqu'à aujourd'hui l'estimation la plus précise de l'effet des changements climatiques sur l'agriculture au Canada est potentiellement soumise à des erreurs de spécification qui viendrait biaiser les estimations. En s'appuyant sur les travaux de Deschênes et Greenstone (2007), qui ont testé la robustesse de l'approche Ricardienne aux États-Unis, il n'y a aucune raison de croire que l'application de l'approche Ricardienne au Canada échapperait aux failles associées à ce type de modèle. De plus, leurs estimations ne présentaient pas

d'intervalles de confiance et ainsi n'ont pas été soumises à des tests de robustesse qui pourraient remettre en doute la validité de la méthodologie utilisée. C'est pourquoi cette étude tentera de donner un troisième avis sur l'impact économique des changements climatiques sur l'agriculture canadienne en tentant de corriger les défaillances des deux premières estimations toutes deux basées sur l'approche Ricardienne.

## Chapitre 3

### Méthodologie

La méthodologie adoptée dans cette recherche repose sur une analyse de l'évolution temporelle des divisions du recensement agricole en réponse aux variations aléatoires du climat. Ainsi, à l'aide d'une étude longitudinale, nous cherchons à comprendre la réaction des profits agricoles d'une division de recensement particulière face aux variations annuelles de son climat après que l'on ait contrôlé pour toutes les autres variables susceptibles d'influencer ces mêmes profits. Pour ce faire, nous estimons l'effet du climat sur les profits agricoles par division de recensement en insérant des effets fixes de divisions ainsi que des effets fixes par province par année. Conséquemment, à partir des variations du climat spécifiques aux divisions de recensement, nous serons en mesure d'identifier les effets du climat sur les profits agricoles après un ajustement pour les chocs communs à toutes les divisions dans une province et dans une année particulière. Nous ferons l'hypothèse que les variations du climat sont aléatoires et qu'elles sont orthogonales aux déterminants non observables du profit agricole procurant ainsi une solution au problème de variables omises de l'approche Ricardienne (Deschênes et Greenstone, 2007).

## 3.1 Différences avec l'approche Ricardienne

Il existe des différences fondamentales qui distinguent l'approche utilisée dans cette recherche de l'approche Ricardienne. Premièrement, nous verrons que l'inclusion d'effets fixes de divisions vient modifier la variable dépendante analysée et donc les possibilités de comparaison entre les deux méthodes. Ensuite, cela nous force également à construire une base de données qui s'étale sur plusieurs années, contrairement à l'approche Ricardienne où l'on se penche sur une année particulière. Finalement, nous verrons que ces changements ne comportent pas que des avantages et que cela limitera la modélisation des stratégies d'adaptation des agriculteurs.

### 3.1.1 Modèle à effets fixes

L'insertion d'effets fixes de divisions sert à contrôler pour toutes variables invariables dans le temps qui sont spécifiques à une division de recensement et qui sont potentiellement omises par notre modèle (par exemple les caractéristiques du sol ou la présence d'un microclimat). Cette technique nous permet de corriger la principale lacune du modèle Ricardien qui n'est pas en mesure de contrôler pour l'ensemble des variables explicatives de la productivité agricole ce qui biaise ainsi l'estimation des coefficients associés au climat, le terme d'erreur étant corrélé avec les variables explicatives. Nous insérons également des effets fixes de province par année pour isoler l'influence du temps et de la géographie sur les profits agricoles. Cette spécification cherche à contrôler pour l'influence de chocs annuels communs à toutes les divisions d'une même province. Comme nous le verrons plus loin, cela permet notamment de contrôler pour l'influence des fluctuations dans le prix des biens agricoles sur les profits.

Toutefois, l'influence de variables statiques spécifiques à une division est directement captée à travers l'effet fixe de division rendant l'estimation des coefficients associés à ses variables inapplicable (Green, 2007). Concrètement, l'influence de va-

riables statiques, par exemple la qualité du sol en présence, est captée par le modèle sans toutefois que nous puissions y apposer une mesure exacte de son effet sur l'agriculture. Cela nuit à l'interprétation sans toutefois poser de problème méthodologique.

### 3.1.2 Variable dépendante et calcul de la valeur des terres agricoles

L'utilisation d'un modèle à effets fixes empêche cependant de se pencher sur la valeur des terres agricoles comme variable dépendante contrairement à ce que fait le modèle Ricardien dans son analyse. En effet, l'inclusion d'effets fixes de division ne peut pas se faire dans un modèle statique comme le modèle Ricardien. En fait, étant donné que la valeur des terres agricoles est influencée par l'effet à long terme du climat et non pas par ses variations de court terme, l'estimation du modèle Ricardien exige l'utilisation de variables climatiques reflétant les moyennes historiques de long terme (par exemple 1971-2000). Étant donné que ces variables explicatives ne présentent pas de variation temporelle, il est alors impossible d'estimer des effets fixes. À l'opposé, notre modèle s'intéresse plutôt à l'impact des variations annuelles aléatoires du climat. Il devient alors impensable d'utiliser une mesure de long terme de la productivité agricole, c'est-à-dire la valeur des terres agricoles, puisque celle-ci n'est pas influencée par les variations de court terme du climat. Il faut donc se tourner vers les profits agricoles annuels comme variable dépendante, ceux-ci étant nécessairement influencés par les variations climatiques annuelles. Ainsi, le modèle s'intéresse plutôt à l'impact du temps sur les profits annuels qu'à l'impact du climat sur la profitabilité ou la valeur des terres à long terme. Heureusement, à partir des résultats obtenus, il est encore possible de mesurer l'effet du climat sur la valeur des terres agricoles et ainsi de comparer les résultats des deux approches. En fait, lorsque nous obtenons des estimés de l'impact des changements climatiques sur le profit agricole, il est fort simple de calculer la valeur des terres agricoles puisque celle-ci reflète la valeur actualisée des profits agricoles futurs. Il suffit donc de faire une hypothèse sur le taux

d'actualisation et de supposer que le changement dans les profits sera constant, pour ensuite ramener les flux de profits futurs à aujourd'hui et obtenir le changement dans la valeur des terres agricoles causé par les changements climatiques (Deschênes et Greenstone, 2007).

### 3.1.3 Adaptation à long terme vs court terme

La distinction entre temps (au sens climatique du terme) et climat est importante. Le temps se définit comme les réalisations à court terme du climat. Ainsi, un changement dans le temps et un changement dans le climat sont deux notions bien différentes, l'une faisant référence au court terme tandis que l'autre au long terme. Évidemment, en passant de variables explicatives de long terme vers celles de court terme, d'importantes implications d'interprétation économique s'imposent à la discussion (Schlenker *et al.*, 2007). Ce déplacement du focus qui se traduit vers l'analyse d'une mesure à court terme du profit agricole ne peut se faire sans une perte d'information concernant les tendances à long terme, notamment quant au comportement des agriculteurs dans un changement permanent du climat. En effet, en étudiant l'impact des réalisations climatiques annuelles nous limitons les stratégies d'adaptation des agriculteurs captées par le modèle à des stratégies de court terme (sur un an). Pourtant, un changement permanent dans le climat pourrait venir modifier l'utilisation la plus bénéfique de la terre agricole (celle qui maximise les profits) et forcer les agriculteurs à modifier substantiellement leurs comportements notamment par rapport à l'utilisation de l'irrigation, au timing d'ensemencement, aux types de cultures plantés ou carrément à l'activité pratiquée sur la terre. La figure 3.1<sup>1</sup> illustre la relation entre le profit et la température pour différentes activités potentielles de la terre. La ligne foncée représente la relation d'équilibre de long terme entre température et

---

1. Ce graphique a été présenté pour la première fois dans l'article pionnier de Mendelsohn, Nordhaus et Shaw (1994). Par la suite, il a été utilisé maintes et maintes fois pour illustrer de façon simple le comportement rationnel prévu de l'agriculteur suite aux changements climatiques.

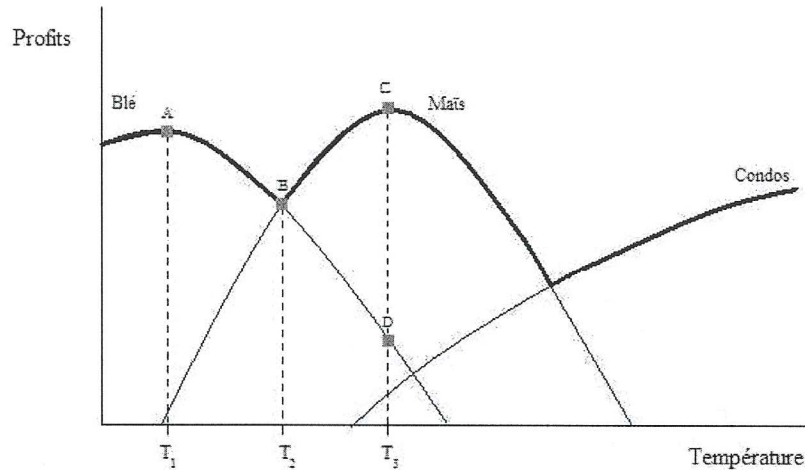


FIGURE 3.1 – Relation entre le profit et la température pour différentes activités

profit, c'est-à-dire l'utilisation la plus rentable de la terre en fonction de la température. Cet équilibre, qui est capté par le modèle Ricardien, se dessine à partir des sections de chacune des fonctions de profit qui maximisent le profit de l'agriculteur en comparaison à toutes les autres activités potentielles de la terre pour une température donnée. Ainsi, lorsque l'agriculteur a la possibilité de modifier l'utilisation de sa terre à son gré, il évoluera le long de la ligne foncée afin de maximiser son profit. Si par exemple, la température est de  $T_1$ , l'agriculteur cultive du blé et engrange un profit de  $A$ , à  $T_2$  il est indifférent entre la culture de blé et de maïs et à  $T_3$  il sème du maïs seulement, pour un profit de  $C$ . Si par contre, l'agriculteur ne peut pas modifier ses cultures, à  $T_3$  il continuera à cultiver du blé et devra se contenter d'un profit de  $D$  au lieu d'un profit de  $C$  qui est plus élevé. Malheureusement, notre modèle ne sera pas en mesure de capter la possibilité d'un changement de cultures ou de vocations, car il est improbable qu'un agriculteur puisse changer de cultures à l'intérieur d'une même saison de culture. Cette décision se fait graduellement, donc à long terme, à mesure que l'agriculteur prend conscience du changement dans le climat et de la nécessité de modifier le choix de ses cultures pour maximiser ses revenus.

Heureusement, notre modèle captera la résilience de l'agriculteur face au climat, c'est-à-dire sa capacité à absorber un choc imprévu de climat. Il captera donc la réaction de l'agriculteur qui, face aux fluctuations du climat, optera pour des stratégies d'adaptation de court terme telles qu'une modification de son utilisation de fertilisants et/ou de pesticides, l'augmentation de l'irrigation de ses champs lors d'un été particulièrement chaud et sec ou le devancement du moment de la récolte. L'impact économique d'une telle omission est difficile à évaluer. D'une part, on s'attendrait à ce que les agriculteurs aient plus de flexibilité à long terme quant aux stratégies d'adaptations possibles (changer de cultures, développer de nouvelles variétés de plantes résistantes à la chaleur, adopter un système d'irrigation plus performant, etc.) s'ajustant donc mieux au nouvel environnement. Dans un tel cas, nos estimations seraient biaisées vers le bas. Par contre, pour Schlenker *et al.* (2007), certaines stratégies de court terme ne sont pas durables à long terme et donc les estimations du modèle à effets fixes seraient plutôt biaisées vers le haut. Par exemple, à court terme il peut être avantageux d'irriguer les champs à partir des eaux sous-terraines. À long terme, cette stratégie peut mener à une disparité des ressources en eau et à un aggravement du déficit d'humidité des plants. Il n'est donc pas clair quel est l'effet réel de l'adaptation à long terme dans le contexte des changements climatiques.

