

RAPPORT FINAL

**Première évaluation de l'impact potentiel des changements
climatiques sur la durabilité technico-économique et
agroenvironnementale des fermes laitières au Québec**

Par Édith Charbonneau, agr., Ph. D., U. Laval

Juan Manuel Moreno Prado, U. Laval
Doris Pellerin, agr., Ph. D., U. Laval
Gilles Bélanger, D. Sc., AAC
Hélène Côté, M. Sc., Ouranos
Valérie Bélanger, Ph. D., Réseau Innovagrains
Diane Parent, Ph. D., U. Laval
Guy Allard, agr., Ph. D., U. Laval
René Audet, M. Sc., AAC
Diane Chaumont, M. Sc., Ouranos

À

Ouranos inc.

Juillet 2013

*Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas
Ouranos ni ses membres.*



Table des matières

1. Introduction	2
2. Contexte / objectifs	2
3. Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature.....	4
3.1 Impacts potentiels sur les sols, les cultures, l'eau et l'énergie	5
3.2 Impacts potentiels sur le troupeau laitier	7
3.3 Impacts socio-économiques	8
4. Méthodologie / données.....	15
4.1 Détermination du cadre de l'étude, des données de base et des régions	17
4.2 Indices agroclimatiques pour les conditions climatiques courantes et futures.....	20
4.3 Établissement des répercussions potentielles des changements climatiques sur les rendements des cultures et la valeur nutritive des fourrages	25
4.4 Intégration au niveau de la ferme de l'impact des changements climatiques avec le modèle N-CYCLES.	29
5. Résultats.....	31
5.1 L'impact des changements climatiques sur les indices agroclimatiques	31
5.2 L'impact potentiel des changements climatiques sur les rendements des cultures et la valeur nutritive des fourrages	33
5.3 L'impact potentiel des changements climatiques sur la durabilité économique et environnementale des fermes laitières.....	34
6. Analyse et discussion	38
6.1 Analyse des résultats de la première évaluation des répercussions technico-économiques et environnementales des changements climatiques sur les fermes laitières québécoises	38
6.2 Retour sur les connaissances actuelles portant sur la capacité d'adaptation des fermes	40
7. Conclusion et recommandations	41
8. Références	43
Annexes.....	51

1. Introduction

La production laitière occupe une place importante en agroalimentaire au Québec. Elle obtient d'ailleurs près du tiers des recettes monétaires agricoles de la province. Malgré le dynamisme de ses producteurs et la force économique du secteur, le nombre de fermes laitières au Québec est en décroissance. Cette réalité démontre le besoin d'un questionnement quant à la durabilité des fermes. Cette dernière regroupe en général trois grandes catégories soit, les durabilités technico-économique, environnementale et sociale. Pour être durable, une ferme doit présenter des composantes de durabilité dans chacune de ces catégories. Le changement des conditions climatiques et le besoin d'une adaptation pour faire face à cette nouvelle réalité pourraient amplifier des problématiques de durabilité sur les fermes.

Dans un contexte où les changements climatiques apparaissent incontournables, il incombe aux producteurs laitiers de pouvoir s'y préparer adéquatement. Toutefois, l'impact potentiel des changements climatiques sur ce type de fermes est encore peu documenté. Il apparaît donc essentiel d'approfondir ces connaissances de manière à mieux outiller les producteurs pour faire face à ces changements inévitables. C'est dans ce contexte qu'une première évaluation des répercussions potentielles des changements climatiques sur la durabilité technico-économique et environnementale des fermes laitières du Québec a été réalisée.

Ainsi, il importe de mieux comprendre le contexte de diminution du nombre de fermes laitières au Québec et les connaissances pertinentes sur l'impact potentiel des changements climatiques qui existaient lors de l'élaboration de cette étude, et qui ont amené le choix des objectifs de travail. Ensuite, une exploration de la littérature permet dans un premier temps de prendre connaissance de l'information existante sur les principales répercussions envisageables provenant des modifications climatiques dans les différentes activités retrouvées sur les fermes laitières. Puis, de toucher brièvement les connaissances actuelles sur la capacité d'adaptation aux changements climatiques des producteurs laitiers québécois. Il sera ainsi possible de situer les connaissances qui ont influencé les choix effectués tout au long du projet de recherche. Par la suite, la méthodologie de recherche expose chacune des étapes réalisées dans le cadre du projet, de la sélection d'indices agroclimatiques au choix des simulations de fermes effectuées, en passant par la méthode utilisée pour les projections de rendements et les coûts supplémentaires qui sont attribuables aux changements climatiques. Les résultats et l'analyse qui en découle montrent l'importance que les changements climatiques auront sur les résultats des fermes laitières dans le futur. L'analyse des répercussions sur la ferme dans sa globalité est essentielle pour bien comprendre les interactions entre ses différents sous-systèmes et ainsi mesurer adéquatement les impacts des changements climatiques. Finalement, en plus de récapituler les résultats de cette étude, la conclusion permettra d'ouvrir sur les suites qui semblent incontournables à ce projet.

2. Contexte / objectifs

La production laitière est la production agricole la plus importante au Québec avec 29 % des recettes monétaires totales (Fédération des producteurs de lait du Québec (FPLQ), 2010). Par ailleurs, la production de plantes fourragères, dont 63 % est utilisée en production laitière, occupe près de 50 % des superficies cultivées au Québec (Statistique Canada, 2006). Malgré la force économique du secteur, le nombre de fermes laitières au Québec est en constante diminution depuis 25 ans, étant passé de 17 571 à 6452 entreprises durant cette période

(FPLQ, 2010). Soucieux de cette problématique, les membres de la FPLQ ont initié une large réflexion sur l'avenir du secteur laitier québécois en 2007. Ils ont alors exprimé leur volonté ferme que dans l'avenir "le secteur laitier québécois sera centré sur des fermes présentes dans toutes les régions du Québec et dont le nombre aura cessé de décroître... et pourra vanter les mérites du lait « écologique » québécois dont la production se fera selon des méthodes de production... ..respectueuses de l'environnement" (FPLQ, 2007). Dans ce contexte, des indicateurs de durabilité ont été développés dans le but de permettre aux producteurs laitiers d'ici de cibler les points à améliorer sur la ferme et ainsi, maximiser les chances de pérennité de leur entreprise. Ces indicateurs sont regroupés dans la Méthode DELTA (Bélanger et al., 2009). Les indicateurs développés ne prennent toutefois pas en considération les variations potentielles associées aux changements climatiques. Or, on peut présumer que ces changements auront un impact important sur la gestion des fermes.

Des études sur l'impact des changements climatiques sur les fermes ont été menées ici (Bryant et al., 2007) et ailleurs dans le monde (Groupe interministériel de la République française, 2010), elles ne s'appliquent toutefois pas directement à la durabilité des fermes laitières dans le contexte québécois. Pour ce qui est de la capacité d'adaptation des producteurs agricoles, le sujet a aussi déjà été abordé au Québec (Bryant et al., 2007; Levallois et al., 2009), mais jamais dans le contexte des changements climatiques sur les fermes laitières. Des recherches récentes portant sur la capacité d'adaptation des producteurs agricoles effectuées dans des contextes différents du nôtre comme celui du Manitoba (Tarleton et Ramsey, 2008), du Royaume-Uni (Wreford et Adger, 2010) et de l'Australie (Hogan et al., 2011), le manque d'information dans le contexte québécois démontrent l'importance d'investiguer ce sujet. Une revue plus exhaustive de ce qui a été fait dans le monde et l'élaboration de lien avec la situation québécoise permet d'établir le besoin pour une étude plus poussée sur la capacité d'adaptation des producteurs laitiers québécois aux changements climatiques. En plus, ces connaissances seront essentielles à la formulation d'hypothèses de travail sur l'impact potentiel des changements climatiques sur les fermes laitières québécoises.

Plusieurs recherches ont été réalisées ailleurs dans le monde sur les répercussions potentielles des changements climatiques sur les plantes fourragères (Urban, 2003; Finger et al., 2010; Thorsen et Hoglind, 2010) et sur les animaux (Nardone et al., 2010; Wolfe, 2012) utilisés en production laitière. Au Québec, des recherches ont aussi été menées sur les cultures généralement présentes sur les fermes laitières (Bélanger et Bootsma, 2002; Bélanger et al., 2002; Bertrand et al., 2007). Les résultats de ces études montrent que les changements climatiques pourraient présenter à la fois des opportunités et de nouveaux défis pour les cultures de plantes fourragères, de maïs et de soya. Sachant que ces plantes font parties intégrantes des rotations présentes sur les fermes laitières, des répercussions sont donc à prévoir sur ces entreprises. Les différents sous-systèmes (cultures en champs, troupeau, etc.) des fermes laitières s'influencent mutuellement. Pour quantifier l'impact des modifications apportées par les changements climatiques sur une entreprise laitière, il est essentiel de la considérer comme un tout. Ainsi, l'utilisation d'un modèle permettant une évaluation holistique de la répercussion des changements climatiques sur une ferme laitière moyenne, considérée comme une seule unité de décision, permet une analyse plus adaptée à la situation. Un tel modèle est présentement disponible dans le contexte du Québec et permettra d'obtenir des résultats pertinents au niveau de la ferme.

La présente étude vise à faire une première évaluation de l'impact potentiel des changements climatiques sur la durabilité économique et environnementale des fermes laitières

québécoises. Son objectif général est d'améliorer les connaissances de base sur la capacité d'adaptation des producteurs agricoles et sur l'impact potentiel des changements climatiques sur la durabilité des fermes laitières québécoises.

Les objectifs spécifiques sont de:

- 1) Déterminer le niveau actuel des connaissances d'ici et d'ailleurs sur la capacité d'adaptation des producteurs laitiers aux changements climatiques et sur l'impact potentiel des changements climatiques sur la durabilité des fermes laitières québécoises;
- 2) Faire un premier portrait de l'impact potentiel des changements climatiques sur les résultats économiques et environnementaux des fermes laitières québécoises et plus précisément de :
 - 2.1 Déterminer l'impact potentiel des changements climatiques sur la rentabilité des fermes laitières du Québec;
 - 2.2 Déterminer l'impact potentiel des changements climatiques sur la balance en azote (N) et en phosphore (P) sur les fermes laitières du Québec;
 - 2.3 Estimer l'impact potentiel des changements climatiques sur la production de gaz à effet de serre (GES) produits sur les fermes laitières québécoises.

3. Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature

Dans le cadre de ce projet, une revue de littérature plus générale a été réalisée. Les lignes qui suivent reflètent une partie de ce travail. La littérature utilisée spécifiquement pour le volet de modélisation sera abordé dans la section 4.

Les projections climatiques récentes indiquent qu'à l'horizon 2050, le climat de l'ensemble du territoire québécois se réchauffera de façon plus marquée en hiver qu'en été (Christensen et al., 2007; Plummer et al., 2006). Selon Ouranos, le Québec peut s'attendre à plusieurs changements dans les moyennes saisonnières de température et de précipitations pour la période 2041-2070 (horizon 2050) par rapport aux moyennes saisonnières de la période 1961-1990 (Ouranos, 2010). Ces changements attendus proviennent de modèles climatiques globaux qui tiennent compte des scénarios d'évolution des gaz à effet de serre (GES) A1B, A2 et B1 issus du Special Report on Emissions Scenarios (SRES) (Nakićenovič et Swart, 2000). En général, il est attendu que les changements climatiques seront plus importants au nord de la province qu'au sud. Le sud de la province (zone située au sud du 50^e parallèle), abritant le Québec agricole, sera toutefois également touché. Plus spécifiquement, les températures moyennes hivernales augmenteraient de l'ordre de 2,5 à 3,8°C, dans le sud du Québec. Durant l'été, les augmentations seraient de 1,9 à 3,0°C. Toujours pour cette région, à l'horizon 2050, les précipitations moyennes hivernales augmenteraient d'environ 8,6 à 18,1 %. Par rapport à 1961-1990, l'accumulation de neige au sud de la province serait moindre en raison de l'augmentation de la température et du raccourcissement de la saison froide. En été, on estime qu'il n'y aura pas de changement significatif dans la quantité des précipitations moyennes au sud de la province. En effet, les projections estivales de précipitations ont un haut degré d'incertitude dû au fait que le Québec agricole se trouve dans une zone de transition entre un régime typique des régions plus au sud dominé par l'évaporation et un régime, plus au nord, où les précipitations augmentent en raison de la plus grande quantité d'eau que pourra contenir une atmosphère plus chaude. Puisque les modèles climatiques ne positionnent pas tous cette transition exactement au même endroit, leurs projections se répartissent entre des augmentations, des diminutions ou peu de changement

dans les moyennes estivales de précipitations. Plusieurs aspects plus spécifiques à l'agriculture ont été développés dans le cadre de l'Atlas agroclimatique du Québec (2012) et seront traités plus en profondeur dans les sections suivantes.

En plus des modifications aux moyennes de température, il est à noter que pour le sud du Québec, les projections climatiques laissent présager une modification dans les extrêmes de température (Ouranos, 2010). Ainsi, bien que les maximum quotidiens de température varieraient peu en hiver, les minimum pourraient être moins froids, ce qui entrainera une diminution de la variabilité saisonnière des températures quotidiennes hivernales. Pour l'été, c'est plutôt une augmentation de la variabilité saisonnière qui serait attendue puisque les projections climatiques prévoient peu de modification des minimums quotidiens alors que les maximum augmenteront ce qui causera un élargissement de la distribution des températures quotidiennes estivales.

Les changements climatiques anticipés sur le Québec devraient à la fois avoir des impacts positifs et négatifs sur l'agriculture en général et en particulier sur la production laitière québécoise. Notamment sur le système de production (eau, sol, plantes, animaux, gestion) et sur les aspects socio-économiques du secteur.

3.1 Impacts potentiels sur les sols, les cultures, l'eau et l'énergie

Les changements climatiques anticipés à l'horizon 2050 pourraient accentuer des phénomènes tels que le ruissellement, l'érosion des sols et la lixiviation des nutriments, ainsi que la fréquence des cycles de gel et de dégel en hiver (Paustian et al., 1998; Bullock et al., 2001; Ouranos, 2010). Ces phénomènes, lorsqu'ils coïncident avec des événements météorologiques extrêmes dont l'intensité et la fréquence sont aussi appelées à changer (ex. grêle, orages violents), pourraient avoir des répercussions majeures sur la qualité (ex. la teneur en carbone) et la productivité des sols agricoles québécois ainsi que sur la qualité de l'eau. La vulnérabilité des sols agricoles à l'érosion par l'eau est tributaire notamment de l'occupation agricole du territoire, de l'intensité mais aussi de la forme des précipitations (ratio pluie/neige) de même qu'à la date et à la durée de la fonte des neiges, car ce moment est propice à l'érosion des sols et à la lixiviation des nutriments (Nearing et al., 2004; Beaudet et al., 2008). Les producteurs agricoles jouent un rôle important dans la conservation des sols et des ressources en eau, en utilisant des pratiques et en effectuant des choix de gestion appropriés. Les fermes laitières connaissent toutefois un avantage à ce niveau puisque le besoin en fourrages pour l'alimentation des troupeaux favorise l'utilisation de plantes pérennes dans les rotations (CPVQ, 2000) et de pratiques de culture reconnues pour une meilleure conservation des sols.

Par ailleurs, les conditions climatiques anticipées au Québec à l'horizon 2050 pourraient accroître le potentiel agronomique de certaines cultures ou permettre l'exploitation de nouvelles espèces. Elles pourraient aussi favoriser l'utilisation d'hybrides et de cultivars plus tardifs. Par exemple, le rendement du maïs vers 2069 pourrait être accru de 54 à 70 % selon la région (Bélanger et Bootsma, 2002) et la hausse des températures permettrait l'introduction de cultures de maïs et de soya dans des régions présentement trop fraîches pour obtenir des rendements satisfaisants de ces cultures. L'augmentation des degrés-jours de croissance permettrait d'obtenir une coupe supplémentaire des plantes fourragères pérennes, laissant envisager une hausse des rendements de l'ordre de 2 à 5 T/ha. Nous pourrions observer un décalage temporel dans les stades phénologiques des espèces végétales, tel que pressenti

en France (Sérès, 2010). L'augmentation de la température et du CO₂ atmosphérique pourrait entraîner des changements dans la composition taxinomique retrouvée dans les champs, comme par exemple l'invasion de mauvaises herbes. Aussi, cela pourrait causer une diminution de la teneur en protéines des plantes et des grains, ainsi qu'une baisse de la digestibilité de la fibre des fourrages et donc, mener à la réduction de sa valeur nutritive (Bertrand et al., 2008, Antle, 2009). Le potentiel agronomique pour d'autres cultures, comme le blé, l'orge, l'avoine et le seigle serait toutefois moins favorisé par les changements climatiques (Ouranos, 2010).

Les conditions climatiques hivernales anticipées à l'horizon 2050 auront des impacts, qui seront pour certains positifs et pour d'autres négatifs. Si on ne s'en tient qu'au nombre de degrés-froid ($T < -15^{\circ}\text{C}$), qui devrait diminuer dans toutes les régions agricoles du Québec, on pourrait s'attendre à une survie accrue des plantes pérennes qui constituent environ 40 % des surfaces cultivées en 2007 (Institut de la statistique du Québec et MAPAQ, 2012). Par contre, des automnes plus chauds (endurcissement incomplet dans certaines régions), des périodes de dégel (risque de désendurcissement), des épisodes pendant lesquels la couverture de neige devient inférieure à 10 cm (risque de gel) ainsi qu'une hausse des pluies durant l'hiver (risque d'anoxie des racines, dommages physiques) augmenteraient les risques de mortalité des plantes fourragères pérennes (Bélangier et al., 2002). Ces risques seraient modulés, dans les prochaines décennies, par des changements dans la variabilité climatique ainsi que dans la fréquence et l'intensité des divers événements extrêmes en plus des changements anticipés dans les normales. Cela posera de sérieux défis au secteur agroalimentaire.

Plusieurs autres facteurs, qu'ils soient liés ou non aux changements climatiques pourront influencer les rendements ainsi que la valeur nutritive de certaines plantes : réchauffement asymétrique des températures minimales et maximales (jour/nuit), teneur en CO₂ atmosphérique, mauvaises herbes, insectes, maladies, ozone, rayonnements UV-B, sélection d'espèces, perfectionnement des technologies (Wolfe, 2012). Par exemple, une augmentation de la teneur atmosphérique en CO₂ aurait pour effet d'augmenter chez les plantes leur taux de photosynthèse, leur rendement, leur ratio C:N ainsi que leurs composés de défense à base de carbone (Patterson et al., 1999; Hatfield et al., 2008). Toutefois, l'effet de l'augmentation du CO₂ atmosphérique variera selon l'ampleur de celle-ci, le type de plante, le stade de croissance ainsi que la disponibilité en eau et en azote (Fraisie et al., 2009). Les plantes en C3 (la plupart des plantes cultivées) seraient avantagées par rapport aux plantes en C4, comme le maïs, puisqu'elles sont davantage limitées en CO₂ (Seguin, 2007; Gagnon et al., 2011). L'augmentation du CO₂ atmosphérique pourrait donc non seulement augmenter le rendement de certaines espèces cultivées mais également, favoriser le développement des mauvaises herbes puisque neuf des 15 espèces les plus problématiques en Amérique du Nord sont de type C3 (Fuhrer, 2003; Fraisie et al., 2009; Lepage et al., 2011). Les changements climatiques anticipés conjugués à l'augmentation du CO₂ atmosphérique pourraient également modifier les interactions importantes qui ont cours entre les plantes et les pollinisateurs, les insectes ravageurs, les maladies et les mauvaises herbes (Wolfe, 2012).