## 3.2 Équilibre partiel

Une importante faille des modèles économiques qui étudient l'impact des changements climatiques sur l'agriculture concerne leur approche du type équilibre partiel qui suppose que le prix relatif des produits agricoles sera constant dans le temps. Les critiques font état que l'analyse en équilibre partiel peut mener à des estimations biaisées puisque cette méthode tend à sous-estimer les dommages et surestimer les bénéfices (Cline, 1996). Plus spécifiquement, ce que Cline (1996) critique dans sa réponse au modèle Ricardien de Mendelsohn, Nordhaus et Shaw (1994), est que

la modélisation permet aux agriculteurs de modifier la fonction de leur terre (par exemple de la culture du blé vers la culture du maïs) sans toutefois que ceux-ci soient à l'affût des nouveaux prix relatifs du blé versus du maïs suite aux changements climatiques. En effet, il est possible que le climat ait augmenté de manière importante la valeur du blé par rapport à la valeur du maïs, en raison d'un choc d'offre par exemple, et que l'agriculteur n'en étant pas conscient base son choix de culture simplement sur le changement de productivité de chacune des cultures dans le nouveau climat. En omettant de considérer la variation des prix relatifs, l'utilisation d'un équilibre partiel cause donc nécessairement un biais dans l'estimation. Mendelsohn et Nordhaus (1996), ont répliqué aux critiques en calculant l'ampleur approximative du biais causée par cette faiblesse de leur modèle. Ils en sont venus à la conclusion que plus l'offre de produits agricoles est élastique, plus le biais de l'estimation sera petit. Également, ils ont trouvé que plus l'impact des changements climatiques sur les quantités était petit plus le biais s'approchera de zéro (Mendelsohn et Nordhaus, 1996 ; Mendelsohn, Nordhaus et Shaw, 1999). Par conséquent, pour saisir l'ampleur du biais qui touche notre estimation, puisque celle-ci fait également usage d'une analyse en équilibre partiel, il faut donc comprendre comment se dessine la courbe d'offre des produits agricoles à long terme. Imaginons un instant, un choc dans le climat qui affecte négativement la quantité produite. La courbe d'offre (voir figure 3.2) se déplace donc vers la gauche.

À court terme, l'offre étant complètement inélastique en raison du délai entre la semence et la récolte, l'agriculteur ne peut modifier sa quantité produite et les prix s'envolent à  $P_{CT}$ . Cependant, à long terme, les agriculteurs (existants et nouveaux) répondent au signal lancé par l'augmentation dans le prix relatif face aux autres biens agricoles et accroissent leur production, augmentant l'offre et ramenant du même coup le prix au niveau initial  $P_{LT}$ . Suivant cette logique, il est tout à fait raisonnable de poser que le changement dans le prix à long terme est inférieur à celui de court terme et qu'il est même peut-être égal à zéro. C'est donc dire que la courbe d'offre de produits

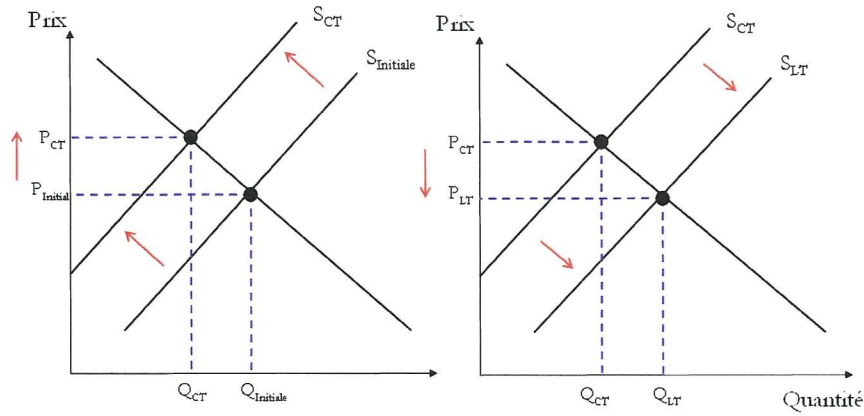


FIGURE 3.2 – Effet d’un choc d’offre sur le prix d’un bien agricole

agricoles est beaucoup plus élastique à long terme qu’à court terme, réduisant ainsi, selon Mendelsohn et Nordhaus (1996), le biais de l’estimation vers zéro. De manière plus théorique, considérons l’équation de profits d’un agriculteur représentatif qui produit une certaine culture et qui, comme dans notre modèle, n’a pas la possibilité de changer de cultures en réponse aux variations de court terme du climat :

$$\pi = p(q(w))q(w) - c(q(w)) \quad (3.1)$$

où  $p$ ,  $q$  et  $c$  dénotent respectivement les prix, la quantité et les coûts. Le prix et les coûts sont fonction de la quantité. La quantité est fonction du climat,  $w$ , puisque celui-ci affecte directement les rendements annuels. Maintenant, considérons la réponse du profit de l’agriculteur face à un changement dans le climat :

$$\partial\pi/\partial w = (\partial p/\partial q)(\partial q/\partial w)q + (p - \partial c/\partial q)(\partial q/\partial w) \quad (3.2)$$

Le premier terme mesure le changement dans le prix en réponse au choc dans le climat multiplié par l’effet du climat sur la quantité, lui-même multiplié par le niveau initial de quantité produite. Nous avons montré précédemment qu’un choc d’offre ( $\partial q/\partial w$ ) qui affecte négativement (positivement) la quantité fait grimper (chuter) le prix à court terme, mais qu’à long terme les prix devraient retourner, du moins

partiellement vers leur niveau initial. C'est donc dire qu'à long terme  $\partial p/\partial w \approx 0$ , que le premier terme est égal à zéro et que l'hypothèse d'un équilibre partiel n'est pas si farfelue après tout. Le deuxième terme de l'équation (2) mesure le changement de profit (prix - coût marginal) causé par le changement dans le climat à travers l'effet du climat sur les quantités. Il mesure ainsi le changement dans la productivité de l'activité agricole et représente l'effet à long terme des changements climatiques sur les profits agricoles en maintenant constant le choix des cultures. C'est ce terme que nous cherchons à isoler. Par conséquent, étant donné que les changements climatiques sont un phénomène permanent, donc de long terme, l'objectif de notre modèle est de se soustraire de l'influence de variations temporaires dans les prix et cherche à isoler le changement à long terme du profit.

Le problème avec notre méthodologie est qu'elle repose sur les réalisations annuelles du climat et ainsi nos estimations sont vulnérables à l'influence des variations de court terme dans les prix, c'est-à-dire que nous risquons de capter le premier terme comme étant non nul alors que nous avons montré qu'à long terme il devrait s'approcher de zéro. En effet, il est fort possible qu'au courant d'une certaine année les prix aient fluctué de manière importante à cause du climat ou de tout autre facteur et que cette volatilité dans les prix ait été l'explication principale des variations du profit agricole. Par conséquent, notre modèle doit être en mesure de se soustraire de l'effet de court terme du climat sur les prix qui pourraient cacher l'effet réel de long terme des changements climatiques. Heureusement, il y a plusieurs raisons de croire que notre modèle ne souffrira pas de l'influence des changements à court terme dans le prix. D'abord, Deschênes et Greenstone (2007) ont montré que les changements climatiques auront très peu d'impact sur le rendement et donc sur les quantités produites notamment pour les deux plus grandes cultures aux États-Unis soit le maïs et le soya. C'est donc dire que l'offre de produits agricoles ne devrait pas bouger de manière importante, stabilisant du même coup les prix. Ainsi, comme nous en avons discuté précédemment, plus l'effet des changements climatiques sur la quantité est

petit et plus le biais de notre estimation sera petit (Mendelsohn et Nordhaus, 1996). Ensuite et plus important encore, notre modèle économétrique inclut des effets fixes de province par année et donc ajuste implicitement pour tous les facteurs communs à travers les divisions d'une même province à une année donnée tel que le niveau des prix, procurant ainsi une assurance que nos estimés ne seront pas influencé par le changement temporaire des prix agricoles. Conséquemment, le modèle réussira à se soustraire de l'influence du premier terme sur les profits agricoles et captera le second terme soit l'impact à long terme des changements climatiques.

# Chapitre 4

## Cadre empirique

### 4.1 Modèle économétrique

La formulation de base de notre modèle économétrique est la suivante :

$$y_{dt} = \sum_i \beta_i f_i(W_{idt}) + \alpha_d + \gamma_{pt} + u_{dt} \quad (4.1)$$

où  $y_{dt}$  est le profit par acre de la division de recensement  $d$  à la période  $t$ . Comme nous en avons discuté précédemment, la variable dépendante n'est pas la valeur des terres agricoles de la division de recensement comme dans l'approche Ricardienne, mais plutôt le profit agricole par acre de cultures.  $\alpha_d$  est un effet fixe de division qui capte l'effet de toutes les variables non observables, stables dans le temps, qui influencent le profit de la division de recensement  $d$ .  $\gamma_{pt}$  est un effet fixe de temps par province qui vient contrôler pour des facteurs influençant le profit qui sont communs à toutes les divisions de recensement d'une même province  $p$  pour la période  $t$ .  $\beta_i$  est un vecteur de coefficients captant l'effet du climat sur le profit agricole.  $W_{idt}$  est un vecteur de réalisations annuelles des variables climatiques qui influencent le profit agricole de la division  $d$  pour l'année  $t$ . Finalement,  $u_{dt}$  est un terme d'erreur stochastique. D'abord, la validité de nos estimations repose sur l'hypothèse que l'estimation de l'équation (3) va produire des estimés non biaisés du vecteur  $\beta$ . Ainsi, la convergence de chacun

des  $\beta_i$  requiert que :

$$E[f_i(W_{idt})u_{dt}|\alpha_d, \gamma_{pt}] = 0 \quad (4.2)$$

c'est-à-dire que les réalisations annuelles du climat soient orthogonales à toutes les autres variables explicatives du modèle. Le vecteur  $W_{idt}$  qui contient les réalisations annuelles du climat incorpore d'abord des mesures d'accumulation de chaleur (mesuré par les degrés-jours de croissance) et d'accumulation de précipitations pour la saison de culture. L'ajout de variables climatiques mesurant la variabilité du climat ainsi que celle mesurant la durée de la saison de culture raffine le modèle de Deschênes et Greenstone (2007). Étant donné que la relation entre le climat et les rendements agricoles est inconnue, nous testerons différentes stratégies d'estimation en modifiant le contenu du vecteur de réalisations du climat  $W_{idt}$ . Suivant la littérature existante, notamment pour le Canada, nous introduirons également des transformations quadratiques des variables d'accumulation de chaleur et de précipitations pour capter l'effet non linéaire du climat sur l'agriculture.

#### 4.1.1 Le rôle de l'irrigation

Une note sur l'irrigation est importante ici. Dans l'article de Deschênes et Greenstone (2007), les auteurs estiment séparément leur modèle selon qu'un comté est irrigué ou non. Cette technique fait suite à des recommandations dans la littérature qui fait état des différences importantes de réponses au climat d'un comté qui est irrigué comparativement à un autre qui ne l'est pas (Schlenker, Hanemann et Fisher, 2005). En fait, un comté irrigué serait beaucoup moins vulnérable aux changements climatiques qu'un comté qui compte essentiellement sur l'eau de pluie pour arroser ses champs. Au Canada, très peu de fermes utilisent l'irrigation de façon régulière alors que moins de 2 % du territoire agricole canadien est irrigué (aux États-Unis ce chiffre grimpe à environ 18-19 %). Dans les travaux de Deschênes et Greenstone (2007) et dans la littérature en général, on définit un comté irrigué si 10 % de son territoire cultivé est irrigué. Selon ce critère, au Canada seulement 10 divisions de recensement sur

260 tombent dans cette catégorie ( $\approx 3.8\%$ ). Même pour les divisions qui utilisent le plus l'irrigation au Canada, aucune d'entre elles n'irrigue ses terres sur plus de 30 % de son territoire cultivable. Le comportement des profits face au climat ne devrait donc pas être différent des autres divisions et c'est pourquoi nous n'estimons pas séparément le modèle comme le font Deschênes et Greenstone (2007). Il n'est pas dit cependant que l'utilisation de l'irrigation ne changera pas dans l'avenir au Canada. Et donc, les recherches futures devront adresser le problème d'intégration des stratégies d'irrigation afin de considérer la possibilité d'une modification substantielle de leur utilisation suite au réchauffement des températures et à l'augmentation du déficit hydrique des cultures. Cependant, les modèles qui rendront endogène l'irrigation, devront également tenir compte des ressources disponibles en eau suite aux changements du climat. Ce genre de modélisation est hors de la portée de ce mémoire et nous laisserons donc le soin aux recherches futures de se pencher plus attentivement sur la question.