Les changements climatiques anticipés auront probablement des effets sur le développement d'agents pathogènes et d'insectes (Ouranos, 2010; Fraisie et al., 2009). On pourrait voir l'apparition de nouveaux ravageurs ou de nouvelles maladies ou encore l'accroissement de la pression déjà présente, selon la région, l'ampleur et la forme des changements climatiques anticipés ainsi que le type d'agriculture (Sérès, 2010). L'efficacité de certains traitements des mauvaises herbes, des insectes et des pathogènes pourrait être diminuée avec l'augmentation du CO₂ atmosphérique ou encore des températures, ce qui pourrait engendrer

des coûts supplémentaires ainsi qu'un impact environnemental non négligeable, notamment sur les espèces non visées et sur la qualité de l'eau (Ouranos, 2010; Gagnon et al., 2011). Tous les facteurs présentés précédemment constituent des facteurs de stress dont la combinaison, en simultané ou successive, occasionne des dommages aux cultures, dommages qui peuvent être immédiats ou qui peuvent rendre les végétaux davantage vulnérables aux maladies et aux autres ravageurs (Ouranos, 2010).

Une concurrence pour les terres agricoles ainsi que pour l'eau douce pourrait s'intensifier en raison d'un futur changement climatique, amplifiée par d'autres motivations comme la sécurité énergétique par la production de biocarburant ainsi que la recherche de nouveaux revenus alternatifs pour les ménages agricoles (Thornton, 2010). Le Québec et le Canada ne devraient pas y échapper. Les changements climatiques anticipés devraient également se répercuter sur la consommation énergétique du secteur agricole (Nagy, 2012). Ce changement de consommation sera fonction notamment de la quantité d'intrants, i.e. d'engrais et de pesticides, et de travail du sol qui sera requise pour la production des cultures qui auront cours au fil de l'évolution climatique.

3.2 Impacts potentiels sur le troupeau laitier

Le principal impact attendu des changements climatiques sur l'industrie laitière au Québec concerne l'alimentation des troupeaux. Les changements climatiques anticipés pourraient avoir un impact sur la disponibilité et le coût des aliments, sur la composition taxinomique et la valeur nutritive des plantes offertes qui pourrait diminuer (Bertrand et al., 2008; Nardone et al., 2010; Wolfe, 2012). La disponibilité en eau pour la production de cultures au Québec ne devrait pas poser de problèmes à court terme (Mailhot et al., 2008) à l'opposé d'autres provinces canadiennes (provinces de l'Ouest notamment) ou d'autres pays dans le monde. Par contre, l'industrie laitière est une grande consommatrice d'eau lorsqu'elle est considérée dans son ensemble, incluant l'abreuvement des animaux et l'eau pour le nettoyage des laiteries. Dans un contexte de rareté mondiale, il pourrait devenir important, d'un point de vue d'acceptabilité sociale, de considérer l'enjeu de l'eau en production laitière dans un futur proche (Conseil des académies canadiennes, 2013).

Les changements climatiques anticipés à l'horizon 2050 pourraient avoir des impacts non négligeables sur les troupeaux. En effet, l'augmentation de la température devrait affecter directement les troupeaux durant les périodes de canicule ($T > 30^{\circ}\text{C}$) où le gradient de température entre le jour et la nuit est le plus faible et le facteur humidex le plus élevé. Le nombre de jours par année présentant une température maximale supérieure à 30°C varie d'une région à l'autre du Québec. Par exemple, ce nombre est présentement de 9-10 jours en moyenne (1979-2008) dans la région de Montréal, de trois jours dans la région du Centre-du-Québec, alors qu'il est de 1,7 jour dans la région du Bas-St-Laurent (Atlas agroclimatique du Québec, 2012). Sur l'horizon 2050, ce nombre de jours dont la température est supérieure à 30°C pourrait augmenter de façon importante selon les scénarios employés dans le cadre de l'étude précédente, et ce, sans tenir compte du pourcentage d'humidité. Ceci pourrait affecter la productivité, la santé et la reproduction du bétail (Antle, 2009; Nardone et al., 2010; Wolfe, 2012, Hammami et al., 2013).

À un pourcentage d'humidité dépassant les 80 %, la vache laitière commence à ressentir un stress thermique à partir de 21°C environ et le stress ressenti s'intensifie avec l'augmentation de la température (Wolfe, 2012). Lorsque des conditions de températures et d'humidités

élevées sont maintenues pendant plusieurs jours, elles peuvent affecter la santé (ex. mammites; Hammami et al., 2013) et la reproduction de l'animal. Pour cette dernière, Jordan (2003) rapporte une diminution de la durée et de l'intensité de l'œstrus, et un moins bon développement des follicules et des embryons lors de conditions de stress thermique chez la vache laitière. Ce même auteur rapporte que le stress thermique affecte les performances de reproduction de 42 jours avant jusqu'à 40 jours après l'insémination de la vache. Une telle fenêtre de vulnérabilité aux stress thermiques (82 jours) multiplie le nombre de vaches dans un même troupeau pouvant subir les effets négatifs sur sa reproduction d'un épisode de chaleur.

Les stress thermiques ont aussi des impacts sur l'efficacité d'utilisation des nutriments (Chase, 2005) et sur les performances laitières (Hammami et al. 2013). Par exemple, dans une étude Hammami et al. (2013) ont utilisé 230 192 données de lactations pour évaluer l'effet du stress thermique sur la production et la composition du lait. Ils ont de plus évalué différents indicateurs thermiques combinant minimalement la température et l'humidité (indice de température-humidité [THI], THI ajusté, *heat load index* [HLI], *equivalent temperature index* [ETI], *environmental stress index* [ESI], *comprehensive climate index* [CCI]). Ils ont observé une variation dans l'intensité de la réponse entre une situation de stress thermique faible, modérée ou extrême, mais dans tous les cas une baisse des performances animales était observée. Pour une unité d'augmentation dans les indicateurs thermiques, une diminution de la quantité de lait produite par vache variant entre 0,109 à 0,955 kg/jour était observable. Pour la production de gras, la baisse était de 0,051 à 0,095 kg/jour et pour la protéine 0,013 à 0,062 kg/jour pour chaque augmentation d'une unité dans les indicateurs thermiques. D'autres facteurs peuvent également moduler le stress thermique subi par le bétail comme l'espèce, la taille, le type d'étable et ses caractéristiques (ventilation, changement d'air, densité animale, disponibilité en eau) ainsi que l'utilisation de techniques pour maintenir des conditions propices comme la brumisation et la ventilation (Rötter et Van de Geijn, 1999).

Les changements climatiques anticipés constituent également un facteur indirect qui peut contribuer à la prolifération d'organismes pathogènes tels que les bactéries et les moisissures, affectant divers organes, la réponse immunitaire ainsi que le taux de croissance des jeunes animaux (Nardone et al., 2010). La modification notamment du régime alimentaire, des techniques de rafraîchissement et d'aménagement de la ferme permettra aux vaches laitières élevées au Québec de mieux supporter les périodes de canicule qui pourront survenir avec les changements climatiques anticipés.

3.3 Impacts socio-économiques

Impacts économiques

Les changements climatiques affecteront à long terme l'agriculture de plusieurs façons (Thornton et al., 2009; Heltberg et al., 2010; Nardone et al., 2010). Par exemple, d'éventuelles modifications dans l'intensité, la durée et la fréquence de certains événements météorologiques extrêmes auraient des répercussions importantes sur les opérations culturales et leur planification tout en affectant la capacité des producteurs à gérer ces risques. Certains de ces événements météorologiques, dont la prévisibilité n'est que de quelques heures, complique la gestion des opérations culturales et peuvent exercer une pression supplémentaire sur des systèmes agricoles déjà fragiles. Par ailleurs, on devrait observer un déplacement des zones climatiques, ce qui nécessitera une adaptation de la part

des agriculteurs et, dans certains cas (ex. monoculture du maïs), pourrait menacer la biodiversité. De plus, la présence d'insectes ravageurs, de maladies des cultures et de mycotoxines pourraient s'intensifier avec le réchauffement climatique et l'augmentation de l'utilisation de la monoculture (FAO, 2008; Gagnon et al., 2011).

Les conditions climatiques ont également des impacts économiques importants dans d'autres pays comme en Australie, où les producteurs laitiers de certaines régions ont vu récemment leurs revenus plonger de façon importante et leurs dettes augmenter à cause d'une grave sécheresse (Tostovrsnik et al., 2011). En Nouvelle-Zélande, les producteurs laitiers sont confrontés à un environnement commercial de plus en plus turbulent, qui présente des risques pour leur survie (International Food and Agribusiness Management Association, 2011). En Suisse, on s'attend à ce que les événements météorologiques extrêmes accentuent les fluctuations des prix sur les marchés agricoles, lesquels pourraient se faire sentir jusqu'au niveau local compte tenu de l'interconnectivité des marchés (OFAG, 2011). En effet, la sécheresse de juin 2012 aux États-Unis a affecté environ 53 % du territoire (Midwest et Ouest), 26 états dont 14 touchés de façon exceptionnelle, et a provoqué de fortes hausses du prix notamment ceux du maïs, du blé et du soja (Cypel, 2012; El Wantan, 2012).

Au Canada, les répercussions économiques potentielles des changements climatiques sur la production laitière sont difficiles à prédire puisque leur évaluation provient de l'utilisation de différents outils tels que les modèles climatiques, cultureux et économiques qui engendrent une cascade d'incertitudes (Ressources naturelles Canada, 2007; Antle, 2009;). Ceci expliquerait ainsi la grande variabilité des évaluations des répercussions économiques des changements climatiques anticipés. Dans les conditions canadiennes et sans tenir compte des événements extrêmes, un léger réchauffement serait bénéfique sur le plan économique pour l'agriculture (Adams et al., 1999). Par contre, les résultats économiques globaux pourraient être moins intéressants si on les combine à des événements météorologiques plus intenses (grêle, orage, etc.).

Au Québec, mis à part les données présentées dans les sous-sections précédentes qui traitaient de l'accroissement de la productivité des plantes ou le déplacement de certaines cultures en fonction des changements climatiques, il y a très peu de données concernant les impacts socio-économiques et organisationnels potentiels sur l'agriculture ou sur la production laitière dus à ces changements climatiques. Une analyse a, d'autre part, été menée à partir des données de la Financière Agricole du Québec afin de documenter les impacts financiers de la variabilité et des changements climatiques pour la période 1986 à 2003, ainsi que la vulnérabilité de trois régions du Québec (Bryant et al., 2007). Cette étude a été menée dans les régions du Sud-Ouest (SO) du Québec (Montréal), du Centre-du-Québec (CDQ) ainsi que du Saguenay-Lac-St-Jean-Côte-Nord. Chaque région comprenait une ferme moyenne de grandes cultures (grains) ainsi qu'une ferme laitière. Les résultats indiquent que la région du SO du Québec présente l'avantage le plus important en rapport avec les conditions climatiques futures. Ce même rapport indique que dans le futur, la région CDQ augmenterait sa dépendance aux indemnités d'assurances alors qu'elle diminuerait dans la région SO (Montréal). D'autre part, toujours selon cette étude, l'impact potentiel des changements climatiques serait plus prononcé pour les fermes de grandes cultures que dans le cas des fermes laitières.

L'analyse de données plus générales laisse également penser que la production laitière au Québec possède les outils pour se préparer adéquatement à faire face aux changements climatiques. La ferme québécoise est de taille relativement modeste en comparaison aux entreprises laitières retrouvées dans les autres provinces canadiennes. La production de la

province représente toutefois 37 % des recettes monétaires provenant de ce secteur d'activité au pays (CCIL, 2012). Le modèle de fermes familiales est celui qui prévaut dans la province et c'est celui qui est privilégié par la Fédération des producteurs de lait du Québec (FPLQ, 2007). Au cours des dernières décennies, les producteurs québécois se sont adaptés à un contexte changeant et ils ont su notamment composer avec des avancées technologiques importantes qui ont permis d'augmenter la productivité de leurs fermes. Des gains d'efficacité ont permis aux exploitations laitières québécoises d'augmenter leur production tout en réduisant la taille globale du cheptel. Durant la période 2004 à 2011, le nombre de vaches laitières a diminué de 7,3 %, alors que la production de lait a augmenté de 0,2 % (Commission canadienne du lait, 2013). Le système de gestion de l'offre a incité les producteurs à améliorer l'utilisation des ressources, contribuant à l'amélioration de la rentabilité des fermes ainsi que de leur durabilité (ÉcoRessources, 2011). En plus, la stabilité des revenus de la production laitière permet aux producteurs de planifier à plus long terme le capital, la main-d'œuvre ainsi que la réalisation d'investissements dans la production et les infrastructures (ÉcoRessources, 2011).

La capacité de la production laitière québécoise à faire face au changement sera également fonction de son capital et de son endettement. De 2001 à 2010, les actifs des fermes d'élevage bovin et de production laitière se sont accrus de 58 % au Québec, pour s'établir à un peu plus de 2,6M \$, alors qu'ils ont augmenté de 91,2 % en Ontario, pour atteindre un peu plus de 4M \$ (Statistique Canada, 2012). Par ailleurs, le taux d'endettement des fermes québécoises de bovins laitiers et de production laitière est passé de 24,0 % en 2001 à 30,5 % en 2010, alors qu'en Ontario, l'endettement est passé de 18,6 % à 24,0 % et celle de l'ensemble des producteurs canadiens de 21,9 % à 27,4 %. Ce taux d'endettement est pour certains passablement élevé, ce qui pourrait limiter la capacité d'adaptation des producteurs (Nolet, 2005; Levallois et al., 2009).

La capacité potentielle d'adaptation des producteurs laitiers québécois face aux changements futurs dépendra notamment de l'exploitant, des ressources, de la compétitivité de l'entreprise laitière, de la filière ainsi que du contexte socio-économique, notamment celui des marchés.

Impacts sociaux

Si on définit la capacité d'adaptation comme étant la capacité d'ajustement aux effets des variations climatiques, il n'y a pas que les ajustements du système agricole qui soient une finalité mais aussi, sinon plus, l'amélioration de la qualité de vie des agriculteurs et leurs familles. En effet, comme le souligne Magnan (2009) « l'ultime finalité de l'adaptation au CC, si elle passe par la réduction de la sensibilité du système aux risques naturels et par l'accroissement de sa résilience est bien l'amélioration ou le maintien de la qualité de la vie des êtres humains ». Dans ce contexte, il est important de s'arrêter aux impacts humains et sociaux.

Sur le plan social, l'étude de Myers (2008), concernant les réponses des agriculteurs aux chocs climatiques et contraintes au Manitoba, a permis de mettre en évidence les principaux impacts sociaux occasionnés par des facteurs de stress climatiques ou non. Ainsi, les producteurs interrogés ont associé la récession économique, la dégradation du tissu social ainsi que l'augmentation du stress à des facteurs non climatiques, alors que la perte de productivité et la maladie sont des impacts qui ont été associés aux contraintes météorologiques. Les événements météorologiques récents et leur variabilité ont donc plus d'influence que les moyennes et leurs tendances à long terme. Les phénomènes météorologiques sont, selon l'auteur, plus un irritant qu'une cause directe de la dégradation

sociale et financière actuelle dans les régions rurales du Manitoba. En effet, les producteurs bovins ont noté des améliorations aux pâturages et aux fourrages durant les périodes humides, tandis que les producteurs de céréales ont subi des réductions de la qualité des cultures et de leur rendement (Myers, 2008). Les problèmes du déclin rural influencent également la capacité d'intervention partout dans l'Ouest canadien. Le déclin rural peut être considéré comme une réduction de la qualité de vie occasionnée par un changement de la population et de l'économie régionale. La résilience en est affectée. Par exemple, les réseaux se font moins nombreux, ce qui réduit les niveaux de services, diminue le nombre de détenteurs de connaissances et les options deviennent inabordables. L'exode des jeunes constitue le problème le plus troublant.

La santé, notamment psychologique, des producteurs agricoles, est un facteur important de leur résilience et de leur capacité d'adaptation au changement (Wall et al., 2004). Une enquête sur la santé psychologique effectuée entre décembre 2005 et janvier 2006 auprès de 1 338 producteurs de lait, de porcs et de volailles du Québec indiquait que 50,9 % des répondants se situaient à un niveau élevé de détresse psychologique (Lafleur et Allard, 2006). Ce niveau était nettement au-dessus de la valeur de 17,5 % obtenue dans la population agricole en 1997, ainsi que celle obtenue dans la population québécoise (20,1 %) lors de l'enquête de Santé Québec effectuée en 1998. L'enquête de 2005-2006 n'a pas révélé de différences significatives de détresse psychologique entre les régions. Par contre, les femmes en étaient plus affectées (59,2 % des femmes par rapport à 49,5 % pour les hommes) ainsi que les producteurs compris entre 35 et 54 ans. Le pourcentage de détresse était de 48,1 % chez les producteurs de lait, alors que chez les producteurs de volailles et de porcs, ce pourcentage atteignait respectivement 36,4 % et 66,6 %. Les données de l'étude montraient que la qualité de vie en 2006 s'était nettement détériorée par rapport à la fin des années 1990 et soulignaient l'urgence d'agir.

Lafleur et Allard (2006) mentionnaient que l'image de l'agriculteur calme et paisible, maître de son temps et de sa destinée semble en voie de disparition. Près des trois quarts des producteurs interrogés se sont dits régulièrement stressés (Figure 3.1). Ayant moins le sentiment d'avoir de contrôle sur les aspects reliés à la ferme, les producteurs doivent composer avec une série de problèmes et d'exigences (Figure 3.2). Les producteurs laitiers signalaient les aléas de la météo, une surcharge de travail qui altère la vie sociale ainsi que l'incertitude qui plane sur le système de gestion de l'offre.

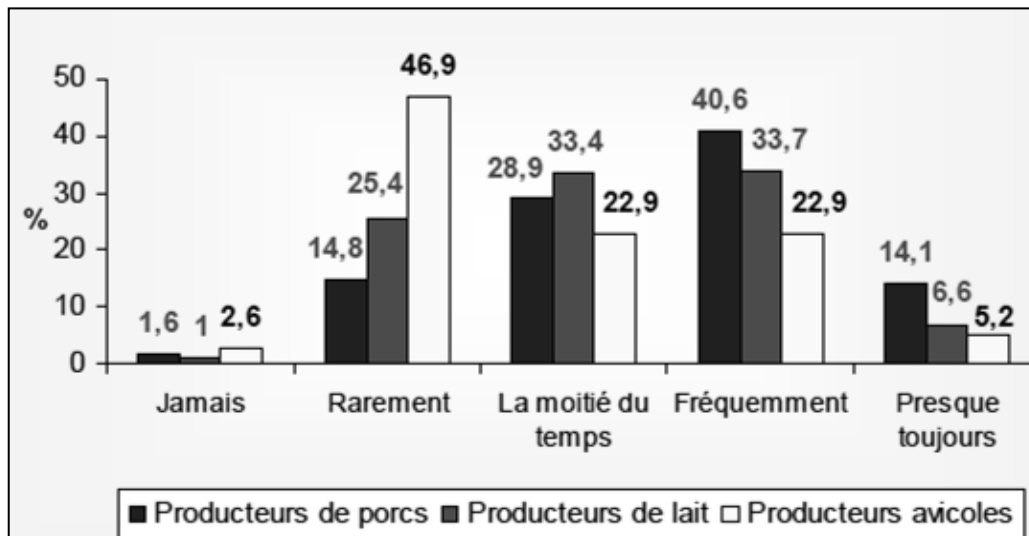


Figure 3.1 Fréquence de stress selon la production. (Tirée de Lafleur et Allard, 2006)

La typologie des producteurs relativement à la gestion des risques influencera également leur capacité à faire face aux changements en général. Peu de travaux dans le monde ont établi la typologie des agriculteurs ou des producteurs laitiers. Au Canada, une étude a été réalisée pour le compte d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC, 1998) dans le but d'évaluer le profil des attitudes et des comportements des producteurs agricoles canadiens en rapport avec leur adaptation face aux changements et à la gestion des risques. L'analyse typologique a permis de regrouper les producteurs en six segments : 1) les producteurs intéressés par la commercialisation ; 2) les producteurs pour qui l'agriculture est un mode de vie ; 3) les petits producteurs inquiets quant à l'avenir de leur exploitation ; 4) les producteurs traditionnels ; 5) les producteurs indépendants qui prennent des risques et 6) les producteurs intéressés par la gestion de leur entreprise. L'étude montre que chaque groupe de producteurs possède ses caractéristiques propres, notamment en rapport avec leurs attitudes à l'égard du secteur de l'agriculture et leur comportement à l'égard du changement et de la gestion du risque. Selon cette étude, près de la moitié (45 %) des producteurs agricoles canadiens s'estimaient capables de faire face aux changements et plus du tiers (35 %) envisageaient l'avenir de leur entreprise avec optimisme. Par ailleurs, plus de la moitié des producteurs québécois (52 %) estimaient que l'agriculture était un mode de vie plutôt qu'une entreprise commerciale.

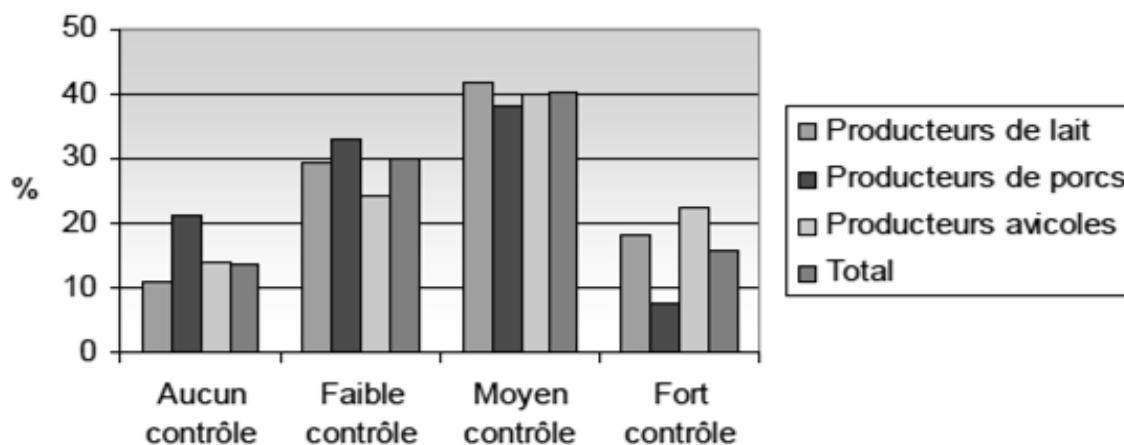


Figure 3.2 Perception de contrôle des producteurs agricoles selon la production. (Tirée de Lafleur et Allard, 2006)

Une telle étude d'opinions sur la gestion des risques en agriculture a d'ailleurs été raffinée au Québec par Levallois et al. (2009). Établissant le profil des agriculteurs au regard de leur style de gestion, incluant la tolérance au changement et au risque, l'auteur définit trois types d'agriculteurs québécois basés sur leurs attitudes ou caractéristiques psychologiques ainsi que sur leur comportement, un agriculteur pouvant appartenir à plus d'un groupe :

1) l'agriculteur entrepreneur est de type indépendant à l'esprit ouvert qui recherche l'accomplissement de soi ainsi que la reconnaissance au sein d'un réseau qu'il s'emploie à développer et à consulter. Très créatif, il met de l'avant ses nouvelles idées afin de développer de nouveaux produits, de nouveaux services ou encore pour mettre de l'avant de nouvelles façons de faire ou de commercialiser. Aimant le changement et l'innovation, il est vu comme un leader dans son domaine, ayant une grande confiance en lui. C'est un fonceur et un batailleur qui verra un échec comme une expérience à retenir dans un prochain projet. Les entrepreneurs sont centrés sur leur projet avec une prise de risques importante ;

2) l'agriculteur gestionnaire est très centré sur son entreprise avec des objectifs globaux clairs et réels qui le motivent de façon importante et qui lui donnent une orientation pour chacune des décisions prises quotidiennement. Le gestionnaire est à l'affût de l'évolution des besoins des consommateurs. Le gestionnaire vise la rentabilité ainsi que la pérennité de son entreprise et il garde toujours un plan de rechange en réserve. Il ne supporte pas la perte d'argent et il considère la « technique » comme un moyen d'atteindre la rentabilité et non comme une fin en soi. Il n'hésitera pas à prendre des décisions draconiennes afin d'éviter de perdre de l'argent ou lorsque l'équilibre de son entreprise est en jeu afin de maintenir une bonne situation financière. Aucun projet ne verra le jour sans que les conséquences financières n'aient été au préalable analysées. Les gestionnaires maîtrisent globalement et précisément l'ensemble de leur entreprise et se concentrent sur les résultats financiers. Ils prennent des risques modérés, calculés et supportables ;

3) l'agriculteur producteur/ agriculteur-technicien est davantage centré sur les techniques de production puisque les résultats sont pour l'agriculteur-producteur une source de satisfaction. Ceci vaut notamment en production laitière où l'utilisation de concentrés améliore les rendements, mais occasionne en revanche des coûts très élevés. Voulant toujours « faire mieux », il s'associe à des conseillers afin d'améliorer les rendements sans vraiment prendre en compte les conséquences économiques de cette recherche de performance à tout prix. Les agriculteurs-producteurs sont souvent inconscients des risques financiers.

L'importance du secteur laitier québécois sur la scène nationale démontre le haut niveau d'adaptabilité et de leadership des producteurs québécois au cours des dernières décennies face à divers facteurs économiques et environnementaux. Même s'il y a encore des progrès à faire sur le plan technique, les producteurs agricoles québécois sont performants (Levallois et al., 2009). L'adaptation aux changements climatiques passera par de nombreuses solutions afin d'en atténuer les impacts potentiels. Par contre, ces adaptations demanderont des efforts et s'accompagneront souvent de pertes et de coûts importants (Ouranos, 2010).

La capacité des producteurs à s'adapter aux changements climatiques anticipés dépendra notamment de la nature abordable ou non de la mesure d'adaptation ainsi que la capacité des entreprises à absorber ces coûts supplémentaires, même dans une période de coûts élevés des intrants, de déprime du prix des denrées ou une faiblesse des rendements. La capacité des agriculteurs-gestionnaires à contrôler les finances de leur entreprise devrait diminuer leur vulnérabilité en comparaison aux deux autres types de producteurs qui sont soit indifférents, inconscients ou qui acceptent de prendre des risques très importants pouvant compromettre la pérennité de leur entreprise. Plusieurs producteurs vivent avec des marges bénéficiaires serrées, un endettement massif des entreprises et ce, malgré un prix du lait payé enviable d'un point de vue mondial (Farmer, 2010). Une entreprise en mauvaise situation financière ou qui est dans l'incapacité de rembourser ses dettes ne pourra survivre aux changements climatiques, une situation qui nécessitera vraisemblablement de nouveaux investissements (André et Bryant, 2001). Les entreprises ayant à leur tête un producteur-gestionnaire ont un meilleur contrôle de leur endettement ainsi qu'une marge de sécurité suffisante leur permettant de faire face à des impacts potentiels provenant notamment des changements climatiques. L'attitude des producteurs sera l'un des facteurs qui déterminera si l'adaptation aux changements climatiques sera possible et si elle sera de nature réactive ou préventive; l'adaptation préventive fournissant un avantage concurrentiel.

En conclusion de cette section, les changements climatiques anticipés à l'horizon 2050 auront possiblement des impacts sur l'industrie laitière québécoise. Certains seront positifs alors que d'autres seront négatifs et d'ampleur différente en fonction de la région. Une adaptation sera nécessaire de la part des producteurs. Ces mesures d'adaptation nécessiteront des connaissances et des ressources. Compte tenu de l'importance économique de la filière laitière, de ses ressources et de son cadre de fonctionnement, on peut supposer que ce secteur est en bonne position pour faire face aux changements climatiques. Cependant, il y a très peu de données dans la littérature qui permettent d'évaluer la capacité ainsi que l'intérêt des producteurs laitiers québécois à s'adapter, selon la région, à ce genre de stimulus dans le cadre actuel de fonctionnement de la filière ainsi que dans un cadre international modifié.

4. Méthodologie / données

Voici la méthodologie retenue pour la réalisation de chacun des objectifs.

Objectif 1 : Déterminer le niveau actuel des connaissances d'ici et d'ailleurs sur la capacité d'adaptation des producteurs laitiers aux changements climatiques et sur l'impact potentiel des changements climatiques sur la durabilité des fermes laitières québécoises.

Dans le cadre de cet objectif, une méthodologie typique de revue de la littérature a été suivie. Une recherche exhaustive de la littérature a été complétée pour effectuer la rédaction d'une revue la plus complète possible. Cette revue de littérature est présentement en édition et sera disponible sous peu sur le site internet d'Agri-Réseau (www.agrireseau.qc.ca).

Objectif 2 : Faire un premier portrait de l'impact potentiel des changements climatiques sur les résultats économiques et environnementaux des fermes laitières québécoises.

Pour la réalisation de cet objectif, quatre étapes ont été nécessaires :

- 1) la détermination des données de base, des régions et des limitations de l'étude;
- 2) l'obtention des indices agroclimatiques pour les conditions climatiques récentes et futures;
- 3) l'établissement des répercussions potentielles des changements climatiques sur les rendements des cultures et la valeur nutritive des fourrages;
- 4) l'évaluation au niveau de la ferme de l'impact des changements climatiques avec le modèle N-Cycles.

C'est à l'aide du modèle global de ferme laitière N-CyCLES que l'étape 4 de l'objectif 2 du projet a été réalisée. Même si N-CyCLES n'est utilisé qu'à l'étape 4, il est important de présenter brièvement cet outil dès maintenant car ses caractéristiques ont un impact sur les choix faits aux étapes 1 à 3.

Deux principaux types de modèle de ferme laitière ont été développés au cours des dernières années. Le premier est basé sur les processus (process-based) et visent à intégrer simultanément l'influence et les interactions des procédés majeurs de production et des conditions pédoclimatiques (ex. IFSM, Rotz et al., 2012). Ce type de modèle permet des projections de résultats calculés avec précision, mais reste dans un cadre plus statique (i.e. reflétant la situation initiale entrée par l'utilisateur). Le second type de modèle, basé sur des outils d'optimisation comme la programmation linéaire (ex. N-CyCLES), permet de considérer différentes stratégies disponibles et d'identifier celle qui est la plus appropriée à un objectif donné. L'optimisation permet de mieux tenir compte de l'impact d'un changement dans un sous-système sur les choix de pratiques que ce changement entraînera dans l'ensemble de la ferme. Par exemple, une modification dans les rendements des cultures peut rendre une rotation qui était auparavant intéressante beaucoup moins pertinente pour une entreprise. Contrairement au premier type de modèle, un modèle utilisant l'optimisation modifiera la sélection des rotations pour obtenir le scénario le plus rentable pour la ferme. La ferme n'est donc pas considérée comme une unité de production statique. En effet, on peut penser que dans la réalité, une modification dans les pratiques de régie des cultures ou des animaux sera initiée si c'est globalement plus rentable pour l'entreprise. La précision de ce type de modèle peut toutefois être moindre, puisque les valeurs modifiées sont directement entrées par

l'utilisateur et non calculées par le modèle. Par contre, ce type de modèle est plus efficace dans un contexte où l'objectif est de mesurer l'impact de changements sur la ferme laitière considérée comme une seule unité de décision. C'est pourquoi, dans le cadre de cette étude, il a été jugé plus adéquat d'utiliser un modèle permettant l'optimisation, soit N-CyCLES.

L'outil N-CyCLES est un modèle informatique de la ferme laitière québécoise et américaine déjà existant (N-CyCLES; <http://dairynutrient.wisc.edu/N-CyCLE/page.php?id=517>). L'utilisation de ce modèle permet de considérer les interactions importantes entre chaque composante de la ferme (figure 4.1). Ainsi, il est possible de considérer les répercussions d'un changement dans un sous-système sur l'ensemble des résultats de l'entreprise. Le lien entre les champs et le troupeau est établi de deux façons soit, en considérant l'impact des récoltes sur l'alimentation du troupeau et ses rejets ainsi qu'en considérant les fumiers produits, incluant les pertes à l'entreposage sur la disponibilité des amendements disponibles pour la fertilisation. Le modèle N-CyCLES est bien adapté pour effectuer des évaluations économiques de pratiques optimales de gestion.

Les informations sur les entrées nécessaires et le détail des calculs du modèle N-CyCLES sont disponibles sur le site internet d'où on peut le télécharger (<http://dairynutrient.wisc.edu/N-CyCLE/page.php?id=517>). Le modèle sélectionne des rotations plutôt que les cultures individuelles lors d'optimisation, l'objectif étant de considérer l'effet résiduel des cultures précédentes dans l'établissement des besoins des plantes. Ce paramètre est important à considérer en production laitière, puisque la réponse aux besoins pour l'alimentation du troupeau demande l'élaboration de rotations favorisant la variété et la complémentarité des cultures. Comme les rotations sont appliquées à des regroupements de champs, toutes les cultures faisant partie d'une rotation sélectionnée sont présentes en même temps sur la ferme.

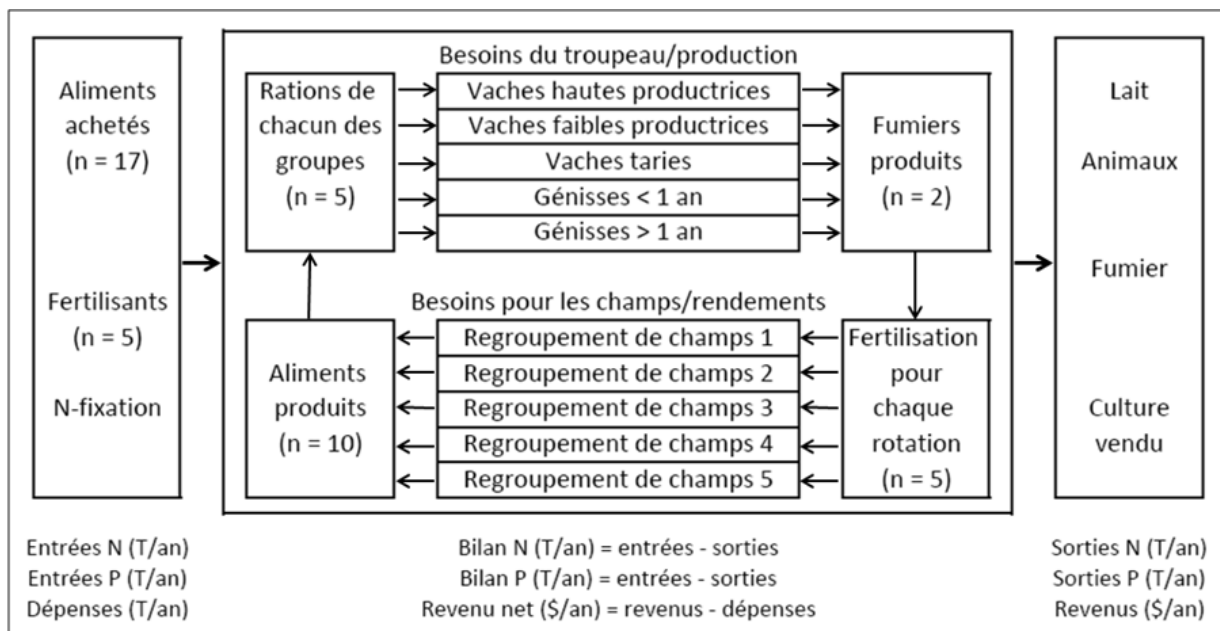


Figure 4.1 Représentation des interactions considérées dans le modèle N-CyCLES.

4.1 Détermination du cadre de l'étude, des données de base et des régions

Cadre de l'étude

Il a été établi dès le départ que les projections faites dans le cadre de ce projet seraient basées sur des connaissances appuyées par la littérature et sur la réalité actuelle. Ainsi, aucunes spéculations pour le futur (ex. augmentation du prix des grains, abandon ou non du contingentement en production laitière, etc.) n'ont été effectuées. Aussi, compte tenu de la nature exploratoire de cette étude, les mesures d'adaptation évaluées dans le cadre de ce projet sont limitées à des modifications de rotation et de certaines pratiques culturales, comme l'utilisation accrue de pesticides. Même si, comme il l'a été mentionné plus haut, il est probable que les changements climatiques auront des répercussions néfastes sur les performances animales (production laitière, taux de gras, reproduction, incidence des mammites, etc.), les conséquences de ces effets n'ont pu être évaluées dans le cadre de la présente étude. Au moment de débiter l'étude, les données sur le nombre de jours dépassant la température critique pour les vaches laitières actuellement compilées sur les sorties de modèles climatiques ne tenaient pas compte de l'indice humidex ou de l'évaluation des variations de température journalière sur une période de 24h. Considérant que le temps requis pour obtenir ces données pour les régions étudiées (via un nouveau traitement des données brutes des modèles climatiques) était incompatible avec le court délai pour la réalisation du projet, nous avons jugé difficile d'inclure cet impact dans l'analyse.

Données de base

Il a été décidé que les analyses porteraient sur deux régions du Québec, le Centre-du-Québec et le Bas-St-Laurent, qui possèdent des systèmes de production différents principalement à cause de leurs conditions climatiques différentes. La première étape dans la réalisation de cet objectif a été de déterminer les données de références représentant le mieux la situation actuelle des fermes dans chacune des régions. Le tableau 4.1 présente les sources pour les principales informations utilisées dans les scénarios de référence pour les deux régions étudiées à l'aide du modèle N-CyCLES.

Tableau 4.1. Principales sources de référence utilisées pour établir les caractéristiques des fermes laitières moyennes pour les scénarios de référence

Données	Sources
Rendement des cultures	Rendement de références 2012 Financière agricole du Québec (FADQ)
Données économiques de la ferme moyenne pour chaque région	Entreprise laitière – Maïs fourrager AGDEX 412.61/890b; Juillet 2011 Références économiques du CRAAQ
Performances animales	L'évolution de la production laitière 2010 Valacta 2011
Prix des fertilisants	Fertilisants et amendements AGDEX540/855; Juillet 2011.- années 2006 à 2010) Références économiques du CRAAQ
Prix des aliments	Analyses des banques de données Valacta
Analyses des aliments	Analyses de la composition chimique des aliments NRC (2001)
Analyses des fourrages	L'évolution de la production laitière 2010 Valacta 2011
Prix du lait	Lait prix, Agdex 412/855 Mars 2012 Références économiques du CRAAQ
Estimation des pertes de récolte et des indemnités moyennes de l'assurance récolte	Taux de pertes moyen historique Financière agricole du Québec

Les principales caractéristiques de la ferme moyenne de chacune des régions sont présentées au tableau 4.2. Comme les données de référence pour les rendements dans chacune des régions provenaient de la Financière agricole du Québec (FADQ), il a été décidé que les délimitations des régions pour notre étude seraient celles de cet organisme (figure 4.2). Bien que l'étendue de la région du Bas-St-Laurent fait en sorte que les températures moyennes entre la partie sud et la partie nord de cette région diffèrent, il a été estimé préférable d'utiliser la région dans son entier. Ainsi, les données agroclimatiques obtenues permettraient de représenter une moyenne, probablement en lien avec la réalité de la partie centrale de la région.

Tableau 4.2. Principales caractéristiques retenues pour la ferme moyenne du Bas-St-Laurent et du Centre-du-Québec.

	Centre-du-Québec	Bas-St-Laurent
Superficie (hectare)	142	139
Nombre de vaches	75	62
Production moyenne (kg/vache/an)	10 364	9544

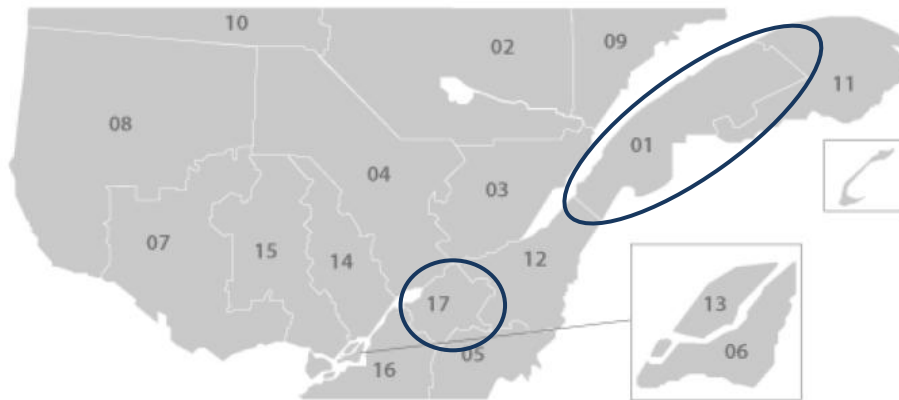


Figure 4.2 Carte des régions agricoles du Québec. 01 : Bas-St-Laurent; 17 : Centre-du-Québec. (Tirée de : www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/regions/Pages/Carte.aspx)

Pour chaque région, cinq rotations de cultures, de durée variant de 3 à 7 ans ont été incluses pour les optimisations dans le modèle de ferme. Ces rotations ont été déterminées de façon à ce qu'elles soient le plus représentatives possible de ce qui est actuellement utilisé par les producteurs laitiers dans ces régions (Tableau 4.3).