## 4.2 Méthode d'estimation

Nous estimons notre modèle par MCO en y incorporant les effets fixes à l'aide de variables binaires. Ainsi, nous estimons l'équation suivante :

$$y_{dt} = \beta_0 + \sum_{i=1}^I \beta_i W_{idt} + \sum_{d=2}^N \alpha_d D_d + \sum_{p=1}^P \sum_{t=2}^T \lambda_{pt} D_{pt} + u_{dt} \quad (4.3)$$

Étant donné qu'il est fort probable que les termes d'erreurs soient géographiquement corrélés et que nous ne connaissons pas la nature de la dépendance qui unit deux résidus entre eux, il faut tenir compte de la présence potentielle d'hétéroscédasticité. Suivant les travaux de Deschênes et Greenstone (2007), nous présentons les écarts-types calculés à partir de la matrice de variance Huber/White/Sandwich qui corrige pour la présence potentielle d'hétéroscédasticité. Également, comme discuté précédemment, nous pondérons nos régressions par le nombre d'acres cultivés pour que

chacune des divisions de recensement occupe son poids représentatif à l'intérieur de notre population.

## 4.3 Description des données

L'étude d'impact des changements climatiques sur l'agriculture nécessite la collecte de données détaillées sur le climat et sur la production agricole. Nous passerons brièvement sur une description de ces données pour bien comprendre les possibilités d'utilisation et d'interprétation qu'elles nous offrent, mais également les limites respectives qu'elles nous imposent.

### 4.3.1 Données agricoles

Les données sur les exploitants agricoles proviennent des recensements de l'agriculture de 1986, 1991, 1996, 2001 et 2006 entrepris par Statistique Canada. Tous les 5 ans, l'ensemble des exploitants agricoles doit répondre à un questionnaire traitant des caractéristiques, de l'exploitation et de la gestion de leur(s) ferme(s). Ces informations sont ensuite comptabilisées pour former le profil agricole de différents niveaux d'agglomération régionale (pays, provinces, régions agricoles de recensement, divisions de recensement, subdivisions de recensements unifiées, etc.). Dans cette étude, les unités d'observations utilisées sont les divisions de recensement<sup>1</sup> (260 observations par recensement). Ce niveau d'agrégation a été sélectionné en raison du fait qu'après les provinces, les divisions de recensement constituent les régions géographiques admi-

---

1. « Les divisions de recensement sont des groupes de villes voisines les unes des autres qui sont réunies pour des besoins de planification régionale et de gestion de services communs (comme les services de police et d'ambulance). Ces groupes sont créés selon les lois en vigueur dans certaines provinces et territoires du Canada. Par exemple, une division de recensement peut correspondre à un comté, à une municipalité régionale ou à un district régional. Dans d'autres provinces ou territoires dont les lois ne prévoient pas de telles régions, Statistique Canada définit des régions équivalentes à des fins statistiques en collaboration avec ces provinces et territoires. » (Statistique Canada, 2008)

nistratives les plus stables pour une étude longitudinale comme celle-ci (Statistique Canada, 2008). Après avoir examiné les limites géographiques des divisions de recensement de chacune des années, les données du recensement de l'agriculture de 1986 ont été laissées de côté puisque les limites géographiques ont été complètement modifiées entre le recensement de 1986 et celui de 1991 rendant la comparaison temporelle nécessaire à une étude longitudinale impossible. Ainsi, seules les données des recensements de 1991, 1996, 2001 et de 2006 seront utilisées. De plus, d'année en année certaines divisions de recensement subissent de légères modifications de leurs limites. Nous avons donc ajusté les données pour ramener la géographie des divisions de recensement à une année de référence (1996) pour que le moins d'erreurs de mesure possible s'infiltrant dans nos données. Ainsi, après tous les ajustements nécessaires à la comparaison des données entre les quatre recensements agricoles, notre base de données forme un panel équilibré de 260 divisions de recensement à travers le Canada pour les années 1991, 1996, 2001 et 2006. Pour des raisons administratives, le nombre de divisions de recensement n'est pas équilibré entre les provinces. Ainsi, le Québec compte près de 100 divisions de recensement alors que la Saskatchewan, qui est également un important producteur de produits agricoles, n'en compte que 17.

Les variables extraites du recensement de l'agriculture servant à l'estimation du modèle sont les revenus totaux agricoles (excluant les produits forestiers), les dépenses totales agricoles, la superficie cultivée et le nombre de fermes. Le recensement agricole au Canada se fait habituellement à la mi-mai et donc les données sur les revenus et les dépenses ne représentent pas la saison de culture correspondant à l'année de recensement, mais bien ceux de l'année précédente. Par exemple, pour le recensement agricole de 2006, les revenus et les dépenses de 2005 sont calculés. À partir des revenus et des dépenses, nous calculons le profit agricole de la division de recensement exprimé par acre de culture. Cette mesure capte la marge bénéficiaire (mark-up) de la terre et nous servira de variable dépendante dans nos régressions :

$$\textit{ProfitAgricole} = (\textit{Revenus} - \textit{Dépenses})/\textit{Acres} \quad (4.4)$$

TABLE 4.1 – Nombre de divisions de recensement par province

<i>Province</i>	<i>Divisions de Recensement</i>
Terre-Neuve/Labrador	6
Île-du-Prince-Édouard	3
Nouvelle-Écosse	18
Nouveau-Brunswick	14
Québec	95
Ontario	48
Manitoba	21
Saskatchewan	17
Alberta	17
Colombie-Britannique	21
<b>Total</b>	<b>260</b>

Ainsi, le profit agricole est égal aux revenus totaux<sup>2</sup> moins les dépenses totales<sup>3</sup> encourues par toutes les fermes de la division de recensement divisé par le nombre d'acres cultivés à l'intérieur de la division au courant de cette année. Toutes les données concernent les terres dédiées à la culture, au pâturage et à l'élevage (Statistique Canada, 2008). Le tableau 4.2 présente un sommaire des données sur les exploitants agricoles extrait des recensements agricoles de 1991, 1996, 2001 et 2006. Les données

2. « Les revenus bruts agricoles comprennent les revenus de la vente de tous les produits agricoles et les paiements reçus de programmes et les revenus du travail à forfait. Les éléments qui ne sont pas compris dans le calcul des revenus agricoles du recensement sont les ventes de biens immobilisés (par exemple, les quotas, les terres et la machinerie) ainsi que les revenus provenant de la vente de produits achetés uniquement pour la vente au détail. » (Statistique Canada, 2008)

3. « Les dépenses d'exploitation totales incluent tout coût associé à la production de cultures ou à l'élevage de bétail, à l'exception de l'achat de terres, de bâtiments et d'équipement. Ces coûts peuvent provenir de l'achat de semences, des aliments pour animaux, du carburant, des engrais, etc. Le total des dépenses pour le fonctionnement de l'exploitation ne comprend pas l'amortissement ni les déductions pour amortissement. » (Statistique Canada, 2008)

TABLE 4.2 – Profil agricole des divisions de recensement

	1991	1996	2001	2006
<b>Nombre de fermes</b>	1 077	1 064	950	882
<b>Superficie cultivée (milliers d'acres)</b>	643,94	646,80	642,55	642,35
<b>Superficie moyenne par fermes (acres)</b>	598	608	676	728
<b>Revenus (milliers de \$)</b>	121 811	141 510	154 405	151 661
<b>Dépenses (milliers de \$)</b>	99 645	117 097	133 902	130 972
<b>Profits (milliers de \$)</b>	22 166	24 414	20 503	20 689
<b>Profits par acre (\$/acre)</b>	34	38	32	32

*Notes : Toutes les données sont des moyennes d'un panel balancé de 260 divisions de recensement. Toutes les données monétaires sont en dollars constants de 2002.*

présentent clairement une tendance vers une agriculture de plus en plus concentrée dans les mains d'un plus petit nombre de fermes. Ainsi, d'une moyenne de 1 077 fermes par divisions de recensement en 1991 nous sommes passés à 882 en 2006. La superficie moyenne par ferme a également suivi cette tendance alors qu'elle est passée de 598 à 728 acres par ferme. La superficie totale n'a quant à elle pas subi de changement majeur au courant des derniers vingt ans. Au niveau du profit agricole par acre de culture, celui-ci a fluctué autour de 35\$/acre et donc n'a pas changé énormément au fil des années.

### 4.3.2 Données climatiques

#### Réalisations du climat

Les données de réalisations du climat sont les variables explicatives du modèle. En étudiant conjointement les réalisations climatiques d'une année spécifique et les profits agricoles qui ont été engrangés cette même année, nous serons en mesure de capter

la relation qui existe entre climat et le profit agricole. Cependant, la compréhension du lien qui unit climat et production agricole est encore aujourd'hui imparfaite. Ceci tient notamment au fait que la réponse biophysique des cultures au climat est très complexe autant par le nombre de variables explicatives que par la forme des relations qui les unissent. Plus spécifiquement, la modélisation est rendue difficile d'abord parce qu'on ne détient pas des données sur l'ensemble de ces variables climatiques et bioclimatiques, mais également parce que la forme des relations qui lient ces variables entre elles est probablement non linéaire et inconnue. À ce jour, les recherches économiques analysant l'impact des changements climatiques sur l'agriculture ont majoritairement fait usage des moyennes climatiques mensuelles pour modéliser l'influence du climat sur la production agricole. Cependant, Mendelsohn (2007) en se basant sur des recherches agronomiques, notamment celles de Mearns *et al.* (1997), suggère que la variance du climat est un déterminant important du rendement agricole au même titre que les normales climatiques. Par exemple, alors que les valeurs moyennes imposent certes un choix de cultures aux agriculteurs, la variabilité du climat quant à elle en détermine, du moins partiellement, le rendement. En introduisant dans notre équation économétrique des mesures de variabilité du climat, le modèle amélioré permet donc de mieux identifier l'influence de chacune des variables en s'appuyant sur une forme fonctionnelle plus réaliste (Mendelsohn *et al.*, 2007). En fait, nous cherchons à peaufiner la modélisation de la réponse biophysique des cultures face au climat qui jusqu'à maintenant a été très rudimentaire particulièrement par les études utilisant l'approche Ricardienne au Canada. Nous suivrons également les travaux de Deschênes et Greenstone (2007), en introduisant des mesures cumulatives

de chaleur<sup>4</sup> et de précipitations au courant de la saison de culture<sup>5</sup>. Les données sur les réalisations du climat proviennent du Service Canadien des Forêts (ci-après SCF). En utilisant les mesures climatiques quotidiennes des stations météorologiques d'Environnement Canada, le SCF utilise un progiciel qui applique des algorithmes de lissage par plans affines (ANUSPLIN<sup>6</sup>) pour obtenir des données climatiques maillées (10KM X 10KM) pour l'ensemble du territoire canadien pour la période 1901 à 2005 (McKenney *et al.*, 2006). Cette technique permet notamment de fournir des données dans des régions plus éloignées où les données de stations météorologiques sont rarement disponibles. Cet exercice est particulièrement intéressant pour le Canada où le nombre de stations météorologiques qui fournissent des données complètes sur les températures et les précipitations est souvent limité. Ainsi, cela nous fournit les données de réalisation pour l'ensemble des régions du Canada, et ce, même si aucune station météorologique n'est en fonction dans certaines régions couvertes par notre étude.

Ensuite, le SCF se base sur les données quotidiennes de températures minimum et maximum et de précipitations pour construire une panoplie de variables bioclimatiques hebdomadaires, mensuelles et annuelles. C'est à partir de ces variables bioclimatiques que nous serons en mesure d'extraire l'ensemble de nos variables climatiques explicatives autres que les valeurs moyennes de températures et de précipitations.

---

4. L'accumulation de chaleur est mesurée par les degrés-jours de croissance (DJC). Ceux-ci sont calculés à partir d'une température de base de 5°C. Donc en prenant la température moyenne ((température max + température min)/2) de chacune des journées durant la saison de culture et en leur soustrayant 5°C pour ensuite sommer le tout nous obtenons une mesure des DJC. Par exemple, si la température moyenne de la journée est de 27°C, elle contribuera à 22 DJC (27°C - 5°C).

5. La saison de croissance varie d'une espèce végétale à l'autre, mais Ressources Naturelles Canada l'a déterminée selon des critères de température : la saison de culture commence quand la température moyenne quotidienne est supérieure ou égale à 5°C pendant cinq jours consécutifs après le 1er mars, et se termine quand le minimum moyen est inférieur à -2°C après le 1<sup>er</sup> août (Ressources Naturelles Canada, 2008).

6. Voir Hutchinson, 1999. ANUSPLIN Version 4.0. <http://cres.anu.edu.au/outputs/software.html>

Ainsi, nous employons des mesures d'isothermalité, de saisonnalité de la température et des précipitations, de l'amplitude quotidienne moyenne, de l'amplitude de la température de la saison de culture (voir l'annexe A pour une description complète des variables). La méthode d'interpolation discutée précédemment est également utilisée pour obtenir les moyennes historiques (1971-2000) et les scénarios de prévision de changements climatiques.