Tableau 4.3. Description, moyenne annuelle des rendements en matière sèche, moyenne des recommandations en N, P et K et moyenne des coûts de production des rotations pour le Centre-du-Québec (CDQ) et le Bas-St-Laurent (BSL)

Item	Numéro de rotation CDQ ¹					Numéro de rotation BSL ¹				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Année										
1	EM	EM	MG	O	MG	O	B	B	EM	B
2	O	MG	EM	L ²	EM	L ²	O	L	L ²	G ²
3	L ²	S	L	L	S	L	Ca	L	L	G
4	L	B	L	M		M	O	M	M	G
5	M		M	M		M		M	M	G
6	M		M			G		G		
7	G		G							
Rendement, t/ha	6,0	6,0	6,3	5,0	7,1	3,6	2,5	3,5	5,6	4,1
N, kg/ha ³	57	106	66	23	105	40	85	43	46	97
P ₂ O ₅ , kg/ha ³	34	42	34	36	42	33	42	33	35	25
K ₂ O, kg/ha ³	92	74	96	90	83	84	48	84	102	68
Coûts, \$/ha ⁴	419	668	420	596	716	277	447	246	435	355

¹ Abréviations des cultures: EM = ensilage de maïs, MG = maïs grain, O = orge, L = ensilage de légumineuses (surtout luzerne), M = ensilage mélangé (luzerne et fléole des prés), G = foin de graminée (surtout fléole des prés), S = soya, B = blé, Ca=canola.

² Première année d'établissement de la légumineuse avec une plante abri.

³ Recommandation pour la fertilisation (CRAAQ, 2010) (matière organique moyenne et analyse de sol moyenne en P et K).

⁴ Exclut les coûts de fertilisation qui sont calculés indépendamment dans le modèle, mais inclut l'assurance stabilisation et l'assurance récolte.

Il importe également de faire état de la situation actuelle des fermes laitières au Québec en ce qui a trait à l'accumulation d'azote et de phosphore comme comparatif pour les résultats qui sont présentés dans la suite du rapport. Le principal élément limitant l'épandage des fertilisants organiques sur les fermes laitières est présentement le phosphore. Les plans agroenvironnementaux de fertilisation utilisés et obligatoires sur les fermes du Québec favorisent une bonne utilisation de cet élément nutritif tout en limitant les surplus d'accumulation. Malgré tout, il est noté qu'une légère accumulation de phosphore (+25 kg/hectare) se produit sur les fermes laitières (Bachand, 2008). Un nombre d'hectare suffisant pour épandre le fumier permet également de limiter le risque d'accumulation. Dans le cas de la production laitière, il est suggéré d'avoir un minimum de 1,50 à 1,75 hectares par vache (Robert et Breault, 2008). Dans le cas des fermes moyennes utilisées pour cette étude, la superficie par vache est de 1,63 et 1,93 hectares pour le Centre-du-Québec et le Bas-St-Laurent respectivement.

4.2 Indices agroclimatiques pour les conditions climatiques courantes et futures.

Avec l'aide des collaborateurs experts en production végétale, une sélection des principaux indices agroclimatiques ayant un impact direct sur les décisions de gestion des fermes laitières a été effectuée (Tableau 4.4). On peut s'attendre à ce que la culture des plantes fourragères soit parmi les activités des fermes laitières les plus directement affectées par les changements climatiques. Pour le futur, on peut envisager des changements de la saison de croissance, des cumuls thermiques, du bilan hydrique et de la protection hivernale des plantes pérennes. Un effort substantiel fut consacré à la quantification de ces éventuels changements dans le cadre du projet "Atlas agroclimatique du Québec - Évaluation des opportunités et des risques agroclimatiques dans un climat en évolution" (Audet et al., 2012). Ce projet a, en effet, permis de compléter la refonte de *l'Atlas agroclimatique du Québec, 2012*, (www.agrometeo.org). Pour une série d'indices agroclimatiques, l'atlas fournit les valeurs des normales climatiques actualisées afin d'y intégrer les observations récentes (jusqu'en 2008). De plus, l'atlas inclut, pour chaque indice, des scénarios de changement inférieur et supérieur attendus pour la période 2041-2070. Ces scénarios de changement sont construits à partir d'un ensemble de quinze projections climatiques représentatif de l'ensemble des projections climatiques disponibles. La présente étude s'appuie donc sur les résultats de *l'Atlas agroclimatique du Québec, 2012* en retenant les indices les plus pertinents pour la production de plantes fourragères sur les fermes laitières. Les 22 indices agroclimatiques retenus pour l'analyse au niveau de la ferme laitière sont dérivés à partir des séries de précipitations ainsi que de la température quotidienne moyenne, minimale et maximale. La formulation de ces indices est présentée à l'annexe 1. Cette information ainsi que la délimitation précise des deux régions ont par la suite permis d'effectuer les projections de l'impact des changements climatiques pour chacun des indices et dans chacune des régions sélectionnées.

Tableau 4.4. Indices agroclimatiques issus de l'Atlas agroclimatique du Québec, 2012, retenus pour l'évaluation de l'impact potentiel des changements climatiques sur la production des plantes fourragères sur les fermes laitières

Indices thermiques
Date du dernier gel printanier (base 0°C)
Date du premier gel automnal (base 0°C)
Longueur de la saison sans gel (base 0°C)
Date du dernier gel printanier (base -2°C)
Date du premier gel automnal (base -2°C)
Longueur de la saison sans gel (base -2°C)
Date du début de la saison de croissance (base 5.5°C)
Date de la fin de la saison de croissance (base 5.5°C)
Longueur de la saison de croissance (base 5.5°C)
Cumul des degrés-jours entre le 1 ^{er} avril et le 31 octobre (base 0°C)
Cumul des degrés-jours entre le 1 ^{er} avril et le 31 octobre (base 5°C)
Cumul des degrés-jours entre le 1 ^{er} avril et le 31 octobre (base 10°C)
Date du début du cumul des UTM
Date de fin du cumul des UTM
Cumul des UTM
Nombre d'occurrences annuelles de $T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$
Perte d'endurcissement pendant la saison froide
Potentiel d'endurcissement du 1 ^{er} août et la date du premier $T_{min} < -10$
Indices hydriques
Cumul de la précipitation entre le 1 ^{er} avril et le 31 octobre
Cumul de la précipitation pendant la saison croissance
Cumul de l'indice hydrique P-ETP entre le 1 ^{er} mai et le 31 octobre
Cumul de l'indice hydrique P-ETP pendant la saison de croissance

Des simulations effectuées dans le modèle N-CyCLES pour chacune des quinze projections climatiques différentes auraient permis d'avoir une meilleure prise en compte des incertitudes. Toutefois, compte tenu des délais de réalisation du projet et de la nature exploratoire de l'étude, une solution de compromis, qui consiste à n'utiliser que deux situations d'intensité différente, a été retenue. Il était donc initialement prévu de baser les simulations dans N-CyCLES sur les valeurs des scénarios de changement inférieur et supérieur de chaque indice.

L'examen approfondi du comportement d'un ensemble de projections climatiques force à revoir l'idée initiale d'utiliser systématiquement le scénario inférieur et le scénario supérieur pour les 22 indices. Pour mieux comprendre ce changement d'approche, imaginons que l'on classe les quinze changements projetés en ordre croissant pour chacun des 22 indices. Le classement obtenu varierait selon les indices. Autrement dit, aucun modèle climatique n'obtiendrait le même classement pour tous les indices. Cela vient du fait que, dans les modèles climatiques, les liens entre les diverses variables respectent les lois de la physique, assurant ainsi leur cohérence. Suivant ce raisonnement, si l'on choisissait par exemple le scénario inférieur pour chaque indice, on obtiendrait un portrait du climat futur qu'aucun modèle climatique de l'ensemble n'aurait réussi à reproduire et dans lequel la cohérence entre les variables (et par conséquent entre les différents indices) serait rompue. Un tel portrait des

conditions futures serait irréaliste et exagéré. Il n'est donc pas souhaitable de l'intégrer à un modèle d'impact. Il est important de souligner qu'un modèle d'impact qui n'aurait besoin que d'un seul indice pourrait utiliser sans problème les scénarios inférieur et supérieur issus d'un ensemble de simulations climatiques comme celui de *l'Atlas agroclimatique du Québec, 2012*, mais ce n'est pas le cas d'un modèle qui en requiert 22 comme dans cette étude. Finalement, afin de conserver la cohérence entre divers indices, il faut choisir deux projections climatiques et calculer pour chacune les 22 indices agroclimatiques requis.

La sélection des deux scénarios de changement projetés repose sur une technique objective appelée analyse par grappe ("cluster analysis" en anglais). L'ensemble de projections climatiques de *l'Atlas agroclimatique du Québec, 2012*, a été composé à partir d'une analyse par grappe basée sur les changements saisonniers de précipitations et de températures. Dans le cadre du présent projet, les critères choisis tentent de tenir plus directement compte des facteurs influençant les rendements des plantes fourragères. Plusieurs de ces critères, qui correspondent essentiellement aux dimensions de l'analyse par grappe, sont donc liés à la saison de croissance et nous avons fait en sorte que tous les indices hydriques soient inclus dans l'analyse. De plus, afin de réduire la redondance dans l'analyse par grappe, nous avons choisi de ne pas utiliser toutes les bases d'un même indice. Les dimensions choisies pour l'analyse par grappe figurent au tableau 4.5 afin de définir deux grappes à partir des projections de changement produites par les quinze simulations climatiques décrites au tableau 4.6.

Tableau 4.5. Les $N=12$ dimensions de l'analyse par grappe

Code	Nom de l'indice
1	Changement de la date du dernier gel printanier (base 0°C)
2	Changement de la date de la fin de la saison de croissance (base 5.5°C)
3	Changement dans le cumul des degrés-jours entre le 1 ^{er} avril et le 31 octobre (base 5°C)
4	Changement de la date du début du cumul des UTM
5	Changement de la date de la fin du cumul des UTM
6	Changement dans le cumul des UTM
7	Changement dans le cumul de la précipitation entre le 1 ^{er} avril et le 31 octobre
8	Changement dans le cumul de la précipitation entre le 1 ^{er} avril et le 31 octobre
9	Changement dans le cumul de l'indice hydrique P-ETP entre le 1 ^{er} mai et le 31 octobre
10	Changement dans le cumul de l'indice hydrique P-ETP pendant la saison de croissance
11	Changement dans la perte d'endurcissement pendant la saison froide
12	Changement du nombre d'occurrences annuelles de $T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$

Tableau 4.6. Simulations climatiques ayant servi à la production des scénarios climatiques des indicateurs agroclimatiques de l'Atlas. Les simulations sur fond vert ont été sélectionnées par l'analyse par grappe à partir des critères du tableau 4.4. *Adapté du rapport scientifique de l'Atlas agroclimatique du Québec, 2012*

Type	Modèle	Pilote du MRC	SRES	Domaine	Code de simulation
MRC	HRM3	HACM3	A2	NARCCAP	1
MRC	MRCC4.2.3	CGCM3.1	A2	AMNO	aet-aet
MRC	MRCC4.2.3	CNRM-CM3.3	A1B	AMNO	agw-ahb
MRC	MRCC4.2.3	ECHAM5	A2	AMNO	agx-agx
MRC	MRCC4.2.3	ECHAM5	A2	AMNO	ahi-ahk
MCG	CGCM3.1	N/A	A2	GLOBAL	membre 1
MCG	CGCM3.1	N/A	A2	GLOBAL	membre 3
MCG	CGCM3.1	N/A	B1	GLOBAL	membre 1
MCG	CGCM3.1	N/A	B1	GLOBAL	membre 2
MCG	CGCM3.1	N/A	B1	GLOBAL	membre 4
MCG	CGCM3.1	N/A	A1B	GLOBAL	membre 3
MCG	CGCM3.1	N/A	A1B	GLOBAL	membre 5
MCG	CSIRO MK3.5	N/A	A1B	GLOBAL	membre 1
MCG	CSIRO MK3.5	N/A	B1	GLOBAL	membre 1
MCG	MPI ECHAM5	N/A	A1B	GLOBAL	membre 4

L'annexe 2 explique de façon plus détaillée l'analyse par grappe (Hartigan et Wong, 1979 ; Logan et al., 2011) en plus d'illustrer les résultats de celle réalisée pour ce projet. L'analyse d'une matrice 15x12 (15 projections de changement pour 12 indices, moyennées sur tous les points de grille inclus dans les régions du Centre-du-Québec et du Bas-Saint-Laurent) a permis d'identifier deux grappes. Les deux scénarios de changement retenus sont donc les deux projections qui sont les plus proches du centre de chaque grappe pour le plus grand nombre possible de dimensions. Ce sont:

- « Scénario d'augmentation modérée en GES »: CGCM3.1 membre 1, basé sur le scénario de GES SRES B1
- « Scénario d'augmentation élevée en GES »: CGCM3.1 membre 3, basé sur le scénario de GES SRES A1B

Les données climatiques de chacun des modèles identifiés pour les scénarios « augmentation modérée en GES » et « augmentation élevée en GES » sont traitées selon les étapes suivantes afin de produire les scénarios de changement projetés pour chacun des 22 indices agroclimatiques du tableau 4.4 pour les régions d'intérêt soient: le Centre-du-Québec et le Bas-St-Laurent:

1. Interpolation des données quotidiennes simulées sur la même grille à 10 km que les données observées de la région d'intérêt.
2. Calcul de l'indice pour chaque année de 1971 à 2000 à partir des données quotidiennes simulées.
3. Calcul de l'indice pour chaque année de 2041 à 2070 à partir des données quotidiennes simulées.
4. Calcul de la moyenne de l'indice pour la période 1971-2000.
5. Calcul de la moyenne de l'indice pour la période 2041-2070.

6. Calcul du changement projeté à partir de la différence (delta) entre la moyenne 2041-2070 et la moyenne 1971-2000 de l'indice.
7. Calcul de la moyenne régionale du changement projeté (delta) de l'indice.

Comme ce fut le cas pour *l'Atlas agroclimatique du Québec, 2012*, une procédure de correction de biais a été ajoutée aux étapes 2 et 3 pour le calcul du nombre d'occurrences annuelles de $T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$. Les scénarios « augmentation modérée en GES » et « augmentation élevée en GES » étant issus de modèles globaux de climat dont la résolution est d'environ 250 km, il est irréaliste d'attendre de ces modèles qu'ils puissent reproduire les mêmes valeurs d'extrêmes que celles enregistrées ponctuellement à une station météorologique. Pour pallier cette difficulté, on calcule l'équivalent quantile du seuil de température à dépasser. Par exemple, si une température de 30°C correspond au 95^e percentile de la distribution de températures à Rimouski, alors on cherchera dans les données simulées la température correspondant au 95^e percentile, et cette dernière sera utilisée comme seuil critique. On applique cette procédure pour le climat récent et le climat futur en faisant l'hypothèse que les biais d'un modèle climatique en climat récent demeureront les mêmes en climat futur, ce qui n'est pas toujours le cas (Christensen et al., 2008).

La base de données utilisée pour le calcul des normales observées contient des valeurs quotidiennes de températures et de précipitations estimées à tous les 10 km sur le territoire agricole québécois. Elles sont obtenues des observations climatologiques provenant d'Environnement Canada (EC) et du MDDEFP qui sont par la suite interpolées sur une grille à 10 km selon la technique "ANUsplin" (Hutchinson, 2004). Elles ont été produites dans le cadre d'un projet mené par le Service national d'information sur les terres et l'eau d'AAC avec la collaboration d'EC, de Ressources naturelles Canada et de *l'Australian National University* (<http://www4.agr.gc.ca/AAFC-AAC/display-afficher.do?id=1227620138144&lang=fra>). La procédure pour calculer les normales observées 1971-2000 des indices agroclimatiques pour chacune des régions d'intérêt est un peu plus simple:

1. Calcul de l'indice pour chaque année de 1971 à 2000 à partir des données quotidiennes observées interpolées sur une grille de 10 km.
2. Calcul de la moyenne (normale) de l'indice pour la période 1971-2000.
3. Calcul de la moyenne régionale de la normale de l'indice.

Les résultats des projections climatiques sont présentés à la section 5. Une fois cette analyse complétée et tel qu'il sera présenté dans les sections suivantes, il a été possible d'évaluer les impacts des changements climatiques sur les cultures utilisées en production laitière.

4.3 Établissement des répercussions potentielles des changements climatiques sur les rendements des cultures et la valeur nutritive des fourrages

Une revue exhaustive de la littérature a été réalisée pour établir les modifications potentielles aux rendements et à la valeur nutritive des aliments pour chacun des scénarios climatiques et chacune des régions retenues. Il a ainsi été possible d'établir, de manière réaliste, l'ampleur des variations de ces deux paramètres en fonction des modifications prévues aux indices agroclimatiques ainsi qu'à l'augmentation probable de la teneur en CO_2 de l'air. Les principaux indices agroclimatiques pour lesquels la littérature était disponible sont les degrés-jours pour les plantes fourragères et les céréales, et les unités thermique maïs (UTM) pour le maïs et le

soya. Comme les rendements des cultures ne répondent pas de manière linéaire à la variation de température, il a été jugé préférable de baser l'établissement des projections sur les données de recherches provenant principalement du Québec et de n'utiliser les données d'autres provinces du Canada, du Nord des États-Unis et du Nord de l'Europe qu'en validation (Tableau 4.7). En effet, les résultats de rendement évoluent généralement de manière positive avec l'augmentation de température jusqu'à un optimum pour ensuite réagir négativement une fois cet optimum dépassé.

Les impacts de modifications des indices agroclimatiques et des concentrations en CO₂ ont été considérés simultanément lorsque des données étaient disponibles dans la littérature. Dans le cas contraire, l'information sur chacun de ces facteurs a été colligée puis l'effet de leur impact a été cumulé de façon additive. Cette méthode était utilisée en second, puisqu'elle peut entraîner de légère surestimation en comparaison à des études considérant simultanément les différents facteurs. De plus, pour les plantes fourragères, il a été prédit que l'augmentation des rendements reliée aux modifications du cumul des degrés-jours se traduirait par une coupe annuelle supplémentaire. Pour les autres cultures ainsi que pour l'effet du CO₂, c'est un pourcentage d'augmentation qui a été appliqué.

Pour la valeur nutritive des aliments, il a été décidé de négliger l'impact du climat sur la qualité nutritionnelle du maïs et des céréales, car l'effet est marginal par rapport à celui sur les fourrages. En effet, la température a un effet important sur la composition des plantes fourragères et, de plus, les variations de valeur nutritive des fourrages ont un impact direct sur les coûts de production et les performances animales. De l'information pertinente dans un contexte québécois était disponible pour la modification de la valeur nutritive de la luzerne (Bertrand et al., 2007; 2012 communication personnelle) et de la fléole des prés (Bertrand et al., 2008; 2012 communication personnelle). C'est donc, en grande partie, à partir de ces études que les projections ont été réalisées. Aucune information n'était toutefois disponible pour l'ensilage de maïs. L'impact possible de la température sur la valeur nutritive de cet aliment a alors été évalué en comparant les analyses moyennes d'ensilage de maïs au Québec à celles des laboratoires du Nord des États-Unis. Le Nord des États-Unis correspond aux zones possédant actuellement des résultats pour les indices agroclimatiques similaires à ceux projetés avec les changements climatiques au Québec. Comme les différences en valeur nutritive de l'ensilage de maïs n'étaient pas marquées, nous avons conclu qu'avec les connaissances actuelles, il n'était pas possible de se prononcer sur un changement de la valeur nutritive de l'ensilage de maïs attribuable aux changements climatiques. Une validation pour les autres plantes fourragères a également été faite en utilisant la même méthodologie et a confirmé que les résultats des laboratoires allaient dans le même sens que ceux prédits à l'aide des études en notre possession.