D'ailleurs, elle nous permet d'avoir des estimations régionales des scénarios de changements climatiques issues des Modèles de Circulation Générale (MCG) qui sont généralement très agrégées en raison de leur couverture au niveau mondial. Les travaux du SCF permettent donc de régionaliser l'étude d'impact des changements climatiques au Canada et de mieux identifier les régions les plus vulnérables en se basant sur des prévisions de changements climatiques ayant une résolution plus fine que ce que les MCG nous fournissent (McKenney *et al.*, 2006).

#### **Moyennes historiques (1971-2000)**

Lorsque l'effet du climat sur les profits agricoles sera capté par le modèle, c'est-à-dire lorsque nous aurons des coefficients associés à chacune des variables climatiques explicatives, nous soustrairons les prévisions de changements climatiques aux moyennes historiques de 1971-2000 afin d'obtenir le changement réel dans le climat. Ensuite, nous serons en mesure de calculer l'effet des changements climatiques sur l'agriculture en multipliant le changement prévu dans le climat par nos coefficients estimés. Les moyennes historiques du climat proviennent également du SCF, qui utilise les mesures de températures minimum et maximum ainsi que les précipitations pour calculer, à l'aide du même programme (ANUSPLIN), des données historiques couvrant la période 1971-2000 (McKenney *et al.*, 2005). Ces moyennes historiques, qui sont un point de repère par rapport aux scénarios de changements climatiques, sont utilisées pour bâtir la même gamme de variables bioclimatiques que pour les données de réalisations.

### Scénarios de prévision

Tout comme les autres données climatiques, les données de prévisions sont également extraites des travaux du SCF. Ils utilisent les scénarios de prévisions élaborés par les différents groupes internationaux<sup>7</sup> qui travaillent à l'élaboration de scénarios de prévision de changements climatiques en ligne avec les directives du GIEC. À partir de ces scénarios, qui sont estimés à l'aide des MCG à une échelle très grossière, ils utilisent encore une fois une interpolation statistique pour fragmenter les prévisions sur une grille de 10 KM X 10 KM couvrant l'ensemble de l'Amérique du Nord. Le SCF construit également, à partir de ces scénarios, les mêmes variables bioclimatiques disponibles pour les moyennes historiques et les réalisations mensuelles du climat. La construction de ces variables bioclimatiques pour les scénarios de prévision est un avancement clé dans l'étude d'impact. En effet, la majorité des recherches précédentes ont dû se contenter de mesures liées aux températures et aux précipitations limitant grandement la qualité de la prévision de l'impact. Nous utiliserons également quelques scénarios de prévision différents pour nous permettre notamment de tester la sensibilité de nos résultats face à différentes hypothèses sur l'évolution du climat. Ainsi, nous utiliserons les scénarios de changements climatiques issus des travaux du CCmaC (CGCM2) et du Centre Hadley (HADLEY3). Dans les deux cas, nous utiliserons la famille de scénarios A2<sup>8</sup>. L'horizon analysé est celui de long terme soit 2071-2100<sup>9</sup>.

---

7. Pensons notamment au Centre Canadien de la modélisation et de l'analyse Climatique (CCmaC), au Commonwealth Scientific & Industrial Research Organisation (CSIRO) ou au Centre Hadley au Royaume-Uni.

8. Voir <http://www.ipcc.ch> pour plus de détails sur les familles de scénarios.

9. Pour des raisons techniques, nous avons dû nous contenter d'une seule famille de scénarios. À la base, une analyse de sensibilité devait être faite sur les familles de scénarios, mais des contraintes de temps et de disponibilité des données nous ont forcé à prévoir l'impact seulement à l'aide d'une seule famille de scénarios et deux scénarios provenant de deux MCG différents (HADLEY et CGCM2).

### Survol des changements climatiques

Le tableau 4.3 présente un résumé du changement dans la température, les précipitations ainsi que la longueur de la saison de culture pour différents scénarios de prévisions. Clairement, l'impact des changements climatiques affecte lourdement l'accumulation de chaleur (degrés-jours de croissance) qui connaît une augmentation moyenne entre 72 et 75 % pour l'ensemble du Canada. Cette augmentation marquée de l'accumulation de chaleur pourrait engendrer un changement majeur dans le choix des cultures vers des plants qui préfèrent le temps chaud tel que les tomates, ou les arbres fruitiers. Au niveau de la longueur de la saison de culture, toutes les régions connaissent un allongement de l'intervalle propice à l'agriculture qui varie entre 4 et 6 semaines permettant potentiellement à certaines régions, particulièrement en Ontario, de récolter plus d'une fois à l'intérieur de la même saison de culture. Au niveau des précipitations, bien que l'ensemble des régions canadiennes soit soumis à un temps plus humide (de 9 à 12 %), l'augmentation importante des températures accentuera l'évapotranspiration et soumettra les cultures à un stress d'humidité plus important.

TABLE 4.3 – Niveaux actuels et futurs des variables bioclimatiques

	Historique	CGCM 2		HADLEY 3	
		Prévision	Différence	Prévision	Différence
<i>DJC SC</i>					
Toutes les DR (260)	1 385,02 (299,8)	2 386,3 (490,8)	1 001,3 (225,6) <b>[72%]</b>	2 421,2 (439,4)	1 036,2 (153,4) <b>[75%]</b>
Maritime (41)	1 472,6	2 097,2	624,6	2 281,3	808,8
Québec (95)	1 506,8	2 327,2	820,4	2 615,5	1 108,7
Ontario (48)	1 838,6	2 923,9	1 085,3	3 058,0	1 219,4
Prairies (55)	1 363,4	2 395,3	1 031,8	2 393,9	1 030,5

	Historique	Prévision	Différence	Prévision	Différence
C-B (21)	686,7	1 256,9	570,2	1 455,7	769,0
<i>Longueur SC</i>					
Toutes les DR (260)	177,8 (16,7)	212,9 (20,0)	35,1 (10,4) <b>[20%]</b>	206,2 (19,3)	28,4 (9,3) <b>[16%]</b>
Maritime (41)	198,7	227,1	28,4	230,4	31,7
Québec (95)	187,3	214,7	27,5	228,0	40,7
Ontario (48)	212,4	250,5	38,1	247,1	34,7
Prairies (55)	174,8	209,9	35,2	201,2	26,4
C-B (21)	148,4	188,8	40,4	188,4	40,0
<i>Précipitations SC</i>					
Toutes les DR (260)	345,2 (124,6)	387,4 (138,8)	42,2 (27,6) <b>[12%]</b>	376,0 (156,4)	30,7 (46,7) <b>[9%]</b>
Maritime (41)	645,1	749,6	104,5	765,5	120,5
Québec (95)	606,9	680,9	74,0	748,4	141,4
Ontario (48)	572,0	639,8	67,8	682,3	110,3
Prairies (55)	300,5	336,5	36,0	315,3	14,8
C-B (21)	344,9	396,1	51,2	360,8	15,9

Notes : Toutes les données sont des moyennes de l'ensemble des 260 divisions de recensement, pondéré par le nombre d'acres cultivés. Pour ce qui est du niveau actuel, ces données représentent les moyennes de 1971-2000. Les chiffres entre parenthèses présentent les écarts-types alors que les chiffres entre crochets présentent le changement en pourcentage. Nous présentons le tableau seulement pour la méthode d'interpolation des centroïdes pour alléger la lecture. Notez cependant que les données utilisant l'interpolation par moyenne sont relativement les mêmes. Degré-jours de croissance (DJC), division de recensement (DR) et saison de culture (SC)

### 4.3.3 Autres variables de contrôle

#### Données sur la qualité des sols

Il existe une panoplie de variables autres que le climat qui influence le profit agricole annuel. D'abord, la qualité des sols est un important déterminant de la capacité agricole d'une région particulière. Ainsi, même si une région présente un climat propice à l'agriculture, des contraintes au niveau du sol peuvent la rendre inapte à la culture ou à l'élevage. Dans l'éventualité des changements climatiques, il est probable que la transformation du climat modifie les caractéristiques des sols arables. Par exemple, dans les Prairies canadiennes, une modification des patterns de vents combinée à une baisse des précipitations pourrait accélérer l'érosion du sol, frappant du même coup lourdement les profits agricoles dans une région déjà très vulnérable aux sécheresses. Malheureusement, il n'existe pas de base de données au Canada qui suit l'évolution temporelle de la qualité des sols, c'est pourquoi notre modèle ne comportera pas de variables contrôlant pour les caractéristiques des terres agricoles. Cependant, les caractéristiques de sols se modifiant généralement très lentement à travers le temps, il est raisonnable de penser que dans notre échantillon, il n'y aurait de toute façon pas assez de variation temporelle pour qu'il soit possible d'en soutirer de l'information significative. D'ailleurs dans les travaux de Deschênes et Greenstone (2007), l'inclusion de variables de contrôle sur la qualité des sols, notamment le pourcentage de sable ou d'argile, n'influence que très peu les résultats obtenus. Ceci pourrait provenir de la très faible variation temporelle de ces variables dans leur échantillon qui s'étale sur 25 ans (1987-2002). Ainsi, si nous faisons l'hypothèse que la qualité des sols est statique dans le temps, l'inclusion d'effets fixes de divisions viendra contrôler implicitement l'influence de toutes variables statiques non mesurées sur les profits agricoles (Green, 2007). Le manque de données à ce sujet ne pose donc pas de problème économétrique.

#### 4.3.4 Manipulations géospatiales

Pour remettre les données sur le recensement de l'agriculture, les données sur le recensement de la population et les données sur le climat sur la même échelle de comparaison, il a fallu travailler à l'aide d'un système d'information géographique (SIG)<sup>10</sup>. Visuellement, les données climatiques sont représentées par des points géographiques éloignés entre eux de 10KM formant un quadrillage qui couvre l'ensemble du Canada. Pour obtenir une base de données qui reflète la réalité climatique sur le terrain, il faut obtenir des données climatiques au niveau des divisions de recensement et non pas au niveau d'un quadrillage maillé de 10KM X 10KM. Idéalement, nous voulons qu'un climat, c'est-à-dire un ensemble de caractéristiques climatiques telles que la température et les précipitations, décrive les conditions présentes à l'intérieur d'une division de recensement donnée. Nous avons fait appel à deux méthodes d'interpolation. La première, que nous nommerons *moyenne* a sommairement consisté à superposer les données maillées sur le climat (réalisations, moyennes historiques et scénarios de prévision) sur une carte des frontières des divisions de recensement de l'agriculture pour ensuite calculer une moyenne des valeurs de chaque point de données entrant dans une division de recensement. Nous avons répété l'exercice pour chacune des 260 divisions pour construire notre base de données sur le climat. La deuxième technique consiste à identifier le *centroid* de chacune des divisions de recensement et de lui attribuer le climat correspondant. Étant donné qu'il n'est pas clair laquelle des méthodes est préférable, nous présentons les résultats des deux méthodes d'interpolation.

---

10. Pour cette recherche, le SIG que nous avons utilisé est MapInfo Professionnal 9.0.

# Chapitre 5

## Résultats et discussion

Les résultats présentés dans le tableau 5.1 sont tirés de l'estimation de l'équation 5.1 par MCO. Les variables climatiques incluses sont l'accumulation de chaleur (degrés-jour de croissance) ainsi que l'accumulation de précipitations de la saison de culture. Nous insérons également des transformations quadratiques de ces deux variables. Cette formulation nous servira de repère (benchmark) pour comparer les différentes spécifications de notre modèle.

TABLE 5.1 – Estimation de base (modèle à effets fixes)

Variables	Centroids		Moyenne	
	Coefficients	Statistique-t	Coefficients	Statistique-t
DJC	0,0375862	1.45	0,027293	0.98
DJC <sup>2</sup>	-0,0000128	-1.33	-0,00000788	-0.78
PRCP	0,0141552	0.88	0,0186829	0.61
PRCP <sup>2</sup>	-0,000024	-1.14	-0,0000245	-0.63
	R <sup>2</sup> = 0,9532	N = 1040	R <sup>2</sup> = 0,9526	N = 1040

D'abord, nous voyons clairement que notre modèle explique la majeure partie des variations annuelles du profit puisque la mesure du R<sup>2</sup> est de plus de 0.95. Il

est clair que l'inclusion d'effets fixes vient renforcer la capacité du modèle à prendre en considération l'effet de toutes les autres variables non climatiques sur le profit. Cependant, il est également possible que notre population étudiée ne présente pas assez de variabilité interannuelle au niveau des profits agricoles, permettant ainsi aux effets fixes d'expliquer presque entièrement le niveau des profits annuels. Idéalement, pour corriger cette faiblesse de l'échantillon, il aurait fallu avoir à notre disposition des unités d'observations plus petites que les divisions de recensement (comme les subdivisions de recensement par exemple) qui renfermeraient plus d'intervariabilité et donc plus d'information. Toutefois, au Canada, le fait que les limites géographiques des agglomérations régionales plus petites changent énormément dans le temps est très problématique pour une étude longitudinale. Nous laisserons donc le soin aux recherches futures de se pencher sur la question <sup>1</sup>.