Tableau 4.7. Littérature utilisée pour les projections de rendement et de valeur nutritive

Culture	Références utilisées
Rendements	
Maïs grain	Bootsma et al., 2001; 2004; 2005
Soya	Bootsma et al., 2001; 2005 Hatfield et al., 2008; 2011 Hartwell Allen et Boote, 2000
Orge	Bootsma et al., 2005 El Maayar et al., 1997 Rötter et al., 2012 Weigel et Manderscheid, 2012
Blé	Brassard et Singh, 2008 Hatfield et al., 2008; 2011 El Maayar et al., 1997 Weigel et Manderscheid, 2012
Canola	El Maayar et al., 1997 Frenck et al., 2012 Kutcher et al., 2010
Luzerne	Bélangier et al., 1999 Bertrand et al., (AAC) 2012, Communication personnelle Izaurrealde et al., 2011
Fléole des prés	Bertrand et al., (AAC) 2012, Communication personnelle Piva et al., 2013
Ensilage de maïs	Comparaison des rendements du Sud de l'Ontario (OMAFRA, 2012), des États du Wisconsin (USDA, 2012) de l'Ohio (USDA, 2012) et de la Pennsylvanie (USDA, 2012)
Valeur nutritive	
Luzerne	Bertrand et al., (AAC) 2012, Communication personnelle Bertrand et al., 2007
Fléole des prés	Bertrand et al., (AAC) 2012, Communication personnelle Bertrand et al., 2008
Ensilage de maïs	Analyse moyenne du Québec pour 2010 et 2011 (Valacta, 2011, 2012) Dairy one – USA. CORN SILAGE Crop year (2009 -2010) Dairy one – USA. CORN SILAGE Crop year (2010-2011)

Suite à la compilation de l'information provenant de la littérature, des projections pour les modifications aux rendements et à la valeur nutritive des cultures récoltées ont été faites pour chacun des scénarios climatiques dans chacune des régions. Ces données ont été compilées sous forme de tableaux et ont été présentées à un comité d'experts (Tableau 4.8) dans le cadre d'un *Focus group*.

Tableau 4.8. Expertise et affiliation des participants au *Focus group*

Participants	Domaine d'expertise	Affiliations
Gilles Bélanger	Plantes fourragères	AAC
Valérie Bélanger	Céréales et maïs	Réseau Innovagrains
Édith Charbonneau	Production laitière	Université Laval
Alain Fournier	Production laitière et ensilage de maïs	MAPAQ
Mario Gauthier	Production laitière et plantes fourragères	Valacta
Nathalie Gentesse	Nutrition des vaches laitières et fourrages	Bélisle nutrition
Bertrand Leclerc	Céréales et maïs	FADQ
Juan Manuel Moreno	Étudiant	Université Laval
Doris Pellerin	Production laitière	Université Laval
Denis Ruel	Céréales et maïs	MAPAQ
Gaëtan Tremblay	Plantes fourragères	AAC
Anne Vanasse	Céréales et maïs	Université Laval

Le tableau 4.9 présente l'évolution des modifications aux projections de rendement suite au *Focus group*. Après discussion, l'impact des changements climatiques sur la valeur nutritive des fourrages a été accepté tel quel par les experts participants au *focus group* (tableau 4.8).

Tableau 4.9. Évolution des modifications aux projections de rendements pour les deux scénarios climatiques avant et après le *Focus group*

Culture	Évolution projetée des rendements basée sur l'analyse de la littérature	Évolution projetée des rendements Suite au Focus-Group
Maïs grain	Augmentation importante	Augmentation importante
Soya	Augmentation importante	Réduction dans l'importance de l'augmentation
Orge	Légère diminution	Comparable à la situation actuelle
Blé	Légère diminution	Comparable à la situation actuelle
Canola	Légère diminution	Comparable à la situation actuelle
Luzerne	Augmentation importante	Augmentation importante
Fléole des prés	Diminution	Diminution
Ensilage de maïs	Augmentation importante	Augmentation importante

La rencontre en *Focus group* a donc permis de confirmer les projections faites suite à l'analyse de la littérature dans la majorité des cas. Pour le soya, une réduction dans l'ampleur de l'augmentation a été proposée, puisque les projections semblaient idéalisées selon les experts. Selon ces derniers, cette plante est sensible à la sécheresse, à la température et aux ravageurs. Il a d'ailleurs été mentionné que le facteur d'actualisation des rendements passés pour cette culture est inférieur à 1 dans les calculs de la Financière agricole du Québec à cause de ces caractéristiques. Le facteur d'actualisation correspond au coefficient d'ajustement utilisé pour ramener les rendements des années antérieures au même niveau que celui des cultures cultivées aujourd'hui. Il a donc été établi que, bien qu'une augmentation dans les rendements soit réaliste, les conditions de cultures en champs ne permettraient pas

d'obtenir des résultats d'une aussi grande ampleur que ce qui est projeté dans les études contrôlées pour le soya et réalisées principalement en serre. Pour les céréales à paille et le canola, les experts s'entendaient pour dire qu'aucune augmentation de rendement n'était à prévoir, mais ils ne considéraient toutefois pas réaliste de projeter une réduction des rendements. La décision de ne pas réduire le rendement de ces cultures a été prise en considérant aussi le facteur d'ajustement de la Financière agricole du Québec, qui est à 1 pour ces cultures, et sur le fait que des rendements supérieurs à ceux actuellement dans le modèle sont déjà obtenus dans des régions plus chaudes du Québec.

Les résultats pour les projections des rendements et de la valeur nutritive des fourrages sont présentés à la section 5.

4.4 Intégration au niveau de la ferme de l'impact des changements climatiques avec le modèle N-CyCLES.

Des informations supplémentaires étaient nécessaires pour compléter l'étude en utilisant le modèle global de ferme laitière N-CyCLES. D'abord, un ajustement dans les coûts de production des cultures était nécessaire pour mieux tenir compte de l'impact de l'augmentation des rendements et de potentiels ennemis des cultures (insectes, champignons, plantes nuisibles, etc.) reliés aux changements climatiques. Les ajustements suivants ont été faits en les modulants pour chacun des différents scénarios climatiques dans chacune des régions :

- Majoration des frais reliés à la récolte en lien avec les nouveaux rendements pour les cultures annuelles et à la coupe supplémentaire pour les plantes fourragères pérennes.
- Majoration des coûts en pesticides pour les cultures de soya et de maïs, mais pas pour les céréales à paille en se basant sur l'étude de Chen et McCarl (2001) portant sur l'impact des changements climatiques sur l'utilisation de pesticides.
- Majoration des coûts de pulvérisation des pesticides pour tenir compte d'un passage additionnel pour le maïs et le soya.

Ensuite, les ajustements suivants au niveau des cultures et des rotations ont été apportés :

- Retraitement d'une année de fourrages à forte proportion de légumineuses des rotations fourragères pour considérer la diminution de la survie hivernale de la luzerne (Bélangier et al. 2002).
- Majoration des besoins en fertilisation (N, P et K) en fonction de l'augmentation des prélèvements en ces minéraux par les plantes occasionnées par l'augmentation des rendements de manière à éviter un appauvrissement des sols.
- Augmentation de 10% des pourcentages de perte à la récolte a été calculée pour considérer l'augmentation du nombre et/ou de l'intensité des événements météorologiques extrêmes (grêle, orages, etc.). En l'absence de données provenant de la littérature, cette augmentation a été jugée acceptable par les experts du domaine.
- Augmentations de 10 % aux cotisations à l'assurance récolte et aux indemnités de cette dernière ont également été considérées pour refléter l'augmentation des pertes.

Enfin, une augmentation des pertes lors de la conservation des fourrages a également été considérée. Suite à l'évaluation de la littérature, un expert en conservation des fourrages nous a suggéré d'augmenter de 10 % le niveau de pertes en matière sèche à la reprise pour les ensilages due à l'augmentation de température pendant les mois d'été (Robert Berthiaume, Valacta, communication personnelle, 2013).

Toutes ces modifications ont été adaptées à chacun des scénarios climatiques et à chacune des régions. Il a alors été possible d'effectuer les simulations pour mieux comprendre l'impact potentiel des changements climatiques sur le bénéfice net et les répercussions environnementales dans les fermes laitières du Québec. Le tableau 4.10 présente les différentes simulations qui ont été effectuées à l'aide du modèle N-CyCLES. Dans tous les cas, l'optimisation se faisait sur la maximisation du bénéfice net en respectant les contraintes fixées.

Tableau 4.10. Liste des simulations effectuées avec le modèle N-CyCLES pour évaluer l'impact potentiel des changements climatiques sur les fermes laitières

Centre-du-Québec (CDQ)
Scénario actuel
Ajustement pour le scénario climatique « augmentation modérée en GES »
a) aucune modification pour la valeur nutritive
b) modification pour la valeur nutritive
Ajustement pour le scénario climatique « augmentation élevée en GES »
a) aucune modification pour la valeur nutritive
b) modification pour la valeur nutritive
Bas-St-Laurent (BSL)
Scénario actuel
Ajustement pour le scénario climatique « augmentation modérée en GES »
a) aucune modification pour la valeur nutritive
b) modification pour la valeur nutritive
c) simulation en utilisant les rotations du CDQ
Ajustement pour le scénario climatique « augmentation élevée en GES »
a) aucune modification pour la valeur nutritive
b) modification pour la valeur nutritive
c) simulation en utilisant les rotations du CDQ

Pour chacun des scénarios évalués, nous avons effectué une simulation avec ou sans les modifications à la valeur nutritive des fourrages de manière à pouvoir quantifier l'impact de ces modifications sur les résultats finaux. Également, une troisième simulation pour chacun des scénarios climatiques a été ajoutée au Bas-St-Laurent. Cette dernière considère une adaptation des rotations de cette région. En effet, comme les valeurs projetées des indices agroclimatiques pour cette région deviennent similaires à celles du Centre-du-Québec

d'aujourd'hui, il nous a paru logique d'inclure une adaptation dans les rotations du Bas-St-Laurent qui permettrait d'inclure le maïs-grain et le soya.

5. Résultats

5.1 L'impact des changements climatiques sur les indices agroclimatiques

Les tableaux 5.1 et 5.2 contiennent les indices pour les deux scénarios climatiques retenus et pour les normales observées pour les régions de Centre-du-Québec et du Bas-Saint-Laurent. Pour avoir une idée de ce à quoi les normales du climat futur sur la période 2041-2070 pourraient ressembler, il suffit d'ajouter la valeur du changement projeté par un scénario à la valeur de la normale 1971-2000.

Tableau 5.1. Moyennes régionales pour le **Centre-du-Québec** des normales observées 1971-2000 ainsi que de deux scénarios de changement (2041-2070 vs 1971-2000) projetés pour chaque indice agroclimatique.

Nom de l'indice	Unités	Normales 1971-2000	Scénario de changement augmentation modérée en GES ¹	Scénario de changement augmentation élevée en GES ¹
Date du dernier gel printanier (base 0°C)	jour julien	136,8	-7,8	-8,9
Date du premier gel automnal (base 0°C)	jour julien	267,5	5,6	12,0
Longueur de la saison sans gel (base 0°C)	Jours	130,8	13,4	20,9
Date du dernier gel printanier (base -2°C)	jour julien	125,4	-8,5	-8,0
Date du premier gel automnal (base -2°C)	jour julien	278,6	8,5	11,0
Longueur de la saison sans gel (base -2°C)	Jours	153,1	17,0	19,0
Date du début de la saison de croissance (base 5.5°C)	jour julien	110,9	-13,5	-8,6
Date de la fin de la saison de croissance (base 5.5°C)	jour julien	311,2	10,2	10,0
Longueur de la saison de croissance (base 5.5°C)	Jours	200,2	23,7	18,6
Cumul des degrés-jours entre le 1 ^{er} avril et le 31 octobre (base 0°C)	DJ	2711,4	415,8	494,0
Cumul des degrés-jours entre le 1 ^{er} avril et le 31 octobre (base 5°C)	DJ	1736,1	362,6	437,4
Cumul des degrés-jours entre le 1 ^{er} avril et le 31 octobre (base 10°C)	DJ	924,6	282,3	330,7
Date du début du cumul des UTM	jour julien	130,3	-11,7	-16,0
Date de la fin du cumul des UTM	jour julien	278,6	8,5	11,0
Cumul des UTM	UTM	2699,6	605,0	710,0
Cumul de la précipitation entre le 1 ^{er} avril et le 31 octobre	mm	730,3	21,3	15,6
Cumul de la précipitation pendant la saison de croissance	mm	697,9	101,7	70,9
Cumul de l'indice hydrique (P-ETP) entre le 1 ^{er} mai et le 31 octobre	mm	62,8	-54,5	-58,4
Cumul de l'indice hydrique (P-ETP) pendant la saison de croissance	mm	93,1	7,5	-8,8
Nombre d'occurrences annuelles de Tmax > 30°C	Jours	3,0	8,1	5,0
Perte endurcissement pendant la saison froide	DJ > 0	39,2	7,7	7,1
Potentiel endurcissement entre le 1 ^{er} août et le premier Tmin < -10	DJ < 5	84,6	5,8	-11,1

¹Le scénario augmentation modérée en GES provient du modèle CGCM3.1 membre 1, basé sur le scénario de GES SRES B1 tandis que le scénario augmentation élevée en GES a été produit par le CGCM3.1 membre 3, basé sur le scénario de GES SRES A1B.

Tableau 5.2. Moyennes régionales pour le **Bas-St-Laurent** des normales observées 1971-2000 ainsi que de deux scénarios de changement (2041-2070 vs 1971-2000) projetés pour chaque indice agroclimatique.

Nom de l'indice	Unités	Normales 1971-2000	Scénario de changement augmentation modérée en GES	Scénario de changement augmentation élevée en GES
Date du dernier gel printanier (base 0°C)	jour julien	144,6	-6,5	-10,8
Date du premier gel automnal (base 0°C)	jour julien	262,7	9,1	9,2
Longueur de la saison sans gel (base 0°C)	jours	118,1	15,6	20,1
Date du dernier gel printanier (base -2°C)	jour julien	131,9	-7,2	-9,5
Date du premier gel automnal (base -2°C)	jour julien	275,5	8,0	8,5
Longueur de la saison sans gel (base -2°C)	jours	143,6	15,2	18,0
Date du début de la saison de croissance (base 5.5°C)	jour julien	127,1	-10,9	-10,5
Date de la fin de la saison de croissance (base 5.5°C)	jour julien	296,8	11,6	15,9
Longueur de la saison de croissance (base 5.5°C)	jours	169,7	22,6	26,4
Cumul des degrés-jours entre 1 ^e avril et le 31 octobre (base 0°C)	DJ	2236,9	362,1	452,7
Cumul des degrés-jours entre 1 ^e avril et le 31 octobre (base 5°C)	DJ	1329,7	301,3	375,1
Cumul des degrés-jours entre 1 ^e avril et le 31 octobre (base 10°C)	DJ	631,9	216,6	259,5
Date du début du cumul des UTM	jour julien	147	-12,7	-12,0
Date de la fin du cumul des UTM	jour julien	275,5	8,0	8,5
Cumul des UTM	UTM	2044,7	541,4	588,4
Cumul de la précipitation entre le 1 ^e avril et le 31 octobre	mm	652,6	43,1	23,0
Cumul de la précipitation pendant la saison de croissance	mm	541,2	108,2	99,7
Cumul de l'indice hydrique (P-ETP) entre 1 ^e mai et le 31 octobre	mm	69,1	-20,7	-43,9
Cumul de l'indice hydrique (P-ETP) pendant la saison de croissance	mm	47,3	34,3	25,3
Nombre d'occurrences annuelles de Tmax > 30°C	jours	1,7	4,9	3,2
Perte d'endurcissement pendant la saison froide	DJ > 0	11,9	5,6	5,7
Potentiel d'endurcissement entre le 1 ^e août et le premier Tmin < -10	DJ < 5	117,7	19,7	10,3

¹Le scénario augmentation modérée en GES provient du modèle CGCM3.1 membre 1, basé sur le scénario de GES SRES B1 tandis que le scénario augmentation élevée en GES a été produit par le CGCM3.1 membre 3, basé sur le scénario de GES SRES A1B.

Lorsqu'on observe ces indices agroclimatiques, il est possible de remarquer que les résultats pour les indices du Bas-St-Laurent qui considèrent les changements climatiques sont très similaires à ceux du Centre-du-Québec actuel. Pour le Centre-du-Québec, ces résultats ressemblent plus à ce qui est présentement observé au Sud de l'Ontario ou au Nord des États-Unis.

5.2 L'impact potentiel des changements climatiques sur les rendements des cultures et la valeur nutritive des fourrages

Les projections pour les rendements des cultures dans chacune des régions et pour chacun des scénarios climatiques ont été établies à partir des projections des indices agroclimatiques, des recherches bibliographiques et du *Focus group* (Tableau 5.3). Les cultures mieux adaptées aux températures chaudes (maïs, soya et luzerne) obtiendront de meilleurs rendements pour les régions du Québec, alors que les cultures mieux adaptées aux régions fraîches connaîtront des rendements similaires (orge, blé et canola) ou légèrement diminués avec les changements climatiques (fléole des prés).

Tableau 5.3. Projections des rendements (T en matière sèche/ha) selon les scénarios climatiques et les régions pour les principales cultures présentes dans les rotations.

Culture	Centre-du-Québec			Bas-St-Laurent		
	Actuel	Scénario ↑ modérée en GES	Scénario ↑ élevé en GES	Actuel	Scénario ↑ modérée en GES	Scénario ↑ élevé en GES
Maïs grain ¹	6,1	9,9	10,4	-	6,0	6,1
Soya ¹	1,9	2,5	2,5	-	2,1	2,1
Orge	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0
Blé	2,1	2,1	2,1	1,9	1,9	1,9
Luzerne	5,3	9,1	9,5	3,9	6,6	6,9
Fléole des prés	4,4	4,3	4,2	3,2	3,1	3,0
Canola	-	-	-	1,7	1,7	1,7
Ensilage de maïs ¹	13,8	15,8	16,3	11,1	13,6	14,0

¹Les rendements pour le Bas-St-Laurent sont estimés à partir de ceux du Centre-du-Québec d'aujourd'hui

Les résultats de projection pour le rendement diffèrent par rapport au scénario actuel, mais demeure similaire entre les deux scénarios climatiques. En fait, bien qu'il y ait des différences entre les indices agroclimatiques des deux scénarios de changements climatiques, ces différences ont un impact relativement faible comparativement à d'autres facteurs agronomiques sur la ferme. Les plantes en C4, comme le maïs, profiteront très peu de l'augmentation en CO₂ comparativement aux plantes en C3, telles que le soya et les céréales à paille. Par contre, l'augmentation en UTM devrait permettre un accroissement important des rendements du maïs et du soya. L'augmentation des degrés-jours, pour sa part, aura un effet négatif sur les céréales à paille. Pour les plantes fourragères, l'allongement de la saison de croissance permettrait d'envisager une coupe supplémentaire. En plus, l'augmentation de la température et du CO₂ devrait être bénéfique pour les rendements en luzerne (Bertrand et al., 2007, Bertrand et al., 2012). Pour sa part, la fléole des prés ne bénéficiera pas de l'augmentation en CO₂ et l'augmentation de la température aurait un impact négatif sur la croissance de cette espèce (Bertrand et al., 2008; Bertrand et al., 2012).

Dans la littérature consultée au sujet de la valeur nutritive des fourrages, il est généralement admis que les changements climatiques entraîneront une augmentation de la teneur en fibres et une diminution de la digestibilité des fourrages. Les projections faites dans le cadre de ce projet, à partir de cette information provenant de la littérature et validé en *Focus group*, reflètent cette réalité (Tableau 5.4).

Tableau 5.4. Projections des variations de valeur nutritive des deux principales espèces fourragères au Québec pour deux scénarios de changements climatiques (augmentation modérée en GES et augmentation élevée en GES).

Paramètre	Luzerne		Fléole des prés	
	Scénario ↑ modérée en GES	Scénario ↑ élevé en GES	Scénario ↑ modérée en GES	Scénario ↑ élevé en GES
	% de variation			
GNS ¹	+2,1	+2,4	+14,3	+16,4
NDF ²	+8,7	+10,0	+1,6	+1,8
dNDF ³	-7,7	-8,8	-2,3	-2,6
ADF ⁴	+9,6	+11,0	+0,5	+0,6
ADL ⁵	+15,6	+17,8	+2,5	+2,9
Protéine brute ⁶	-7,0	-8,0	-8,2	-9,3

¹GNS = Glucides non-structuraux; exprimé en % de matière sèche;

²NDF = Fibre à détergent neutre; exprimé en % de matière sèche;

³dNDF = Digestibilité de la fibre NDF; exprimé en % de matière sèche,

⁴ADF = Fibre à détergent acide; exprimé en % de matière sèche;

⁵ADL = Lignine; exprimé en % de matière sèche;

⁶Protéine brute = N*6,25; exprimé en % de matière sèche.

5.3 L'impact potentiel des changements climatiques sur la durabilité économique et environnementale des fermes laitières

Pour l'horizon 2050, les résultats montrent que l'impact potentiel des changements climatiques sur les fermes laitières est de même ampleur pour les deux scénarios climatiques considérés, et ce, pour chacune des régions à l'étude (Tableau 5.5). Par contre, la nature de cet impact diffère entre les deux régions (Tableau 5.5). En effet, la ferme du Centre-du-Québec bénéficiera grandement d'un point de vue économique des changements climatiques potentiels (augmentation du bénéfice de 4,12 et 4,62 \$/hectolitre ou 28 760 \$/année et 32 229 \$/année, pour les scénarios augmentation modérée en GES et augmentation élevée en GES respectivement), alors que la situation financière de celle du Bas-St-Laurent se détériorera légèrement si aucune adaptation n'est faite dans les rotations (diminution du bénéfice de 0,71 et 0,11 \$/hectolitre ou 4941 et 781 \$/année, pour les scénarios augmentation modérée en GES et augmentation élevée en GES respectivement). Ceci s'explique principalement par le fait que la ferme moyenne du Centre-du-Québec tire une partie de ses revenus de la vente des récoltes alors que celle du Bas-St-Laurent est plus spécialisée en production laitière et sa production de cultures est presque entièrement dédiée à l'alimentation du troupeau laitier. Les situations plus avantageuses pour les scénarios d'augmentation élevée en GES par rapport

aux scénarios d'augmentation modérée s'expliquent principalement par l'augmentation des rendements en plantes fourragères (légumineuses et ensilage de maïs) dans les deux régions et l'augmentation des productions de maïs et soya pour le Centre-du-Québec. Au Bas-St-Laurent, l'ajout des cultures de maïs-grain et de soya par l'utilisation des rotations actuelles du Centre-du-Québec permet d'augmenter le bénéfice net de la ferme moyenne de cette région. Pour sa part, la diminution de la valeur nutritive des fourrages de tous les scénarios compte pour une détérioration des revenus allant jusqu'à 0,10 \$/hectolitre, soit 684 \$/année.

Tableau 5.5. Résultats des simulations de l'impact potentiel des changements climatiques dans le modèle de ferme N-CyCLES sur le bénéfice net, les bilans en N et en P et la production de gaz à effets de serre sur une ferme moyenne du Centre-du-Québec et du Bas-St-Laurent.

	Actuel	Scénario ↑ modérée en GES	Scénario ↑ élevée en GES	Scénario ↑ modérée en GES nv. rot. ¹	Scénario ↑ modérée en GES nv. rot. ¹
Δ^2					
Centre-du-Québec					
Bénéfice net, \$/hectolitre	10,55	+4,12	+4,62		
Bilan P, g/ hectolitre	115	-26	-20		
Bilan N, g/ hectolitre	1650	+54	+47		
GES, Eq CO ₂ /kg LC ³	1,26	+0,07	+0,08		
Bas-St-Laurent					
Bénéfice net, \$/ hectolitre	7,89	-0,71	-0,11	+1,48	+1,93
Bilan P, g/ hectolitre	191	+91	+87	-41	-37
Bilan N, g/ hectolitre	1803	+557	+545	+469	+442
GES, Eq CO ₂ /kg LC ³	1,32	+0,08	+0,09	+0,11	+0,11

¹ Rotations du Centre-du-Québec dans les simulations du Bas-St-Laurent.

² $\Delta = \text{Simulation}_i - \text{Actuel}$; où $i = \uparrow$ modérée en GES ; \uparrow élevée en GES ; \uparrow modérée en GES nv. rot.; \uparrow élevée en GES nv. rot.

³ Gaz à effet de serre calculés selon la IDF (2010) par kg de lait corrigé (LC) pour le gras et la protéine.

Du point de vue environnemental, les différences sont encore plus notables entre les deux régions (Tableau 5.5). Les changements climatiques potentiels résulteront en une amélioration du bilan P, une augmentation de la production de GES, et ce, sans trop détériorer le bilan N pour la ferme du Centre-du-Québec. Les modifications au bilan P sont principalement dues à l'augmentation de la vente de récoltes. Pour le bilan N, les ventes de récoltes ne compensent pas totalement pour les besoins supplémentaires en fertilisants azotés et pour le retranchement d'une année de légumineuses dans les rotations de fourrages. En effet, les légumineuses fixent l'azote. Le retranchement d'une année de légumineuses résulte donc en une diminution de la fixation de N pendant la durée globale de la rotation. Cette diminution implique une augmentation des besoins globaux en N comblés par la fertilisation azotée lorsqu'on considère la rotation dans son ensemble. Autrement dit, si on retranche une année peu exigeante en fertilisation azotée, il faut recommencer plus rapidement le cycle de la rotation et globalement, sur un nombre d'années fixe, on doit utiliser plus de fertilisants azotés.

Pour la ferme du Bas-St-Laurent, si aucune adaptation aux rotations n'est faite, les bilans N et P ainsi que celui de la production de GES sont détériorés par les changements climatiques potentiels. Dans ce cas, la majorité des cultures demeurent sur la ferme pour nourrir le troupeau. Il y a donc moins d'exportation de P et de N. L'augmentation substantielle du bilan N peut également être partiellement expliquée par le retranchement d'une année de légumineuses dans les rotations de fourrages. Une autre explication pour la détérioration du bilan N provient de l'augmentation des besoins des cultures à cause des prélèvements supplémentaires. En plus, l'apport supplémentaire d'engrais relié aux prélèvements additionnels de ces minéraux par les cultures a été ajouté aux recommandations d'engrais d'aujourd'hui. Ces dernières ne tiennent actuellement pas compte du rendement des cultures. Cette méthode de calcul a pu également amplifier la problématique au Bas-St-Laurent, où les rendements actuels sont plus faibles alors que la fertilisation est similaire. L'augmentation plus faible des bilans N avec les rotations du Centre-du-Québec utilisée dans le Bas-St-Laurent est pour sa part explicable par l'augmentation substantielle de la vente de récoltes sous forme de maïs-grain et soya (la vente des cultures représentant 14,1 et 13,8 % du bénéfice net pour les scénarios augmentation modérée en GES et augmentation élevée en GES respectivement, alors qu'elle est de 0,1% dans la situation actuelle). Il est toutefois important de mentionner que la charge animale (1,1 unité animale par hectare ou 1,9 hectare/vache) dans cette région est loin d'être problématique et qu'un bon suivi agroenvironnemental permettra certainement de réduire les effets notés dans cette étude. Par contre, il est aussi à noter qu'avec l'introduction des nouvelles rotations, il y a une diminution des cultures pérennes ce qui pourrait augmenter les risques d'érosion des sols. Ces derniers n'ont pas été considérés dans la présente analyse.

Dans tous les scénarios, la principale cause de variation des GES provient de l'augmentation des émissions de N₂O suite à l'application de fertilisants synthétiques pour répondre aux nouveaux besoins des cultures.

Modification dans le choix des rotations et à la composition des rations

Les résultats précédents sont obtenus à partir des choix effectués par le modèle. Le choix des rotations et la composition des rations sont les points majeurs qui influencent les résultats. Les lignes suivantes expliquent les modifications apportées à ces deux secteurs importants de la ferme laitière suite aux modifications apportées par les changements climatiques projetés.

Centre-du-Québec

Les superficies en cultures par rapport au nombre d'animaux ainsi que les rendements intéressants obtenus dans le Centre-du-Québec permettent à la ferme moyenne de bénéficier d'un revenu en vente de maïs et de soya dans le scénario représentant les conditions actuelles. Avec les projections faites sur l'impact potentiel des changements climatiques sur cette ferme moyenne, une part encore plus grande du revenu par la vente de ses cultures serait possible (16,6 % et 16,5 % vs 13,8 %, pour les scénarios augmentation modérée en GES et augmentation élevée en GES vs actuel respectivement) grâce aux augmentations de rendement prévues.

Quant au choix des rotations, la rotation 5 (maïs-grain, ensilage de maïs, soya) du tableau 4.3 compte actuellement pour 67% des superficies de la ferme; le reste provenant de la rotation 4 (orge, ensilage de légumineuses, ensilage de légumineuses, ensilage mélangé, ensilage mélangé). Dans les scénarios futurs, on observe une augmentation de la rotation 5 (7 et 5 unités de pourcentage, pour les scénarios augmentation modérée en GES et augmentation élevée en GES respectivement) en défaveur de la rotation 4 adaptée (une année de moins en ensilage de légumineuses).

Des modifications sont également visibles dans la composition des rations suite aux simulations. En effet, les scénarios de changements climatiques entraînent une augmentation de l'utilisation de l'ensilage de maïs et de légumineuses dans les rations des vaches et une diminution de l'achat d'orge.

Bas-St-Laurent

La situation actuelle de la ferme laitière du Bas-St-Laurent diffère grandement de celle du Centre-du-Québec. En plus de ne pas être en mesure de produire du maïs et du soya, la vente de récoltes ne compte que pour 0,1 % des revenus totaux de la ferme. Ainsi, la presque totalité des cultures sert à nourrir le troupeau laitier. Lorsqu'aucune modification aux cultures dans les rotations n'est faite, les revenus de ventes de récoltes n'augmentent que modestement (1,8 et 2,3 unité de %, pour les scénarios augmentation modérée en GES et augmentation élevée en GES respectivement). Alors que si les rotations du Centre-du-Québec sont adoptées, une augmentation substantielle est observée, avec 14,1 et 13,8 % des revenus provenant de la vente de maïs-grain et de soya.

Dans la situation actuelle, ce sont les rotations 4 (ensilage de maïs, ensilage de légumineuses, ensilage de légumineuses, ensilage mélangé, ensilage mélangé; 132,9 ha) et 2 (blé, orge, canola, orge; 6,1 ha) du tableau 4.3 qui sont retrouvées sur la ferme. Les mêmes rotations demeurent présentes avec les modifications apportées par les prévisions de changements climatiques (100,6 et 103,6 ha pour la rotation 4 adaptée [une année de moins en ensilage de légumineuses] et 38,4 et 35,4 ha pour la rotation 2, pour les scénarios augmentation modérée en GES et augmentation élevée en GES respectivement). Lorsqu'une modification est apportée aux rotations, rendant disponible celles du Centre-du-Québec, c'est la rotation 5 (96,7 et 93,8 ha pour les scénarios augmentation modérée en GES et augmentation élevée en GES respectivement [maïs-grain, ensilage de maïs, soya]) et la rotation 4 adaptée (42,3 et 45,2 ha pour les scénarios augmentation modérée en GES et augmentation élevée en GES respectivement [orge, ensilage de légumineuses, ensilage mélangé, ensilage mélangé]) qui sont utilisées sur la ferme dans le cadre des projections pour les deux scénarios climatiques.

En ce qui a trait à la composition des rations, si les options de rotations restent identiques à la situation actuelle, l'utilisation des ensilages de légumineuses et de maïs est augmentée alors que l'utilisation de l'ensilage mélangé est diminuée. Il ne devient presque plus nécessaire d'acheter de l'orge provenant de l'extérieur de la ferme. Lorsque les rotations permettent la production de maïs-grain et de soya (rotations du Centre-du-Québec), c'est l'augmentation de l'utilisation de l'ensilage de maïs qui est privilégié. Par contre, l'augmentation de la vente de maïs nécessite l'achat de plus d'orge et de foin pour l'alimentation du troupeau. Il est toutefois probable que, si le contexte de production actuelle continue, les producteurs laitiers préfèrent produire la totalité de leur foin sur la ferme plutôt que de devoir en acheter pour pouvoir

vendre plus de maïs. Dans ce contexte, la proportion des revenus provenant de la vente des récoltes serait moindre, mais les changements climatiques potentiels résulteraient quand même en une augmentation du bénéfice net pour ces fermes.

6. Analyse et discussion

6.1 Analyse des résultats de la première évaluation des répercussions technico-économiques et environnementales des changements climatiques sur les fermes laitières québécoises

Les projections des indices agroclimatiques suggèrent de nouvelles opportunités pour le Québec agricole de demain. Bien que les changements climatiques ne soient pas souhaitables d'un point vu global, le climat du Québec est généralement limitant pour les productions végétales ce qui fait en sorte qu'une augmentation de la température pourrait améliorer les rendements de plusieurs cultures ou rendre possible la culture de nouvelles espèces. Selon les changements projetés des indices agroclimatiques, la région du Bas-St-Laurent pourrait avoir, à l'horizon 2050, des conditions similaires à celles actuellement retrouvées au Centre-du-Québec, tandis que cette dernière aurait des conditions de températures et de longueur de saison de croissance comparables à celles du Sud de l'Ontario.

Avec les projections d'augmentation des rendements du maïs, du soya et de la luzerne ainsi que l'introduction possible des cultures du maïs-grain et du soya dans le Bas-St-Laurent, il est réaliste de penser que la performance économique des fermes laitières moyennes du Québec devrait s'améliorer avec les changements climatiques. Ceci principalement dû aux nouvelles opportunités de ventes de récoltes. Le type de ferme influence toutefois l'ampleur des résultats et l'adaptation des systèmes culturaux est essentielle pour pouvoir en profiter. Dans le cas de cette analyse, la ferme moyenne du Centre-du-Québec a non seulement de meilleurs rendements à cause de sa situation géographique, mais en plus ses superficies supérieures favorisent la vente de récoltes. Une ferme laitière qui a un revenu provenant de la vente de récoltes pourrait en effet bénéficier de manière plus importante des changements climatiques puisque la proportion de son revenu provenant de cette activité sera à la hausse. Par contre, dans des conditions comme celles retrouvées au Bas-St-Laurent, où les superficies en cultures sont principalement utilisées pour nourrir le troupeau, les changements climatiques potentiels auraient un effet légèrement négatif si aucune adaptation dans le choix des cultures n'était réalisée. Une adaptation dans le choix des cultures sur la ferme est toutefois plus probable. Il est plus réaliste de considérer l'introduction de cultures mieux adaptées au nouveau contexte climatique, comme le maïs et le soya. Par cette introduction, le bénéfice net des fermes de cette région serait également augmenté avec les changements climatiques, pour se rapprocher de celui du modèle de fermes qu'on retrouve présentement au Centre-du-Québec.

De plus, si les résultats économiques provenant de la production des cultures augmentaient de manière importante au Centre-du-Québec, un phénomène similaire à celui s'étant produit en Montérégie pourrait également s'y produire. Dans cette région agricole, la compétition pour les terres agricoles est de plus en plus grande entre les fermes laitières et celles spécialisées en grandes cultures. Dans ce cas, la durabilité des fermes laitières au Centre-du-Québec pourrait diminuer au profit des régions plus périphériques.

En ce qui a trait à la durabilité environnementale des fermes laitières dans un contexte de changements climatiques, cette analyse permet d'entrevoir une légère détérioration du bilan N pour le Centre-du-Québec et une augmentation de la production de gaz à effet de serre pour les deux régions. Par contre, les bilans P et N se détérioreraient de manière plus importante pour le Bas-St-Laurent si aucune modification aux rotations n'était faite alors que seulement le bilan N serait détérioré avec des rotations permettant la production de maïs-grain. Toutefois, ces modifications seraient probablement évitables grâce à l'adaptation des pratiques aux champs. Cette situation demandera certainement une surveillance plus importante.

L'analyse des résultats obtenus dans cette étude permet également d'entrevoir l'importance que les plantes fourragères pourraient prendre sur les fermes laitières dans le futur. En effet, dans un contexte où la vente des récoltes favorise une augmentation du bénéfice net, l'utilisation de fourrages de qualité et de sous-produits pour l'alimentation du troupeau permettrait de profiter davantage de la situation. En plus, si les prix du maïs et des céréales continuent de se maintenir à des niveaux élevés à cause du contexte mondial, une utilisation optimale des fourrages diminuerait l'impact négatif que cette situation pourrait avoir sur les fermes laitières en limitant l'achat d'aliments pour le troupeau. Les fourrages prendront donc une place importante dans la durabilité des fermes laitières.

Toutefois, certaines espèces traditionnellement utilisées dans les rotations au Québec demanderont des améliorations substantielles ou devront être remplacées dans les rotations des fermes dans un contexte de changements climatiques. En effet, des espèces comme la fléole des prés n'obtiendront plus un rendement compétitif comparativement à des espèces comme la luzerne. Les fourrages de graminées sont des aliments intéressants dans l'alimentation des vaches laitières, entre autres comme source d'énergie. En plus, ils amènent une variété dans les rotations et dans l'alimentation du bétail qu'on ne retrouve pas toujours dans les systèmes laitiers de l'Amérique du Nord. Il serait donc important de trouver des espèces de remplacement à cette espèce fourragère ou encore de l'améliorer pour qu'elle soit plus performante sous des conditions plus chaudes. C'est d'ailleurs une réalité déjà vécue dans le sud de la province où les températures estivales sont déjà plus élevées. Certaines espèces comme la féтуque élevée semblent intéressantes pour remplacer la fléole des prés du point de vue de son analyse chimique, mais elle est parfois décevante au niveau de son appétence pour les vaches. Des recherches additionnelles semblent donc nécessaires à ce niveau.

En ce qui concerne les fourrages, il faudra également se préoccuper d'avantage de la durée de survie de la luzerne. Une analyse plus approfondie de l'impact des risques accrus de dommages hivernaux dus aux changements climatiques (Bélanger et al., 2002) sera nécessaire. En effet, il faudrait revoir la durée optimale des rotations pour les plantes fourragères au Québec en considérant cette nouvelle information. Dans le cadre de cette étude, nous avons simplement enlevé de nos rotations une année de fourrage à forte proportion de légumineuses. Dans ce contexte, le modèle global de ferme a choisi de favoriser la production de cultures pour la vente en achetant du foin pour compenser le manque de fourrages sur la ferme. Il faudrait une analyse plus approfondie avant de conclure quelles rotations sont à favoriser dans un contexte de changement climatique. Ceci est d'autant plus important sachant qu'un chercheur réputé du Wisconsin (Undersander et al., 2011) recommande maintenant aux producteurs de ne faire que deux années de luzerne, puis de labourer le champ pour éviter les trop grandes pertes hivernales. Cette manière de faire

pourrait diminuer les avantages économiques et environnementaux reliés à la culture pérenne de fourrages. Cette recommandation est d'ailleurs faite dans un contexte où la luzerne est implantée en semis pure. Une meilleure analyse des rotations proposées permettrait de fournir des recommandations, ou du moins des suggestions plus éclairées, aux producteurs laitiers dans le contexte des changements climatiques.