Comme nous le voyons dans le tableau 5.1, aucun des coefficients associés aux variables climatiques n'est significatif dans le cas de la méthode d'interpolation à l'aide de la moyenne. Les coefficients de la méthode par centroids présentent des résultats un peu plus intéressants alors que les deux coefficients associés à l'accumulation de chaleur sont significatifs à un degré de confiance de 80 %. Cependant, dans les deux cas les coefficients associés aux précipitations ne sont pas significatifs. Et donc, afin de prendre en considération cette faible significativité des coefficients et d'interpréter avec prudence les résultats, nous présenterons également les écarts-types de chacune des estimations de l'impact.

Supposons maintenant un instant que nous sommes l'agriculteur type canadien. Notre ferme se trouve dans une division de recensement qui connaît une accumula-

---

1. La même analyse aurait pu être faite en première différence et nous aurions eu une image de l'impact des variations interannuelles du climat sur les variations de profit. Cependant, notre échantillon étant limité à 4 périodes, la transformation aurait causé la perte d'une autre année de données et serait venue affecter l'estimation des coefficients. Nous laisserons le soin aux recherches futures de s'intéresser à cette problématique à mesure que d'autres années d'observations seront disponibles.

tion de chaleur historique moyenne de 1 385 DJC et 345 mm de précipitations au courant de la saison de culture. Considérons également le scénario de changements climatiques moyen pour le Canada soit, une hausse de 1 000 DJC et 30 mm de plus de précipitations. Comment se répercute ce changement du climat sur le profit par acre de culture? Nous savons que le profit causé par le climat au temps  $t$  est égal à :

$$Profit_t = \beta_0 + \beta_1 DJC + \beta_2 DJC^2 + \beta_3 PRCP + \beta_4 PRCP^2 \quad (5.1)$$

Et que le profit au temps  $t+1$ , c'est-à-dire lorsque viendra les changements climatiques est égal à :

$$Profit_{t+1} = \beta_0 + \beta_1(DJC + \Delta DJC) + \beta_2(DJC + \Delta DJC)^2 + \beta_3(PRCP + \Delta PRCP) + \beta_4(PRCP + \Delta PRCP)^2 \quad (5.2)$$

La différence est donc égale à :

$$\Delta Profit = \beta_1 \Delta DJC + \beta_2(2 * DJC * \Delta DJC + (\Delta DJC)^2) + \beta_3 \Delta PRCP + \beta_4(2 * PRCP * \Delta PRCP + (\Delta PRCP)^2) \quad (5.3)$$

En remplaçant les coefficients par les coefficients estimés<sup>2</sup>, cela nous donne un impact de - 10,80 \$ par acre de culture. Si nous supposons que la ferme est de 730 acres (la ferme moyenne en 2005), l'effet total sur le profit de l'agriculteur est de - 7 887 \$ (soit - 36 %). Cette estimation est très sensible aux variations de l'accumulation de chaleur tout en restant toujours négative. Par exemple, si nous disons que l'augmentation est plutôt de 1 500 DJC, l'impact grimpe à - 18 790 \$ (- 85%), soit près du triple. Nous voyons donc, à l'aide de cet exemple simpliste, que l'agriculteur typique canadien peut sembler vulnérable aux changements climatiques qui affecteront directement ses profits<sup>3</sup>. D'ailleurs, l'analyse au niveau national et provincial reflètera cette réalité.

2. Pour cet exemple, nous employons les coefficients de l'estimation à l'aide des données interpolées par centroids qui étaient plus significatifs que ceux à l'aide des moyennes.

3. Par contre, les régions au nord affichant des DJC initiaux bas (moins de 700 DJC) sont généralement affectées positivement par les changements du climat

## 5.1 Estimation Nationale

Le tableau 5.2 présente les premiers estimés de l'impact des changements climatiques sur l'agriculture canadienne à l'aide du modèle à effets fixes développé par Deschênes et Greenstone (2007). Nous pouvons tirer quelques conclusions à partir de ces résultats. D'abord, les résultats de nos estimations sont tous négatifs, mais présentent des écarts-types trop larges pour conclure que l'impact est significativement différent de zéro.

Ensuite, la méthode d'interpolation choisie semble jouer un rôle déterminant dans l'ampleur de l'impact estimé, les résultats employant la méthode d'interpolation par centroids étant nettement plus pessimistes. L'explication de cette disparité réside potentiellement dans une particularité des limites géographiques de notre population. Intuitivement, la méthode d'interpolation ne devrait pas modifier énormément la valeur associée au climat lorsqu'une division de recensement est petite, le centre de la division présentant un climat similaire au reste du territoire de la division de recensement et donc à la moyenne. Par contre, lorsque les divisions de recensement sont grandes comme dans les Prairies par exemple, où on dénombre moins de 20 divisions de recensement par province, le climat moyen peut s'écarter du climat du centre de la division. Nous croyons, pour plusieurs raisons, que l'estimation qui utilise les données climatiques issues de l'interpolation par centroids reflèterait mieux le climat d'une région de manière générale. Premièrement, pour les divisions de recensement au nord qui sont habituellement très grandes mais où l'agriculture est souvent concentrée au sud de la division, le centroid, bien qu'elle soit une mesure imparfaite, s'approchera plus du climat du sud de la division que la moyenne. Deuxièmement, les coefficients estimés à partir de la base de données utilisant les centroids semblent être mieux identifiés que ceux issus des données moyennes. Finalement, de manière générale le modèle centroids explique une plus grande proportion des variations du profit agricole ( $R^2$  est plus grand). Conséquemment, nous focaliserons donc sur les résultats employant les données des centroids. Toutefois, les résultats issus de l'estimation à

TABLE 5.2 – Estimations de l'impact des changements climatiques sur l'agriculture

Spécification	<i>Impact Annuel Total (M\$ de 2002)</i>			
	CGCM2		HADLEY 3	
	(1)	(2)	(1)	(2)
1. PRCP, DJC	-2 236 (2 698) [- 40,7 %]	- 642 (2 876) [- 11,7 %]	- 2 296 (2 769) [- 41,8 %]	- 667 (2 944) [- 12,2 %]
2. PRCP, DJC + 5 mesures de variabilité	-1 708 (2 835) [- 31,1 %]	- 393 (2 937) [- 7,16 %]	- 1 618 (3 046) [- 29,5 %]	- 106 (3 065) [- 1,93 %]
3. PRCP, DJC + 3 mesures de variabilité + longueur SC + temp. moyenne année et SC	- 2 458 (2 703) [- 44,8 %]	- 188 (2 845) [- 3,43%]	- 2 546 (2 800) [- 46,4 %]	- 56 (2 955) [- 1,02 %]
4. PRCP, DJC + 3 mesures de variabilité + longueur SC	- 2 321 (2 741) [- 42,3 %]	- 637 (2 856) [- 11,61 %]	- 2 352 (2 869) [- 42,9 %]	- 628 (2 945) [- 11,44 %]
5. PRCP, DJC + 3 mesures de variabilité + longueur et temp. moyenne SC	- 2 606 (2 743) [- 47,5 %]	- 88 (2 857) [- 1,6 %]	- 2 809 (2 862) [- 51,2 %]	151 (2 954) [+ 2,75 %]
Centroids	X		X	
Moyenne	X		X	

Notes : Toutes les estimations sont en millions de dollars de 2002. Les chiffres entre parenthèses affichent les écarts-types corrigés pour la présence potentielle d'hétéroscédasticité, tandis que les chiffres entre crochets sont la variation en pourcentage du profit agricole canadien suite aux changements climatiques (le profit de référence étant la moyenne des profits de 1990, 1995, 2000 et 2005 soit 5,488 milliards de dollars). Dans la colonne (1), on présente les résultats de l'estimation qui emploie les données climatiques issues des centroids tandis que dans l'estimation de la colonne (2) on utilise celles construites à l'aide des moyennes.

l'aide des données moyennes sont également présentés pour que le lecteur puisse se faire une idée de la méthode d'interpolation qu'il croit être la plus apte à caractériser le climat d'une division de recensement donnée.

Toutes nos estimations faites à l'aide de la base de données construite à l'aide des centroids présentent un impact négatif dans un intervalle allant de - 51,2 % à - 29,5 %. Encore un fois, aucune des estimations n'est significativement différente de zéro au niveau de confiance usuel (95 %). Ensuite, le scénario de changements climatiques utilisé ne semble pas être un facteur déterminant de l'ampleur de l'impact estimé: De plus, l'introduction de variables explicatives supplémentaires ne change pas énormément l'estimation du modèle. Cependant, l'impact négatif augmente légèrement en rajoutant des mesures de variabilité. Cela supposerait donc que l'instabilité climatique a un impact négatif sur le rendement des cultures.

Pour avoir une image visuelle de l'impact, nous avons construit des cartes montrant en termes de pourcentage du profit annuel<sup>4</sup> l'impact des changements climatiques sur chacune des divisions de recensement au Canada. En imageant sur carte l'impact sur chacune des divisions de recensement, il est possible de dégager certaines tendances régionales de l'impact.

D'abord, nous voyons se dessiner un impact favorable pour les régions au nord du pays. L'agriculture de celle-ci étant grandement limitée par un climat nordique, un réchauffement des températures ne peut que rendre les conditions de culture que moins hostiles.

Également, dans les quatre cartes présentées, nous voyons que la région agricole du sud des Prairies est fortement affectée par les variations du climat. Ces résultats sont particulièrement troublants lorsque l'on pense que les Prairies ont été fortement affectées par les sécheresses de 2001-2002 qui se serait traduite par des baisses de profits de l'ordre de 932 millions en 2001 et 2 037 millions pour 2002 (Wheaton *et al.*, 2005). Ces craintes sont amplifiées par le fait que la plupart des MCG prévoient

---

4. Le profit de référence est la moyenne du profit de nos quatre années d'observation.

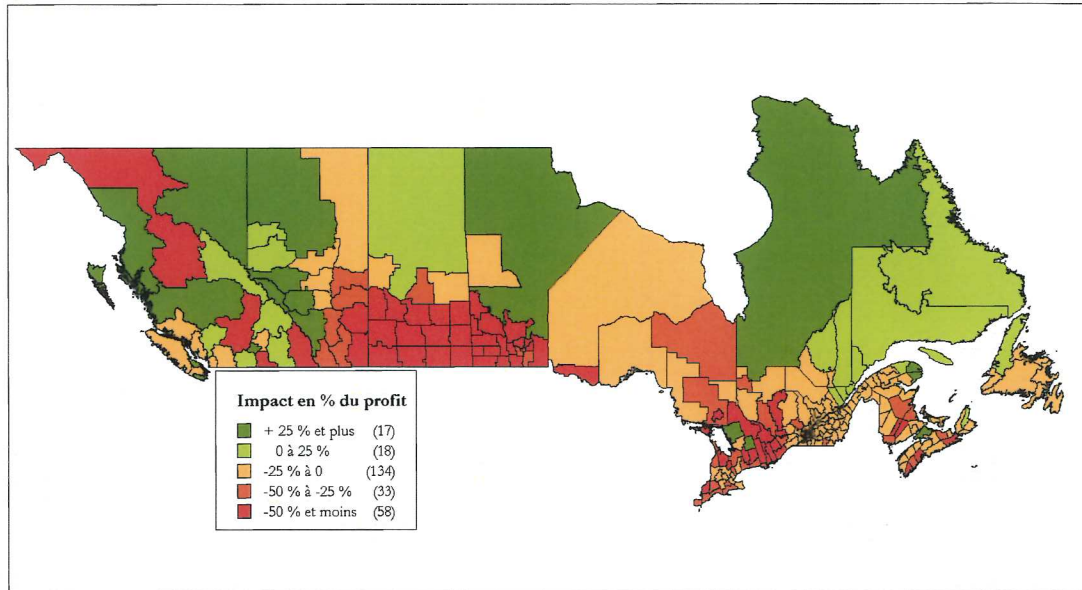


FIGURE 5.1 – Carte régionale (centroids) - Spécification 1 (CGCM)