Finalement, il n'a pas été possible de considérer les répercussions potentielles des changements climatiques sur les performances animales dans le cadre de ce projet. Il est probable qu'elles soient affectées négativement par les changements climatiques. Il est entre autres connu que des températures élevées en été nuisent à la reproduction (Jordan, 2003) et à la santé des vaches (ex. mammites) (Hammami et al., 2013). De plus, la composition du lait en gras en été a déjà tendance à diminuer, ce qui réduit le prix de vente du lait par les producteurs. Les changements climatiques pourraient accentuer cette problématique (Hammami et al., 2013). Une diminution dans les bénéfices nets actuellement calculés dans cette étude est donc probablement à prévoir avec l'ajout de l'impact des changements climatiques sur les performances animales. Cette analyse mériterait toutefois d'être chiffrée et approfondie.

6.2 Retour sur les connaissances actuelles portant sur la capacité d'adaptation des fermes

Suite à la recension des écrits et aux travaux effectués, on constate que les connaissances sur la capacité d'adaptation des fermes, d'un système agricole, d'un territoire ou d'une région sont encore insuffisantes, voire peu intégrées sur le terrain. C'est dire que la recherche interdisciplinaire et structurante reste à faire, car comme le souligne Magnan (2009), *« n'envisager les options d'adaptation que comme des efforts d'ordre technologique est réducteur, car les liens sociaux (...) peuvent constituer un ciment important tant du point de vue de la réaction aux crises que de celui de leur anticipation. »*

Quelques pistes de recherche, tant pour les fermes laitières que pour les autres secteurs d'activités agricoles, peuvent être identifiées pour améliorer l'approche scientifique de la capacité d'adaptation selon que l'adaptation soit considérée, non pas comme un état statique, mais un processus ou une trajectoire dynamique et évolutive. La recherche sur les différents processus d'adaptation pourrait nous éclairer sur les parcours-types des fermes, les obstacles et les stratégies innovantes empruntées à différents niveaux d'analyse qui sont imbriqués : à la ferme, au niveau du système agricole ou encore au niveau régional. De fait, peu de travaux explorent les diverses dimensions de l'adaptation et l'articulation à différentes échelles.

Il serait pertinent non seulement d'identifier les facteurs qui influencent la capacité d'adaptation des fermes, mais aussi de connaître leurs interactions, car certains facteurs peuvent avoir un effet levier ou, à l'opposé, peuvent s'annuler, voire se contrecarrer. Il serait pertinent de savoir dans quelle mesure les facteurs environnementaux, technico-économiques, sociaux et politiques sont un frein ou un levier à l'adaptation. Tout comme le fait de savoir dans quelle mesure certains d'entre eux peuvent avoir un effet significatif au niveau de la ferme, mais, par exemple, ne pas être adaptés ou réalisables au niveau régional. La connaissance des facteurs pourrait permettre, par la suite, l'évaluation des capacités d'adaptation par le biais de l'identification de critères et d'indicateurs adaptés à la ferme. Cette

étape permettrait de poser un diagnostic plus précis sur leur flexibilité tout en étant des outils d'aide à la décision.

Finalement, le lien entre la capacité d'adaptation et le développement durable (DD) reste à documenter et à démontrer. Il nous semble que, loin d'être une option parmi d'autres, l'adaptation aux changements climatiques des fermes se doit d'être une donnée incontournable de la durabilité et, dans ce contexte, les pistes de recherche sont à explorer.

7. Conclusion et recommandations

Les changements climatiques projetés pourraient apporter de nouvelles contraintes, mais également de nouvelles opportunités dans le Québec agricole de demain. Les projections d'augmentation de rendements pour plusieurs plantes typiquement cultivées sur les fermes laitières du Québec laissent présager principalement de nouvelles opportunités pour celles-ci. Toutefois, lorsque les projections des répercussions potentielles des changements climatiques sont analysées dans un contexte plus global sur des entreprises moyennes du Centre-du-Québec et du Bas-St-Laurent, on réalise que le résultat final dépend des caractéristiques de la ferme et de l'adaptation de ses pratiques. En effet, nos résultats suggèrent que la ferme du Centre-du-Québec, dont les rendements des cultures sont supérieurs et où une partie des revenus de l'entreprise provient déjà de la vente de récoltes, pourrait bénéficier monétairement des changements climatiques. Ces derniers permettraient d'augmenter le revenu provenant de la vente des récoltes ce qui compenserait pour les coûts supplémentaires engendrés par les changements climatiques. Pour sa part, la ferme du Bas-St-Laurent qui n'adapterait pas ses rotations risque de voir ses bénéfices légèrement diminuer dans un contexte de changements climatiques. Les projections des impacts des changements climatiques potentiels sur les indices agroclimatiques pour cette région laissent toutefois entrevoir une adaptation par l'inclusion de cultures comme le maïs-grain et le soya dans cette région. Dans ce contexte, la ferme laitière de la région du Bas-St-Laurent à l'horizon 2050 deviendrait similaire à celle actuellement présente au Centre-du-Québec, non seulement pour ces rendements, mais également pour la vente de récoltes. Cette modification permettrait une augmentation du bénéfice net des entreprises. D'un point de vue environnemental, les changements climatiques pourraient détériorer les bilans N et augmenter la production de gaz à effet de serre. Il sera donc nécessaire de continuer un bon suivi environnemental sur les fermes pour en limiter l'impact négatif.

Un des livrables de ce projet était de fournir des éléments de réflexion sur les besoins en recherche en ce qui a trait à la durabilité des fermes laitières dans un contexte de changements climatiques. Voici les principaux points de réflexion provenant de notre équipe de recherche :

- Effectuer une analyse permettant une meilleure considération des pertes de productivités à l'étable causées par le réchauffement du climat;
- Évaluer quelles plantes fourragères sont les mieux adaptées tant pour leurs caractéristiques dans un contexte de changements climatiques que pour leur appétence;
- Vérifier le meilleur choix de rotations dans un contexte de changements climatiques;
- Documenter et démontrer le lien entre la capacité d'adaptation des fermes laitières et leur durabilité;

- Pousser la recherche en sciences sociales sur la capacité d'adaptation des producteurs laitiers pour faire face aux changements climatiques.

Dans l'analyse de ces problématiques, il apparaît essentiel de conserver une vision globale de l'entreprise. Cette étude a, en effet, bien démontré la nécessité de considérer l'entreprise laitière comme une seule unité de gestion.

Concernant plus spécifiquement l'évaluation des changements climatiques, la prise en compte de deux scénarios de projections climatiques a permis de mettre en branle rapidement les simulations avec N-CyCLES. Toutefois, il s'avère essentiel d'étoffer cette évaluation en basant l'analyse sur un ensemble plus complet de projections climatiques. Cela permettrait de mieux quantifier les marges d'incertitudes pour les divers paramètres de l'étude. Un scénario moyen avec des marges d'incertitudes définies à partir d'un nombre suffisant de scénarios climatiques pourrait être utilisé pour définir de manière plus adéquate, et en considérant l'incertitude, les données à entrer dans le modèle d'optimisation de la ferme laitière. Il serait aussi intéressant d'appliquer des scénarios de type probabiliste pour différents horizons futurs. En plus des indices agroclimatiques déjà calculés, il serait possible d'inclure une analyse des paramètres associés aux risques hivernaux (couvert de neige, cycles gel-dégel), aux événements de précipitations intenses, aux risques de sécheresse ainsi qu'aux performances animales évalués de façon cohérente sur le même ensemble de données. Il en ressortirait un portrait intégré des conditions climatiques futures réellement adapté aux caractéristiques de la production laitière au Québec.

Il était également convenu qu'une réflexion serait réalisée sur la forme que pourrait prendre un outil diagnostique pour les producteurs laitiers, qui leur permettrait de mieux cerner les points à améliorer sur leur entreprise et ainsi améliorer ses chances de durabilité dans un contexte de changements climatiques. Suite à cette réflexion, il nous paraît plus réaliste de développer un outil qui se baserait sur l'outil Delta (Bélanger et al., 2009), qui permet le diagnostic de la durabilité des fermes laitières, mais qui serait indépendant de ce dernier. Certaines thématiques nous semblent pertinentes à développer par rapport au développement d'un tel outil. En voici une liste non exhaustive:

- Motivations face à l'adaptation;
- Vision d'ensemble de la ferme et capacité à agir si de nouvelles opportunités se présentent;
- Situation financière adéquate (endettement raisonnable) permettant d'absorber des charges supplémentaires en lien avec l'adaptation aux changements climatiques et de réagir en cas d'événements météorologiques ponctuels;
- Suivi agroenvironnemental adéquat;
- Cultures et rotations adaptées;
- Utilisation optimale des fourrages;
- Ouverture face à l'utilisation de sous-produits ou de moulées commerciales les utilisant;
- Mesures d'atténuation de la température pour les vaches lors de grandes chaleurs l'été.

Lors du développement d'un tel outil, il apparaît également essentiel de développer des stratégies réfléchies d'adaptation aux changements climatiques pour orienter correctement les producteurs suite à l'analyse effectuée.

En conclusion, les résultats de cette étude démontrent l'importance d'une adaptation pour faire face aux changements climatiques sur les fermes laitières du Québec. Il semble donc primordial de poursuivre la recherche sur les impacts et l'adaptation des fermes laitières québécoises dans un contexte de changements climatiques. Il pourrait également devenir opportun de développer un outil permettant aux producteurs de mieux cerner leurs forces et leurs faiblesses en lien avec les problématiques potentielles reliées aux changements climatiques et pouvant affecter la durabilité de leur ferme. Finalement, compte tenu du peu d'informations disponibles sur le sujet, il apparaît essentiel de développer les connaissances en ce qui a trait à la capacité d'adaptation des producteurs laitiers pour mieux faire face à cette problématique.

8. Références

Adams, R.M., B.H. Hurd et J. Reilly. 1999. Agriculture and global climate change: a review of impacts to U.S. agricultural resources; Arlington (Virginie). Pew Center on Global Climate Change. 36 p. disponible en ligne : http://www.c2es.org/docUploads/env_argiculture.pdf (consulté le 8 août 2012)

Agriculture et Agroalimentaire Canada. 1998. Adaptation aux changements et gestion des risques : Profil des attitudes et des comportements des producteurs agricoles canadiens. Disponible en ligne : http://www3.agr.gc.ca/apps/publicentrale/pub_view-pub_affichage-eng.cfm?CFID=2022264&CFTOKEN=22887462&publication_id=9463F (consulté le 10 juin 2012).

André P. et C. Bryant. 2001. Évaluation environnementale des stratégies d'investissement des producteurs agricoles de la région de Montréal en regard des changements climatiques. Rapport de recherche. Université de Montréal. Fonds d'Action sur les Changements Climatiques aux Canada. 98 p.

Antle, J.M. 2009. Agriculture and the food system. Adaptation to climate change. Adaptation. Domestic adaptation publications, Policy program, Ressources for the future (RFF), Washington DC. Disponible en ligne: <http://www.rff.org/rff/documents/RFF-Rpt-Adaptation-Antle.pdf> (Consulté le 14 mars 2012).

Atlas agroclimatique du Québec. 2012. Atlas agroclimatique du Québec Un outil d'aide à la décision et de sensibilisation. Disponible en ligne : <http://dev.agrometeo.org/atlas/index/true> (consulté le 10 décembre 2012).

Audet, R. H. Côté, D. Bachand et A. Mailhot. 2012. Atlas agroclimatique du Québec. Évaluation des opportunités et des risques agroclimatiques dans un climat en évolution. Rapport final. Disponible en ligne : http://www.ouranos.ca/media/publication/155_RapportAudetetal2012.pdf (consulté le 20 mars 2013)

Bachand, C. 2008. Le portrait agroenvironnemental des entreprises laitières. Dans : Guide Les bovins laitiers : 1383-1384. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. Québec.

Beaudet, P., I. Beaudin, A. Michaud et M. Giroux. 2008. Le transport du phosphore. Fiche technique no 3, Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. Québec, Qc. 11 p. disponible en ligne : <http://www.craaq.qc.ca/Publications?p=32&l=fr&ldoc=1997>. Consulté le 4 juillet 2012.

Bélanger G., T. Kunelius, D. McKenzie, Y. Papadopoulos, B. Thomas, K. McRae, S. Fillmore et B. Christie. 1999. Fall cutting management affects yield and persistence of alfalfa in Atlantic Canada. Can. J. Plant Sci. 79: 57-63

Bélanger, G. et A. Bootsma. 2002. Impact des changements climatiques sur l'agriculture au Québec. 65^e congrès de l'ordre des agronomes du Québec. Changements climatiques : comprendre pour mieux agir. Disponible en ligne : <http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/Belanger.pdf> (consulté le 8 mai 2012).

Bélanger, G., P. Rochette, Y. Castonguay, A. Bootsma, D. Mongrain et D.A.J. Ryan. 2002. Climate change and winter survival of perennial forage crops in eastern Canada. *Agronomy Journal* 94 :1120-1130.

Bélanger, V., G. Allard, A. Vanasse, D. Parent, D. Pellerin et D. Larochelle. 2009. Diagnostic de durabilité à la ferme : oui c'est possible avec DELTA ! Symposium des bovins laitiers, CRAAQ, Drummondville, 29 octobre.

Bertrand, A., D. Prévost, F.J. Bigras, R. Lalande, G.F. Tremblay, Y. Castonguay et G. Bélanger. 2007. Alfalfa response to elevated atmospheric CO₂ varies with the symbiotic rhizobial strain. *Plant and Soil* 301: 173-187.

Bertrand, A., G. F. Tremblay, S. Pelletier, Y. Castonguay et G. Bélanger. 2008. Yield and nutritive value of timothy as affected by temperature, photoperiod and time of harvest. *Grass Forage Sci.* 63 :421-432.

Bootsma, A., S. Gameda, D.W. McKenney, P. Schut, H.N. Hayhoe, R. de Jong et E.C. Huffman. 2001. Adaptation de la production agricole au changement climatique dans le Canada atlantique. Rapport final de l'équipe du projet A214 du Fonds d'action pour le changement climatique. Disponible en ligne : <http://onerc.developpement-durable.gouv.fr/system/files/Adaptation%20de%20la%20production%20agricole%20au%20changement%20climaticu.pdf> (consulté le 5 décembre 2012)

Bootsma, A., D. Anderson et S. Gameda. 2004. Impacts potentiels du changement climatique sur les indices agroclimatiques dans les régions du sud de l'Ontario et du Québec. Bulletin technique Contribution du CRECO no 03-284. Disponible en ligne : http://www.agrireseau.qc.ca/agroenvironnement/documents/bootsma_ON_QC_ind.pdf (consulté le 10 décembre 2012).

Bootsma, A., S. Gameda et D.W. McKenney. 2005. Potential impacts of climate change on corn, soybeans and barley yields in Atlantic Canada. *can. J. Plant Sci.* 85: 345-357.

Brassard, J. et B. Singh. 2008. Impacts of climate change and CO₂ increase on agricultural production and adaptation options for Southern Quebec, Canada. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change* (2008) 13:241–265.

Bryant, C., B. Singh, P. Thomassin, et L. Baker. 2007. Vulnérabilités et adaptation aux changements climatiques au Québec au niveau de la ferme: leçons tirées de la gestion du risque et de l'adaptation à la variabilité climatique par les agriculteurs. Rapport final – Ouranos. Disponible en ligne: http://www.ouranos.ca/media/publication/149_Bryant1.pdf (consulté 14 mars 2012)

Bullock, M.S., F.J. Larney, R.C. Izaurralde et Y. Feng. 2001. Overwinter changes in wind erodibility of clay loam soils in Southern Alberta. *Soil Science Society of America Journal* 65 : 423-430.

Centre canadien d'information laitière (CCIL). L'industrie laitière canadienne en chiffres. Disponible en ligne : http://www.dairyinfo.gc.ca/pdf/dairy_at_a_glance.pdf (consulté le 1 mars 2013)

Centre canadien d'information laitière (CCIL). 2012. Étables laitières par catégorie au Canada 2011 (par province). http://www.infolait.gc.ca/index_f.php?s1=dff-fcil&s2=farm-ferme&page=barn (Consulté 5 juin 2012).

Chase, L.E. 2005. Climate change impacts on dairy cattle. Climate change of agriculture : Promoting practical and profitable responses, Fact sheet 3. Cattle. <http://www.climateandfarming.org/pdfs/FactSheets/III.3Cattle.pdf>.

Chen, C.C. et B.A. McCarl. 2001. An investigation of the Relationship between pesticide usage and climate change. *Climatic Change* 50: 475–487.

Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioac, A. Chen, S. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.T. Kwon, R. Laprise, V. Magana Rueda, L. Mearns, C.G. Menendez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr et P. Whetton. 2007. « Regional Climate Projections », dans *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis*, contribution du Groupe de travail I au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Salomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignot M, Miller HL (éd.), Cambridge University Press, Cambridge et New York, 2007, pp. 847-940.

Christensen, J.H., F. Boberg, O.B. Christensen et P. Lucas-Picher. 2008. On the need for bias correction of regional climate change projections of temperature and precipitation. *Geophysical Research Letters*, 35.

Commission canadienne du lait. 2013. Production. Disponible en ligne : <http://www.cdc-ccl.gc.ca/CDC/index-fra.php?id=3801> (consulté 28 mars 2013).

Conseil des académies canadiennes. 2013. L'eau et l'agriculture au Canada : vers une gestion durable des ressources en eau. Le comité d'experts sur la gestion durable de l'eau des terres agricoles du Canada, Conseil des académies canadiennes.

Conseil des productions végétales du Québec (CPVQ). 2000. Les pratiques de conservations des sols en grandes cultures : pourquoi s'y intéresser? *dans* Guide des pratiques de conservation en grandes cultures. Module 1. CPVQ. Québec, Qc.

Cypel, A. 2012. Une sécheresse historique aux Etats-Unis. *Le Monde*, 18 juillet 2012. Disponible en ligne : http://www.lemonde.fr/planete/article/2012/07/18/une-secheresse-historique-aux-etats-unis_1735196_3244.html (Consulté 20 juillet 2012)

Dairy one – USA. CORN SILAGE Crop year: 05/01/2009 through 04/30/2010. Disponible en ligne: http://www.dairyone.com/Forage/FeedComp/Main_GetResults.asp (consulté le 4 janvier 2013).

Dairy one – USA. CORN SILAGE Crop year: 05/01/2010 through 04/30/2011. Disponible en ligne: http://www.dairyone.com/Forage/FeedComp/Main_GetResults.asp (consulté le 4 janvier 2013).

Dairyland laboratories Inc. 2011 Forage summaries. Disponible en ligne: https://www.dairylandlabs.net/pages/interpretations/forage_2011.php (consulté le 4 janvier 2013).

Dairyland laboratories Inc. 2012 Forage summaries. Disponible en ligne: https://www.dairylandlabs.net/pages/interpretations/forage_2012.php (consulté le 4 janvier 2013).

ÉcoRessources. 2011. Les retombées économiques de l'industrie laitière au Canada. Rapport Final. Les Producteurs Laitiers du Canada. Disponible en ligne : http://www.go5quebec.ca/fr/pdf/Etude_du_groupe_EcoRessources.pdf (consulté le 13 août 2012)

El Maayar, M., B. Singh, P. Andre, C.R. Bryant et J. P. Thouez. 1997. The effects of climatic change and CO₂ fertilisation on agriculture in Quebec. *Agr. Forest Meteorol.* 85:193-208.

El Watan. 2012. Forte hausse des prix des céréales : le diagnostic. 16 août 2012. http://www.elwatan.com/actualite/forte-hausse-des-prix-des-cereales-le-diagnostic-16-08-2012-182216_109.php (consulté le 18 août 2012).

FAO. 2008. Climate change adaptation and mitigation in the food and agriculture sector. Technical Background Document from the Expert Consultation held on 5 to 7 March 2008. Rome. Italy. 17 p.

Farmer, B. 2010. La production laitière au Québec en 2010. Défis et solutions. Disponible en ligne : www.agrireseau.qc.ca/bovinslaitiers/documents/farmer.pdf (consulté le 24 janvier 2012).

Fédération des producteurs de lait du Québec. 2007. Synthèse provinciale de la réflexion sur l'avenir du secteur laitier québécois. Disponible en ligne : http://www.caaag.qouv.qc.ca/userfiles/File/Memoires%20nationales%20Quebec/50-Q-Federation_producteurs_lait_Annexe3.pdf (consulté le 20 mai 2011).