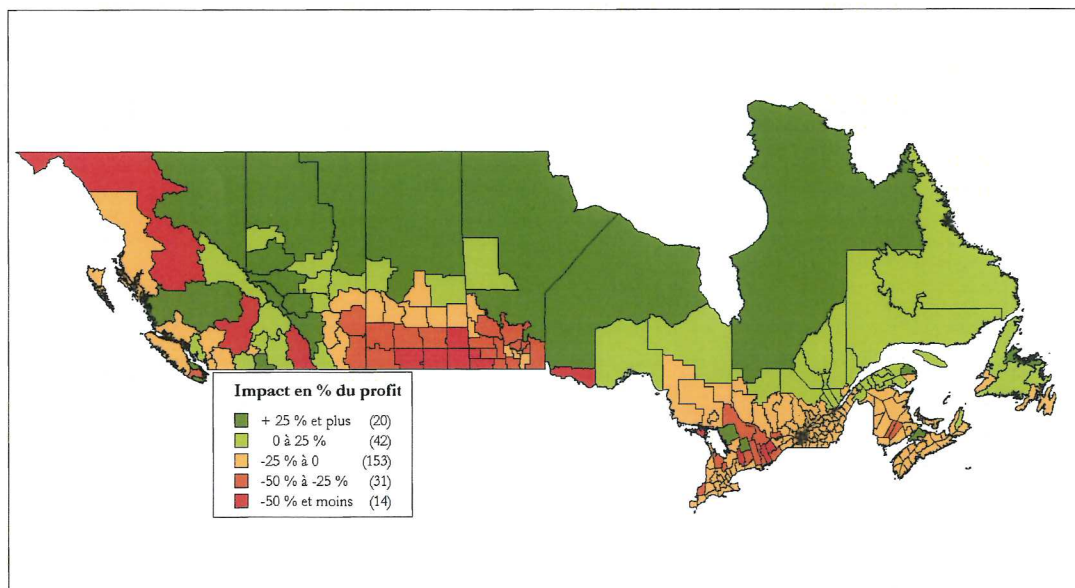


FIGURE 5.2 – Carte régionale (moyenne) - Spécification 1 (CGCM)

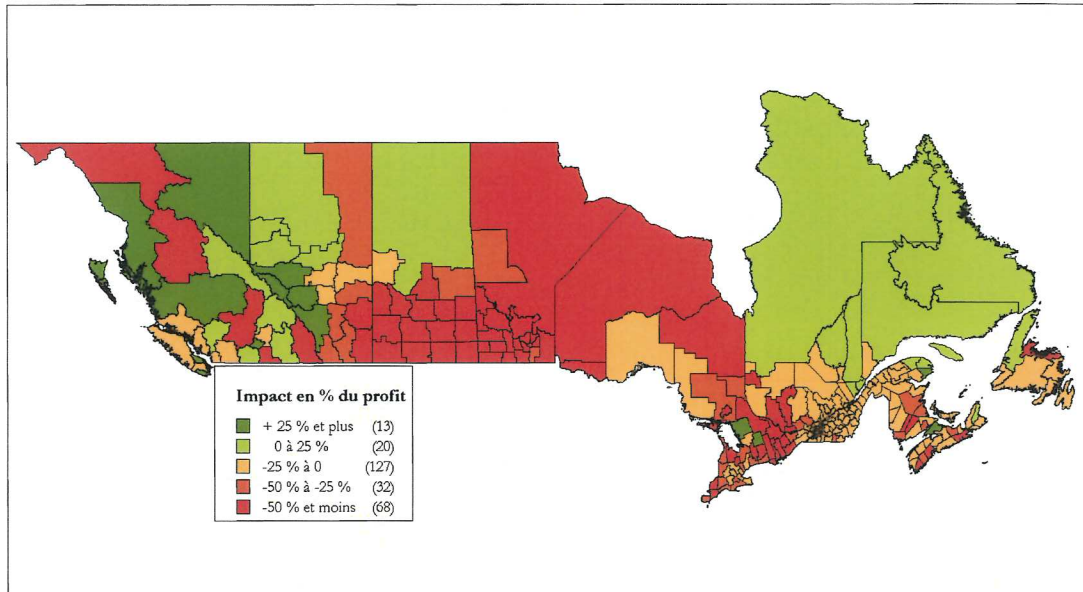


FIGURE 5.3 – Carte régionale (centroids) - Spécification 5 (CGCM)

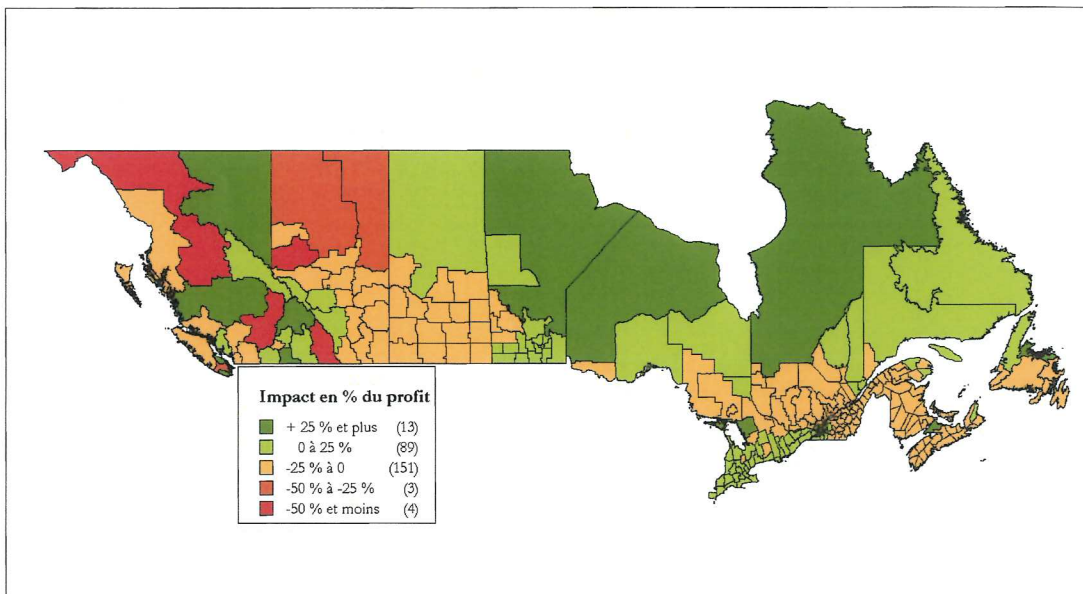


FIGURE 5.4 – Carte régionale (moyenne) - Spécification 5 (CGCM)

une augmentation du déficit en eau en été pour les régions continentales intérieures (comme les Prairies) associée à un risque plus élevé de sécheresse (Watson *et al.*, 2001). En fait, on prévoit que des sécheresses comme celles de 2001 et 2002 pourraient avoir lieu plus fréquemment et prendre une plus grande ampleur (Wheaton *et al.*, 2007). Ainsi, malgré que nos estimations ne soit pas significativement différentes de zéro et qu'il faille interpréter avec prudence nos résultats, les chiffres des sécheresses de 2001 et 2002 laissent croire que l'impact estimé pourrait être réaliste et que l'agriculture canadienne est potentiellement plus vulnérable aux changements climatiques que prévue.

## 5.2 Estimation Régionale

Les grands écarts-types associés à nos estimations nationales semblent cacher un problème dans notre base de données. Comment se fait-il que l'impact soit si grand et que tout de même on ne puisse pas le distinguer significativement de zéro ? L'estimation régionale nous permet de mieux saisir la déficience qui afflige nos données et d'identifier plus précisément les sources de variabilité. Nous avons donc estimé le modèle séparément pour les cinq grandes régions du Canada (Maritimes, Québec, Ontario, Prairies, Colombie-Britannique).

Dans le tableau 5.3, nous montrons l'estimation régionale faite à partir de notre spécification préférée soit celle qui incorpore des mesures de variabilité du climat ainsi que la longueur de la saison de culture. L'estimation régionale de l'impact de changements climatiques sur l'agriculture révèle des résultats intrigants. D'abord, les estimations pour l'Ontario, la Colombie-Britannique et le Québec deviennent significativement différentes de zéro (au seuil de confiance 90 %) alors que celles des Prairies et des Maritimes sont toujours soumises à une grande variabilité. Comme nous en avons discuté précédemment, les divisions de recensement dans les Prairies sont

grandes<sup>5</sup>, ce qui pourrait faire en sorte de masquer la variabilité du profit au niveau micro. Il semble donc de plus en plus évident que la taille trop grande des divisions de recensement dans les Prairies nous empêche d'estimer avec précision l'impact dans le grenier de blé du Canada. Ce problème expliquerait également l'imprécision de nos estimations nationales étant donné la place importante que prend l'agriculture des Prairies dans l'agriculture totale canadienne. À l'opposé, au Québec et en Ontario, les divisions de recensement où il y a une forte intensité de production agricole sont beaucoup plus petites permettant une variabilité des données plus riche et donc une identification des coefficients plus précise.

TABLE 5.3 – Estimation régionale préférée de l'impact (modèle à effets fixes)

Régions/province	Centroids		Moyenne	
	Impacts	Écart-types	Impacts	Écart-types
Maritimes	-85,5727	222,6876	-93,4313	321,6274
Québec	-349,4605	194,5443	-209,6126	231,0907
Ontario	2 449,149	892,9669	2 694,292	851,6118
Prairies	-2 790,586	3 058,083	-2 625,065	3 713,155
C-B	-1 056,292	325,7489	-1 454,447	526,6446
<b>Total</b>	<b>-1 832,763</b>	<b>4 236,61</b>	<b>-1 688,264</b>	<b>4 436,808</b>

*Notes : Toutes les estimations sont en millions de dollars de 2002. Les écart-types sont corrigés pour la présence potentielle d'hétéroscédasticité.*

Au niveau de l'impact, l'Ontario sort grande gagnante suite aux changements du climat. On pourrait supposer que l'allongement de la saison de culture combinée à un climat plus chaud, mais également plus humide, venant contrebalancer le déficit hydrique des cultures, permet aux agriculteurs ontariens de cultiver des plants à plus grande valeur ajoutée (comme des arbres fruitiers par exemple). Pour le Québec et la Colombie-Britannique une dégradation des conditions agricoles devraient faire chuter

5. C'est également le cas dans les Maritimes bien que dans une moindre mesure.

les profits agricoles suite aux changements du climat. La même chose devraient se produire dans les Prairies et les provinces maritimes, toutefois on ne peut pas distinguer statistiquement cet impact de zéro. Au total, l'agriculture canadienne devrait connaître une baisse importante de ces revenus (-1 833 millions de dollars soit - 33 %). Ces résultats sont donc drastiquement à l'opposé de ce que les deux études canadiennes employant l'approche Ricardienne ont trouvé (Reinsborough, 2003 ; Weber et Hauer, 2003).

Comment expliquer une telle différence dans les résultats ? Weber et Hauer (2003) dressent déjà quelques pistes de réponse quant à la surestimation de l'approche Ricardienne. En premier lieu, en supposant que l'ensemble des stratégies d'adaptation seront possibles dans l'avenir, on oublie de tenir en compte des effets collatéraux des changements climatiques sur les intrants agricoles (Shlenker *et al.*, 2007)<sup>6</sup>. Ensuite, il est possible que le biais potentiel causé par le problème de spécification biaise l'estimation Ricardienne vers le haut. De plus, les travaux de Weber et Hauer ainsi que Reinsborough font abstraction de la variabilité du climat et qui selon nos estimations contribue à affecter négativement le profit agricole canadien. Finalement, ces différences importantes avec les résultats des études précédentes pourraient également être dues aux scénarios de prévisions employés et à l'horizon de prévision. Tandis que Grant et Hauer (2003) ainsi que Reinsborough (2003) s'intéressent à l'effet du climat dans l'horizon 2021-2050, notre horizon de prévision est à plus long terme (2071-2100). Nous avons également utilisé la famille de scénarios A2 qui n'est pas nécessairement celle utilisée par les autres recherches. C'est peut-être pourquoi, les résultats des deux autres études sont beaucoup moins alarmants. Il faut donc interpréter nos résultats comme reflétant la borne inférieure de l'impact des changements climatiques sur l'agriculture canadienne d'autant plus que notre prise en compte de l'adaptation est limitée aux stratégies de court terme.

---

6. Pensons simplement à une détérioration de la qualité des sols ou une raréfaction des ressources en eau.

### 5.3 Limites de l'étude

L'évaluation économique de l'impact des changements climatiques pose de nombreuses difficultés qui imposent des limites à l'interprétation des résultats. D'abord parce que l'horizon de prévision est extrêmement éloigné (2071-2100) et qu'une incertitude temporelle et régionale entoure les scénarios de prévisions de changements climatiques (Tol, 2002). Ces prévisions basées sur l'hypothèse d'un doublement de la concentration de CO<sub>2</sub> sont donc encore aujourd'hui controversées. Les critiques font état notamment de l'inefficacité des météorologues à prévoir le climat de demain ou d'après-demain et se questionnent donc sur leur capacité à prévoir le climat dans 10, 20, 50 ou 100 ans (Zyrkowski, 2008).

Également comme nous en avons discuté précédemment, la modélisation parfaite n'existe malheureusement pas à ce jour. Il faut donc s'assurer de comprendre en quoi ces imperfections de modélisations affectent l'estimation finale et se questionner constamment sur des moyens d'améliorer la méthodologie existante.

#### 5.3.1 Fertilisation au CO<sub>2</sub>

La fertilisation au CO<sub>2</sub> est, tout comme dans l'approche Ricardienne, ignorée par la modélisation du modèle à effets fixes. Selon Schlenker, Hanemann et Fisher (2006), il est vrai qu'une atmosphère enrichie au CO<sub>2</sub> pourrait contribuer à compenser les effets néfastes des changements climatiques sur l'agriculture (Reilly, 2002). Dans un tel cas, notre estimation serait nécessairement biaisée vers le bas. Pourtant, certaines études concluent qu'un gain en quantité causé par une hausse des rendements se ferait au détriment de la qualité et donc que la valeur nutritionnelle des cultures s'en verrait réduite (Jablonski, Wang et Curtis, 2002). De plus, il semble être supposé que lorsque la concentration dépasse les 550 ppm, soit le double de la concentration préindustrielle, les effets bénéfiques de la fertilisation au CO<sub>2</sub> sont minimes, voire inexistants. Ainsi, à l'heure actuelle il est difficile de se prononcer sur l'effet net d'une concentration

accrue de gaz carbonique sur l'activité agricole et l'omission d'un tel phénomène ne pose pas de problème majeur dans la mesure où son influence est encore débattue.

### 5.3.2 Manque de variabilité dans les données

Une autre critique de Schlenker (2007) concerne le lissage temporel du revenu des agriculteurs dans le temps à l'aide du stockage. En effet, l'agriculteur peut accumuler des stocks lors des années plus productives et les écouler lors des années moins productives. Cette stabilisation des revenus est accrue au Canada par des programmes d'assurances agricoles gouvernementales qui viennent en aide aux fermiers soumis à des conditions financières désavantageuses causées par le climat ou tout autre facteur hors de leur contrôle. Conséquemment, l'effet du climat sur les profits agricoles est « camouflé » par cette stabilisation temporelle du revenu de l'agriculteur ce qui réduit le pouvoir explicatif de notre modèle et complique l'estimation.

Le manque de variabilité des réalisations annuelles du climat est une autre problématique qui affecte nos données. Alors que l'on prévoit des augmentations de près de 75 % du nombre de DJC, aucune division de recensement n'a connu, à l'intérieur de nos années d'étude des chocs thermiques d'une telle ampleur. Le tableau 5.4 présente

TABLE 5.4 – Variation du climat observé pour les années 1990-1995-2000-2005

**Proportion des DR avec des DJC au-dessus/en dessous de la moyenne (degrés)**

±25	±50	±75	±100	±125	±150
,474	,167	,078	,036	,007	,002

**Proportion des DR avec des précipitations au-dessus/en dessous de la moyenne (mm)**

±25	±50	±75	±100	±125	±150
,724	,472	,289	,162	,101	,067

les variations dans les DJC et les précipitations.

On voit clairement qu'au niveau de l'accumulation de chaleur, après avoir enlevé le choc commun à toutes les divisions d'une même province une même année très peu de division ont connu des variations de plus de 150 DJC (0,2 %). Ce chiffre est pourtant très petit comparativement aux changements allant parfois jusqu'à 1500 DJC de plus dans les scénarios de prévisions. Pour ce qui est des précipitations, la situation est beaucoup moins problématique alors que la majeure partie des DR ont connu des variations substantielles des précipitations au courant de la saison de culture comparables à celles prévues dans les divers scénarios de prévisions.

## Chapitre 6

### Conclusions

Depuis la constatation par la communauté scientifique du phénomène de changements climatiques, un désir grandissant de comprendre les effets du nouvel environnement sur les activités humaines a favorisé l'écllosion d'une littérature d'impact abondante. Le secteur agricole est un des secteurs où la recherche sur l'effet du climat est la plus poussée et où la quantification de l'impact est la plus documentée. Pourtant, notre manque de compréhension, entourant notamment l'effet du climat sur la croissance et le développement des plantes, rend l'estimation très difficile. En fait, malgré l'avancement certain des méthodologies, aucun modèle à ce jour n'a réussi à capter parfaitement la complexité du phénomène de manière empirique. C'est d'ailleurs pourquoi une réponse consensuelle fait actuellement défaut.

Certes, l'approche fonction de production gagne à modéliser une réponse biologique très réaliste en s'appuyant sur l'expérimentation, mais à quel coût ? De par sa nature même, l'approche fonction de production met de côté le rôle fondamental de l'agriculteur rationnel.

L'approche Ricardienne a, quant à elle, réussi à redonner à l'agriculteur le rôle qui lui revient en modélisant de manière ingénieuse l'adaptation agricole. Cette méthodologie en coupe transversale a pourtant d'importants problèmes de spécification qui apposent un bémol sur l'interprétation de ces prévisions. En omettant de contrôler

pour certaines variables (tels que la qualité des sols ou la présence d'un microclimat) qui influencent le climat, l'estimation de la relation entre le climat et l'agriculture s'en voit biaisée. D'autres limitations, moins fondamentales, nous forcent à voir l'approche Ricardienne comme la borne supérieure de l'impact des changements climatiques.

Jusqu'à récemment, la littérature canadienne avait peu évalué l'impact économique des changements climatiques sur l'agriculture, particulièrement avant 2003. En fait, avant la publication de la recherche de Reinsborough (2003), toutes les études entreprises s'appuyaient essentiellement sur une approche fonction de production et s'intéressaient à l'effet du nouveau climat sur le rendement des cultures plutôt qu'à un impact chiffré. Ce trou béant dans la littérature fut comblé partiellement par l'étude de Weber et Hauer (2003) qui améliorèrent le modèle Ricardien de Reinsborough (2003). Dans les deux cas, les auteurs trouvèrent un impact positif sur l'agriculture canadienne, en ligne avec l'idée que l'on se fait de l'impact des changements climatiques sur l'agriculture pour un pays nordique. Toutefois, en remettant en question la capacité de l'approche Ricardienne d'estimer adéquatement l'impact des changements climatiques, les travaux de Greenstone et Deschênes (2006) ouvrirent une brèche dans l'analyse de l'impact au Canada.

Cette recherche s'inscrit donc dans ce désir d'améliorer nos connaissances sur l'impact des changements climatiques sur l'agriculture dans un contexte canadien. En s'appuyant sur une méthodologie novatrice jamais employée au Canada et en prenant assise sur la construction d'une base de données de panel, cette étude jette un regard nouveau sur l'effet du climat sur l'agriculture au Canada. D'abord en corrigeant la principale faille de l'approche Ricardienne, ensuite en s'intéressant à une modélisation plus complexe du lien qui unit climat et croissance biophysique des cultures et finalement en introduisant un agriculteur partiellement rationnel. Les résultats présentés dans cette recherche posent donc les bases d'une meilleure compréhension de l'impact des changements climatiques sur l'agriculture canadienne.

Les résultats, radicalement à l'opposé de ce que la littérature canadienne a prévu

jusqu'à maintenant, remet en question l'effet réel des changements climatiques sur l'agriculture canadienne. Globalement, le profit annuel des agriculteurs canadiens pourrait chuter de plus de 50 %. Toutefois, une hétérogénéité régionale importante caractérise nos estimations. En fait, les estimations régionales dressent un portrait favorable pour l'agriculture ontarienne, seule gagnante dans le nouveau climat. L'ensemble des autres provinces se voit négativement affecté par le changement futur du climat. Les principaux perdants étant les Prairies qui seront soumises à un temps plus chaud sans une compensation hydrique suffisante, augmentant ainsi les probabilités de sécheresses dans cette région déjà vulnérable au stress d'humidité. Quant au Québec, à la Colombie-Britannique et aux Maritimes, ces provinces verront tous leurs profits agricoles chutés suite aux changements climatiques dans l'horizon 2071-2100.

Ces prévisions doivent par contre être interprétées de manière prudente. D'abord comme nous en avons discuté, l'utilisation des divisions de recensement au lieu des subdivisions de recensement comme unité d'observation a fortement réduit l'intervariabilité au sein de notre population et par le fait même la qualité de l'estimation particulièrement dans les Prairies. Également, la variabilité interannuelle du climat qu'ont connue les divisions étant très faible, particulièrement par rapport à l'accumulation de chaleur, nuit considérablement à l'estimation claire de la relation. Les recherches futures devront donc s'adresser plus particulièrement aux limites dans les données. Finalement, une meilleure compréhension des phénomènes d'adaptation agricole et de fertilisation au CO<sub>2</sub> devrait orienter les prochaines études et permettrait l'amélioration de la modélisation de la réponse des cultures face au climat.

Et donc, malgré certaines limitations méthodologiques, principalement en lien avec la qualité des données, cette recherche a réussi à jeter un regard nouveau sur la problématique de changements climatiques au Canada et a mis à l'avant-plan les effets néfastes potentiels du nouveau climat sur les profits agricoles. Reste à voir comment le milieu politique et les agriculteurs canadiens répondront à un des plus grands défis environnementaux de l'histoire.

## Bibliographie

- Adams, R.**, “Global Climate Change and Agriculture : An Economic Perspective,” *American Journal of Agricultural Economics*, 1989, 71 (5), 1272–1279.
- and **B. McCarl**, “Implications of Global Climate Change for Western Agriculture,” *Western Journal of Agriculture Economics*, 1988, 13 (2), 348–356.
- , — , **K. Segerson, C. Rosenzweig, K.J. Bryant, B.L. Dixon, R. Conner, R.E. Evenson, and D. Ojima**, *The Impact of Climate Change on the United States Economy*, Cambridge, New York, and Melbourne : Cambridge University Press, 1999.
- , **C. Rosenzweig, R. Pearl, J. Ritchie, B. McCarl, D. Glycer, B. Curry, J. Jones, K. Boote, and H. Allen**, “Global Climate Change and U.S. Agriculture,” *Nature*, 1990, 345 (6272), 219–224.
- , **R. Fleming, B. McCarl, and C. Rosenzweig**, “A Reassessment of the Economic Effects of Climate Change on US Agriculture,” *Climatic Change*, 1995, 30, 147–167.
- Agriculture et agroalimentaire Canada**, “All about Canada’s agri-food industry,” Technical Report 2000.
- André, P. and C. Bryant**, “Les producteurs agricoles face aux changements climatiques : Une évaluation des stratégies d’investissement des producteurs de la Montérégie-ouest (Québec),” *Rapport de recherche pour le fonds d’Action sur les changements climatiques du Canada*, 2001.

- Arthur, L.M. and G.C. Van Kooten, "Climate Impacts on the Agribusiness Sectors of a Prairie Economy," *Prairie Forum*, 1992, 17, 97-109.
- Belliveau, S., B. Bradshaw, B. Smit, S. Reid, D. Ramsey, and M. Taretton, "Farm-level Adaptations to Multiple Risks : Climate Change and Other Concerns," *University of Guelph, Department of Geography*, 2006, *Occasional Paper No.27*.
- Bosello, F. and J. Zhang, "Climate Change Impacts : Agriculture," *Fondazione Eni Enrico Mattei : Working Papers*, 2005, 94.
- Brklacich, M. and B. Smit, "Implications of Changes in Climatic Averages and Variability on Food Production Opportunities in Ontario, Canada," *Climatic Change*, 1992, 20, 1-21.
- , C. Bryant, B. Veenhof, and A. Beauchesne, *The Canada Country Study : Climate Impacts and Adaptation*, Toronto : Environnement Canada, 1998.
- Brohan, P., J.J. Kennedy, I. Harris, S.F.B. Tett, and P.D. Jones, "Uncertainty Estimates in Regional and Global Observed Temperatures Changes : a New Dataset from 1850," *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111 (D12).
- Church, J. A. and N. J. White, "A 20th Century Acceleration in Global Sea-level Rise," *Geophysical Research Letters*, 2006, 33 (L01602).
- Cline, W. R., "The Impact of Global Warming on Agriculture : Comment," *American Economic Review*, 1996, 86 (5), 1309-1311.
- Darwin, R., "A Farmers View of the Ricardian Approach to Measuring Agricultural Effects of Climate Change," *Climatic Change*, 1999, 41, 371-411.
- , M. Tsigas, J. Lewandrowski, and A. Ranases, *World Agriculture and Climate Change : Economic Adaptations Agricultural Economic Report*, Washington, DC : Departement of Agriculture, 1995.

- Deschênes, O. and M. Greenstone**, "The Economic Impacts of Climate Change : Evidence from Agricultural Profits and Random Fluctuations in Weather," *American Economic Review*, 2007, 97 (1), 354–385.
- Easterling, W. E.**, "Adapting North American Agriculture to Climate Change in Review," *Agricultural and forest meteorology*, 1996, 80 (1), 1–53.
- Fischer, G., K. Frohberg, M.L. Parry, and C. Rosenzweig**, "Climate Change and World Food Supply, Demand and Trade : Who Benefits, Who Loses?," *Global Environmental Change*, 1994, 4 (1), 7.
- Gouvernement du Canada**, *Climate Change Impacts and Adaptation : A Canadian Perspective* 2004.
- Green, W. H.**, *Econometric Analysis - 6th Edition*, Upper Saddle River : Pearson Prentice Hall, 2007.
- Hansen, J., M. Sato, R. Ruedy, K. Lo, D. W. Lea, and M. Medina-Elizade**, "Global Temperature Change," *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2006, 103, 14288–14293.
- Intergovernmental Panel on Climate Change**, *Climate Change 2001 : The Scientific Basis. Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, United Kingdom and New York : Cambridge University Press, 2001.
- , "www.ipcc.ch," consulté le 18 septembre 2008.
- Jablonski, L. M., X. Wang, and P. S. Curtis**, "Plant Reproduction under Elevated CO<sub>2</sub> Conditions : A Meta-Analysis of reports on 79 Crop and Wild Species," *New Phytologist*, 2002, 156, 2–26.
- Jones, A. C., J.R. Kiniry, and P.T. Dyke**, *CERES-Maize : a Simulation Model of Maize Growth and Development*, College Station : Texas A&M University Press, 1986.

- Jones, J.W., K.J. Boote, S.S. Jagtap, G. Hoogenboom, and G.G. Wilkerson, "SOYGRO V.5.41 : Soybean Crop Growth Simulation Model. User's Guide," *Florida Agr. Exp. Sta.*, 1988, *Journal No. 8304*, IFAS (Gainesville, FL : University of Florida).
- Lewandrowski, J. and D. Schimmelpfennig, "Economic Implications of Climate Change for U.S. Agriculture," *Land Economics*, 1999, *75*, 39–57.
- McCarl, B. A., C.C. Chang, J.D. Atwood, and W.I. Nayda, "Documentation of ASM : The U.S. Agricultural Sector Model," *Unpublished Report*, 1993, *Texas A&M University*.
- McGinn, S.M., A. Toure, O.O. Akinremi, D.J. Major, and A.G. Barr, "Agro-climate and Crop Response to Climate Change in Alberta, Canada," *Outlook on Agriculture*, 1999, *38* (1), 51–86.
- McKenney, D., D. Price, P. Papadapol, M. Siltanen, and K. Lawrence, "High-resolution Climate Change Scenarios for North America," *Canadian Forestry Service*, 2006, *Technical Note No. 107*.
- , P. Papadapol, K. Campbell, K. Lawrence, and M. Hutchinson, "Modèles spatiaux des températures minimales et maximales, des précipitations totales et de paramètres bioclimatiques dérivés pour le Canada et l'Amérique du Nord, pour la période 1971-2000," *Service Canadien des Forêts*, 2005, *Note Technique Num 106*.
- McKenney, D. W., J. H. Pedlar, P. Papadapol, and M. F. Hutchinson, "The Development of 1901-2000 Historical Monthly Climate Models for Canada and the United States," *Agricultural and forest meteorology*, 2006, *138*, 69–81.
- Meadows, D.H., D.L. Meadows, J. Randers, and W.W. III Behrens, *Limits to Growth*, New York : New American Library, 1972.
- Mearns, L., C. Rosenzweig, and R. Goldberg, "Mean and Variance Change in Climate Scenarios : Methods, Agricultural Applications, and Measure of Uncertainty," *Climatic Change*, 1997, *35*, 367–396.

- Mehdi, B. B., "Coping with the Impacts of Climate Change on Water Resources : A Canadian Experience," *World Ressource Review*, 2006, 18 (1), 231–252.
- Mendelsohn, R., A. Basist, A. Dinar, P. Kurukulasuriya, and C. Williams, "What Explains Agricultural Performance : Climate Normals or Climate Variance?," *Climatic Change*, 2007, pp. 85–99.
- and A. Dinar, "Climate, Water, and Agriculture," *Land Economics*, 2003, 79 (3), 328–341.
- and W. D. Nordhaus, "The Impact of Global Warming on Agriculture : Reply," *American Economic Review*, 1996, 86 (5), 1312–1315.
- , — , and D. Shaw, "The Impact of Global Warming on Agriculture : A Ricardian Analysis," *American Economic Review*, 1994, 84 (4), 753–771.
- , — , and — , "Climate Impacts on Aggregate Farm Value : Accounting for Adaptation," *Agricultural and Forest Meteorology*, 1996, 80, 55–66.
- , — , and — , *The Impact of Climate Change on the United States Economy*, Cambridge : Cambridge University Press, 1999.
- on Climate Change, Intergovernmental Panel, *Climate Change 2007 :The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, United Kingdom and New York : Cambridge University Press, 2007.
- Reilly, J. and N. Hohmann, "Climate Change and Agriculture : The Role of International Trade," *American Economic Review*, 1993, 83 (2), 306–312.
- Reilly, J. M., "Agriculture : The Potential Consequences of Climate Variability and Change for the United States," *Cambridge University Press*, 2002.
- Reinsborough, M. J., "A Ricardian Model of Climate Change in Canada," *Canadian Journal of Economics*, 2003, 36, 21–40.
- Ressources Naturelles Canada, "http ://scf.rncan.gc.ca/soussite/cfgl-climat/seedgrow," 2008.

- Ritchie, J.T. and S. Otter, *ARS Wheat Yield Project*, Vol. ARS-38, Washington, DC : Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1985.
- Rosenzweig, C. and M. L. Parry, "Potential Impact of Climate Change on World Food Supply," *Nature*, 1994, 367 (6459), 133–138.
- Schlenker, W., A. C. Fisher, M. Hanemann, and M. Roberts, "Potential Impacts of Climate Change on Crop Yields and Land Values in U.S. Agriculture : Negative, Significant and Robust," 2007, *Unpublished Working Paper*.
- , W. M. Hanemann, and A. C. Fisher, "Will U.S. Agriculture Really Benefit from Global Warming? Accounting for Irrigation in the Hedonic Approach," *American Economic Review*, 2005, 95 (1), 395–406.
- , —, and —, "The Impact of Global Warming on U.S. Agriculture : An Econometric Analysis of Optimal Growing Conditions," *The Review of Economics and Statistics*, 2006, 88 (1), 113–125.
- Segerson, K. and B.L. Dixon, *The Impact of Climate Change on the United States Economy*, Cambridge : Cambridge University Press, 1999.
- Singh, B. and J.-P. Brassard, "Impacts of Climate Change and CO<sub>2</sub> Increase on Agricultural Production and Adaptation Options for Southern Québec, Canada," *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2008, 13, 241–265.
- , M. El Maayar, P. André, C.R. Bryant, and J-P. Thouez, "Impacts of a GHG-Induced Climate Change on Crop Yields : Effects of Acceleration in Maturation, Moisture Stress and Optimal Temperature," *Climatic Change*, 1998, 38, 51–86.
- Skinner, M.W., B. Smit, A.H. Dolan, B. Bradshaw, and C.R. Bryant, "Adaptation to Climate Change in Agriculture : Evaluation of Options," *University of Guelph, Department of Geography*, 2001, *Occasional Paper 26*, 36.
- Smit, B. and M. Brklacich, "Implications of Global Warming for Agriculture in Ontario," *The Canadian Geographer*, 1992, 36, 75–78.

- and R. McLeman, "Vulnerability to Climate Change Hazards and Risks : Crop and Flood Insurance," *The Canadian Geographer*, 2006, 50 (2), 217–226.
- , D. McNabb, and J. Smithers, "Agricultural Adaptation to Climatic Variation," *Climatic Change*, 1996, 33, 7–29.
- , M. Brklacich, R. Stewart, R. McBride, M. Brown, and D. Bond, "Sensitivity of Crops Yields and Land Resource Potential to Climatic Change in Ontario, Canada," *Climatic Change*, 1989, 14, 153–174.
- Statistique Canada, "Recensement de l'agriculture," 1986, *Ottawa*.
- , "Recensement de l'agriculture," 1991, *Ottawa*.
- , "Recensement de l'agriculture," 1996, *Ottawa*.
- , "Recensement de l'agriculture," 2001, *Ottawa*.
- , "Recensement de l'agriculture," 2006, *Ottawa*.
- , "http ://www.statcan.ca," 2008.
- Stern, N., *The Economics of Climate Change : The Stern Review*, United Kingdom : Cambridge University Press, 2007.
- Tol, R. S. J., "Estimates of the Damage Costs of Climate Change. Part 1 : Benchmark Estimates," *Environmental and Resource Economics*, 2002, 21 (1), 47–73.
- , S. Frankhauser, R. G. Richels, and J. B. Smith, "How Much Damage Will Climate Change Do ? Recent Estimates," *World Economics*, 2000, 1 (4).
- Watson, R.T., D.L. Albritton, T. Barker, I.A. Bashmakov, O. Canziani, R. Christ, U. Cubasch, O. Davidson, H. Gitay, D. Griggs, J. Houghton, J. House, Z. Kundzewicz, M. Lal, N. Leary, C. Magadza, J.J. McCarthy, J.F.B. Mitchell, J.R. Moreira, M. Munasinghe, I. Noble, R. Pachauri, B. Pittock, M. Prather, R.G. Richels, J.B. Robinson, J. Sathaye, S. Schneider, R. Scholes, T. Stocker, N. Sundararaman, R. Swart, T. Taniguchi, , and D. Zhou, *Climate Change 2001 : Synthesis Report. Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] Contribution*

*of Working Groups I, II, III to the Third Assessment Report*, UK : Cambridge University Press, Cambridge, 2001.

**Weber, M. and G. Hauer**, “A Regional Analysis of Climate Change Impacts on Canadian Agriculture,” *Canadian Public Policy*, 2003, 29 (2), 163–180.

**Wheaton, E., G. Koshida, B. Bonsal, T. Johnston, W. Richards, and V. Wittrock**, “Agricultural adaptation to drought (ADA) in Canada : The case of 2001-2002,” *Prepared for Government of Canada’s Climate Change Impacts and Adaptation Program*, 2007.

— , **V. Wittrock, S. Kulshreshtha, G. Koshida, C. Grant, A. Chipanshi, and B. Bonsal**, *Leçons tirées des années de sécheresse 2001 et 2002 au Canada*. Publication SRC 11602-46E03, Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2005.

**Zyrkowski, J.**, *It’s the sun, not your SUV : CO<sub>2</sub> Won’t destroy the Earth*, St. Augustine’s Press, 2008.

# Annexe A

## Liste des variables climatiques utilisées

1. **Température annuelle moyenne** - Moyenne de toutes les températures hebdomadaires moyennes.
2. **Température moyenne de la saison de culture**
3. **Précipitations totales de la saison de culture**
4. **Degrés-jours de croissance de la saison de culture** - La température de base utilisée est de 5°C.
5. **Longueur de la saison de culture**
6. **Amplitude de la température de la saison de culture**
7. **Amplitude quotidienne moyenne** (moyenne (max - min de la période)) - Moyenne de toutes les amplitudes hebdomadaires de la température. L'amplitude hebdomadaire est la différence entre les températures maximale et minimale d'une semaine donnée.
8. **Isothermalité** - Amplitude quotidienne moyenne divisée par l'amplitude annuelle de la température

9. **Saisonnalité de la température** - Coefficient de variation (C.V.) des températures, ou écart-type des températures hebdomadaires moyennes, en termes de pourcentage de la moyenne annuelle de ces températures. Cette moyenne est exprimée en degrés Kelvin, afin d'éviter le risque de division par zéro, mais on obtient ainsi un C.V. dont la valeur est généralement très basse.
10. **Saisonnalité des précipitations**- Coefficient de variation (C.V.) des précipitations, ou écart-type des précipitations estimatives hebdomadaires, en termes de pourcentage de la moyenne annuelle de ces estimations.