Fédération des producteurs de lait du Québec. 2010. Rapport annuel 2009. Disponible en ligne : <http://www.lait.org/fichiers/RapportAnnuel/?id=FPLQ-2009> (consulté le 9 septembre 2012).

Finger, R., P. Lazzarotto et P. Calanca. 2010. Bio-economic assessment of climate change impacts on managed grassland production. *Agricultural systems* 103:1272-1282.

Fraisse, C.W., N.E. Breuer, D. Zierden et K.T. Ingram. 2009. From climate variability to climate change : challenges and opportunities to extension. *Journal of Extension* 47: 1-10.

Frenck, G., L. van der Linden, T. N. Mikkelsen, H. Brix et R. B. Jørgensen. 2012. Increased [CO₂] does not compensate for negative effects on yield caused by higher temperature and [O₃] in *Brassica napus* L. *Europ. J. Agronomy* 35:127– 134.

Fuhrer, J. 2003. Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 97: 1-20.

Gagnon, A.-E., M. Roy et A. Roy. 2011. Impacts directs et indirects des changements climatiques sur les ennemis des cultures. Disponible en ligne : http://www.agrireseau.qc.ca/lab/documents/Revue%20de%20littérature%20CC_phyto.pdf (consulté le 4 juillet 2012).

Groupe interministériel de la République française. 2010. Évaluation du coût des impacts du changement climatique et de l'adaptation en France. Rapport de la seconde phase. Partie III: Rapports des groupes sectoriels. 231 pp.

Hammami, H., J. Bormann, N. M'hamdi, H. H. Montaldo, N. Gengler. 2013. Evaluation of the heat stress effects on production traits and somatic cell score of Holsteins in a temperate environment. *J. Dairy Sci.* 96:1844-1855.

Hartigan, J.A. et M.A. Wong. 1979. A k-mean clustering algorithm. *Applied Statistics*, 28 :100-108.

Hartwell Allen, L et K.J. Boote. 2000. Crop Ecosystem Responses to Climatic Change: Soybean. Pages 133-155 dans *Climate change and global crops productivity*. K.R Reddy et H.F Hodges (éd.). Mississippi State University, Mississippi, États-Unis.

Hatfield, J. L., M. Ryan, S. Archer et D. Lettenmaier. 2008. The Effects of Climate Change on Agriculture, Land Resources, Water Resources, and Biodiversity. A Report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research. Washington, DC., USA. 2:20-74.

Hatfield, J. L., K. J. Boote, B. A. Kimball, L. H. Ziska, C. Izaurralde, D. Ort et A. Thomson. 2011. Climate Impacts on Agriculture: Implications for Crop Production. *Agron. J.* 103:351–370.

Heltberg, R., H. Gitay et R. Prabhu. 2010. Community-based adaptation : Lessons from the development marketplace 2009 on adaptation to climate change. *Social Development Papers. Social Dimensions of Climate Change No. 122*, June 2010, 63 p.

Hogan, A., H.L. Berry, S. Peng Ng et A. Bode. 2011. Decisions made by farmers that relate to climate change. 78 pp. Ed Australian Government; Rural industries research and development corporation. Kingston, Australia.

Hutchinson, M.F. 2004. ANUSplin Version 4.3: User Guide, The Australian National University, Centre for Resource and Environmental Studies, Canberra, Australia. (<http://cres.anu.edu.au/outputs/anusplin.php>).

Institut de la statistique du Québec et MAPAQ. 2012. Profil sectoriel de l'industrie bioalimentaire au Québec. Édition 2011. 129 p. disponible en ligne : www.stat.gouv.qc.ca/publications/ind_bioalimentaire/prof_bio.htm (Consulté le 6 août 2012)

International Food & Agribusiness Management Association, 2011. Resilience of New Zealand dairy farms in a turbulent environment : Definition and measurement. 21st Annual World Symposium, Frankfurt, Allemagne, 25 p. Disponible en ligne: https://www.ifama.org/events/conferences/2011/cmsdocs/2011SymposiumDocs/311_Symposium%20P_aper.pdf (Consulté le 8 août 2012)

International Dairy Federation (IDF). 2010. A common carbon footprint approach for dairy. The IDF guide to standard life cycle assessment methodology for the dairy sector. IDF Bulletin 445. International Dairy Federation, Brussels, Belgium. Disponible en ligne : <http://idf-lca-guide.org/Files/media/Documents/445-2010-A-common-carbon-footprint-approach-for-dairy.pdf> (consulté le 10 octobre 2012).

Izaurralde, R.C., J.A. Morgan, A.M. Thomson, P.A. Fay, H.W. Polley et J.L. Hatfield. 2011. Climate Impacts on Agriculture: Implications for Forage and Rangeland Production *Agron. J.* 103:371–381.

Jordan, E. R. 2003. Effects of heat stress on reproduction. *J. Dairy Sci.* 86(E. Suppl.): E104-E114.

Kutcher, H.R., J. S. Warland et S. A. Brandt. 2010. Temperature and precipitation effects on canola yields in Saskatchewan, Canada. *Agricultural and Forest Meteorology* 150:161–165.

Lafleur, G. et M.-A. Allard. 2006. Enquête sur la santé psychologique des producteurs agricoles du Québec. Rapport final présenté à la Coop Fédérée. Août 2006. 89 p.

Lepage, M-P, L. Bourdages et G. Bourgeois. 2011. Interprétation des scénarios de changements climatiques afin d'améliorer la gestion des risques pour l'agriculture. Centre de Référence en Agriculture et Agroalimentaire du Québec CRAAQ. Québec, Canada. Disponible en ligne : <http://www.craaq.qc.ca/Publications-du-CRAAQ/interpretation-des-scenarios-de-changements->

[climatiques-afin-d_ameliorer-la-gestion-des-risques-pour-l_agriculture/p/PAGR0102](#) (Consulté le 20 mars 2012).

Levallois, R., J.-P. Perrier et M. Sissoko. 2009. L'agriculteur de demain: entrepreneur, gestionnaire ou producteur? http://www.agrireseau.qc.ca/era/documents/Levallois_Raymond.pdf (consulté le 7 juin 2011).

Logan, T., I. Charron, D. Chaumont, D. Houle. 2011. Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise. Ouranos et MRNF. 55p +annexes. http://www.ouranos.ca/media/publication/162_AtlasForet2011.pdf

Magnan, A. 2009. Proposition d'une trame de recherche pour appréhender la capacité d'adaptation au changement climatique. Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement, Vol. 9 Num. 3 mis en ligne le 14 décembre 2009. Disponible en ligne : <http://vertigo.revues.org/9189> (consulté le 26 mars 2013).

Mailhot, A., S. Duchesne, G. Talbot, A.N. Rousseau et D. Chaumont. 2008. Approvisionnement en eau potable et en santé publique : projections climatiques en matière de précipitations et d'écoulements pour le sud Québec. Rapport de recherche. Disponible en ligne : http://www.ouranos.ca/media/publication/35_Rapport_Mailhot_sante_2008.pdf (consulté le 8 avril 2013).

Myers, P. 2008. Farmer responses to weather shocks and stresses in Manitoba : A resilience approach. Thesis - Master of Natural Resource Management. Natural Resources Institute. University of Manitoba. 138 p.

Nagy, C. 2012. Les effets des changements climatiques sur les secteurs agricole et forestier. Parlement du Canada. <http://www.parl.gc.ca/Content/SEN/Committee/372/agri/power/nagy-f.htm>. Consulté le 25 janvier 2012.

Nakićenovič, N. et R. Swart. 2000. Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate *Change*. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York, NY, États Unis d'Amérique. 599 p.

Nardone, A., B. Ronchi, N. Lacetera, M. S. Ranieri, U. Bernabucci. 2010. Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems. *Livestock Science* 130 : 57-69.

Nearing, M.A., F.F. Pruski et M.R. Oneal. 2004. Expected climate change impacts on soil erosion rates: A review. *J. Soil Water Conserv.* 59: 43-50.

Nolet, J. 2005. La compétitivité des fermes laitières québécoises : quand on se compare est-ce qu'on se console ? Conférence présentée dans le cadre du Colloque de l'entrepreneur gestionnaire. 24 novembre 2005, Drummondville. 25 p.

Office Fédéral de l'Agriculture (OFAG). 2011. Stratégie climat pour l'agriculture. Protection du climat et adaptation au changement climatique pour une agriculture et une économie alimentaire suisses durables. Confédération Suisse. Département Fédéral de l'Économie DFE. Referenz/Aktenzeichen : 2011-05-26/138/fed.

OMAFRA. Maïs fourrager superficie et production, par comté, 2011. Ontario ministry of Agriculture and Food. <http://www.omafra.gov.on.ca/english/stats/crops/ctyfcorn11.htm> (page consultée le 24 janvier 2012).

Ouranos. 2010. Savoir s'adapter aux changements climatiques. Rédaction : C. DesJarlais, M. Allard, D. Bélanger, A. Blondlot, A. Bouffard, A. Bourque, D. Chaumont, P. Gosselin, D. Houle, C. Larrivée, N. Lease, A.T. Pham, R. Roy, J.-P. Savard, R. Turcotte, C. Villeneuve. Montréal. 128 p.

Patterson, D.T., J.K. Westbrook, R.J.V. Joyce, P.D. Lingren et J. Rogasik. 1999. Weeds, insects, and diseases. *Climatic Change* 43(4) : 711-727.

Paustian, K., E.T. Elliott, K. Killian et B.A. Stewart. 1998. Modeling soil carbon in relation to management and climate change in some agroecosystems in central North America. Dans : *Soil Processes and the Carbon Cycle*, Lal R, Kimble JM, Follett RF (éd.), Boca Raton (Floride), CRC Press Inc., pp. 459-471.

Piva, A., A. Bertrand, G. Bélanger, Y. Castonguay et P. Séguin. 2013. Growth and physiological response of timothy to elevated CO₂ and temperature under contrasted nitrogen fertilization. *Crop Sci.* 53:704-715.

Plummer, D.A., D. Caya, A. Frigon, H. Côté, M. Giguère, D. Paquin, S. Biner, R. Harvey et R. de Elia. 2006. Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM. *Journal of Climate* 19(13): 3112-3132.

Robert, L. et J. Breault. 2008. La valorisation des fumiers et lisiers de bovins laitiers. Dans : *Guide Les bovins laitiers* : 1427-1441. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. Québec.

Ressources Naturelles Canada. 2007. Impacts sur l'agriculture. Disponible en ligne: www.adaptation.mcan.gc.ca/perspective/agri_3_f.php (Consulté le 24 janvier 2012).

Rötter, R. et S.C. van de Geijn. 1999. Climate change effects on plant growth, crop yield and livestock. *Climatic Change* 43(4) : 651-681.

Rötter, R.P., T. Palosuo, N.K. Pirttioja, M. Dubrovsky, T. Salo, S. Fronzek, R. Aikasalo, M. Trnka et A. Ristolainen. 2012. What would happen to barley production in Finland if global warming exceeded 4°C? A model-based assessment. *Europ. J. Agronomy* 35: 205– 214.

Rotz, C. A., M. S. Corson, D. S. Chianese, F. Montes, S. D. Hafner et C. U. Coiner. 2012. The Integrated Farm System Model, Reference Manual version 3.6. <http://www.ars.usda.gov/main/docs.htm?docid=8519#> (Consulté le 18 juin 2013).

Seguin, B. 2007. Impact du changement climatique et adaptation de l'agriculture. INRA, Avignon.

Sérès, C. 2010. L'agriculture de montagne face au changement climatique : exposition des territoires et marges de manœuvre des exploitations laitières. *Courrier de l'Environnement de l'INRA*. No. 59. pp. 19-32. Statistique Canada. 2006. Recensement de l'agriculture 2006.

Statistique Canada. 2006. Recensement de l'agriculture 2006. Disponible en ligne: <http://www.statcan.gc.ca/pub/95-629-x/2007000/4182409-fra.htm> (consulté le 6 juin 2012).

Statistique Canada. 2012. Tableau 002-0065. Enquête financière sur les fermes, structure financière selon les types d'exploitations, moyenne, par ferme. Disponible en ligne: <http://www5.statcan.gc.ca/cansim/pick-choisir?lang=fra&p2=33&id=0020065> (consulté le 28 août 2012).

Tarleton, M. et D. Ramsey. 2008. Farm-Level Adaptation to Multiple Risks: Climate Change and Other Concerns. *J. Rural Commun. Develop.* 3: 47-63.

Thornton, P.K., J. van de Steeg, A. Notenbaert et M. Herrero. 2009. The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries : A review of what we know and what we need to know. *Agricultural Systems* 101 : 113-127.

Thornton, P.K. 2010. Livestock production: recent trends, future prospects. *Phil. Trans. R. Soc. B.* 365(1554): 2853-2867.

Thorsen, S. M. et M. Hoglind. 2010. Assessing winter survival of forage grasses in Norway under future climate scenarios by simulating potential frost tolerance in combination with simple agroclimatic indices. *Agricultural and Forest Meteorology* 150:1272-1282.

Tostovrsnik, N., M. Morris, R. Eckard, G. O'Leary, C. Pettit, P. Fitzsimons, B. Christy, J. Sandall, L. Soste et V. Sposito. Climate change impacts and adaptation responses for South West Victoria's primary industries. Victorian Resources Online. Statewide. A DPI VCCAP Discussion Paper. Disponible en ligne: http://vro.dpi.vic.gov.au/dpi/vro/vrosite.nsf/pages/climate_vccap_climate-change-impacts-and-adaptation-responses (consulté le 30 août 2012).

Undersander, D., D. Cosgrove, E. Cullen, C. Grau, M. E. Rice, M. Renz, C. Sheaffer, G. Shewmaker et M. Sulc. 2011. Alfalfa management guide. Ed. ASA/CSSA/SSSA. Madison, WI. 60 pp.

Urban, O. 2003. Physiological impacts of elevated CO₂ concentration ranging from molecular to whole plant responses. *Photosynthetica* 41:9-20.

USDA. Crops productions 2011 summary. United States Department of Agriculture. <http://www.usda.gov/nass/PUBS/TODAYRPT/cropan12.txt> (page consultée le 24 janvier 2012)

USDA. Wisconsin – Crop Production. United States Department of Agriculture - National Agricultural Statistics Service. http://www.nass.usda.gov/Statistics_by_State/Wisconsin/index.asp#.html (page consultée le 24 janvier 2012)

Wall, E., B. Smit et J. Wandel. 2004. Canadian Agri-food Sector Adaptation to Risks and Opportunities from Climate Change. Canadian Climate Impacts and Adaptation Research Network position paper, October, 68 p.

Weigel, H. et R. Manderscheid. 2012. Crop growth responses to free air CO₂ enrichment and nitrogen fertilization: Rotating barley, ryegrass, sugar beet and wheat. *Europ. J. Agronomy* 43: 97-107.

Wolfe, D.W. 2012. Climate change impacts on northeast agriculture : overview. Climate Change and Agriculture : Promoting Practical and Profitable Responses. <http://www.climateandfarming.org/pdfs/FactSheets/Impacts.pdf> (consulté le 24 janvier 2012).

Wreford, A. et W. N. Adger. 2010. Adaptation in agriculture: historic effects of heat waves and droughts on UK agriculture. *Int. J. Agric. Sust.* 8:278-289.

Annexes

Annexe 1: Formulation des indicateurs agroclimatiques utilisés

1. Définition des variables quotidiennes

T_{min_j} : Température minimale du jour j en °C
 T_{max_j} : Température maximale du jour j en °C
 T_{moy_j} : Température moyenne du jour j en °C

$$T_{moy_j} = \frac{T_{min_j} + T_{max_j}}{2}$$

P_j : Total des précipitations du jour j en mm

2. Indices agroclimatiques

2.1. Date du dernier gel printanier

Définition : Le dernier jour suivant l'hiver où la température minimale quotidienne est inférieure ou égale à un seuil de température gélive T_{gel} . La recherche du dernier jour de gel se fait entre le 1^{er} janvier (jour julien 1) et le 31 juillet (jour julien 212) inclusivement

Unités : Date ou jour julien

Formule :

$$DGP_{T_{gel}} = \max\{j | T_{min_j} \leq T_{gel}\}$$

dans laquelle

$$T_{gel} = \{-2 \text{ °C}, 0 \text{ °C}\}$$
$$j = 1, \dots, 212$$

2.2. Date du premier gel automnal

Définition : Le premier jour de l'automne où la température minimale quotidienne est inférieure ou égale à un seuil de température gélive T_{gel} . La recherche du premier jour de gel se fait entre le 1^{er} août (jour julien 213) et le 31 décembre (jour julien 365) inclusivement.

Unités : Date ou jour julien

Formule :

$$PGA_{T_{gel}} = \min\{j | T_{min_j} \leq T_{gel}\}$$

dans laquelle

$$T_{gel} = \{-2 \text{ °C}, 0 \text{ °C}\}$$
$$j = 213, \dots, 365$$

2.3. Longueur de la saison sans gel

Définition : Le nombre de jours entre le dernier gel printanier et le premier gel automnal selon un seuil de température gélive T_{gel} .

Unités : Jours

Formule :

$$LSSG_{T_{gel}} = PGA_{T_{gel}} - DGP_{T_{gel}}$$

dans laquelle

$$T_{gel} = \{-2 \text{ }^{\circ}\text{C}, 0 \text{ }^{\circ}\text{C}\}$$

2.4. Fréquence des températures supérieures à 30°C

Définition : Nombre de jours dans une année (occurrences annuelles) où la température maximale quotidienne est supérieure à 30°C.

Unités : jours

Formule :

$$OCA_{TSUP30} = \sum_{j=1}^{365} TSUP30_j$$

dans laquelle

$$TSUP30_j = \begin{cases} 1 & \text{si } T_{max_j} > 30 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ 0 & \text{si } T_{max_j} \leq 30 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{cases}$$

2.5. Date de début de la saison de croissance

Définition : Le début de la saison de croissance (*DSC*) suivant un hiver correspond au 5^{ième} jour d'une période de 5 jours consécutifs où la moyenne mobile pondérée des températures moyennes quotidiennes (*TMMP5*) est supérieure à 5.5°C.

Unités : Date

Formule :

$$DSC = \min\{j | TMMP5_j > 5.5 \text{ }^{\circ}\text{C}\}$$

dans laquelle

$$TMMP5_j = \frac{T_{moy_{j-4}} + 4T_{moy_{j-3}} + 6T_{moy_{j-2}} + 4T_{moy_{j-1}} + T_{moy_j}}{16}$$

$$j = 1, \dots, 365$$

2.6. Date de fin de la saison de croissance

Définition : La fin de la saison de croissance (*DSC*) correspond au 5^{ième} jour d'une période de 5 jours consécutifs où la moyenne mobile pondérée des températures moyennes quotidiennes (*TMMP5*) est supérieure à 5.5°C pour la dernière fois suivant un été.

Unités : Date

Formule :

$$FSC = \max\{j | TMMP5_j > 5.5 \text{ }^\circ\text{C}\}$$

dans laquelle

$$TMMP5_j = \frac{Tmoy_{j-4} + 4Tmoy_{j-3} + 6Tmoy_{j-2} + 4Tmoy_{j-1} + Tmoy_j}{16}$$

$$j = 1, \dots, 365$$

2.7. Longueur de la saison de croissance

Définition : Le nombre de jours entre le début et la fin de la saison de croissance.

Unités : Jours

Formule :

$$LSC = FSC - DSC$$

2.8. Cumul des degrés-jours d'avril à octobre

Définition : Cumul, entre le 1er avril (jour julien 91) et le 31 octobre (jour julien 304), de l'excédent de la température moyenne quotidienne par rapport à un seuil de température T_{base} .

Unités : Degrés jours

Formule :

$$DJ = \sum_{j=91}^{304} DJ_j$$

dans laquelle

$$DJ_j = \max[0, (Tmoy_j - T_{base})]$$

$$T_{base} = \{0 \text{ }^\circ\text{C}, 5 \text{ }^\circ\text{C}, 10 \text{ }^\circ\text{C}\}$$

2.9. Date de début de cumul des unités thermiques maïs

Définition : Suivant l'approche proposée par le groupe de travail « UTM » formé dans le cadre du projet de l'atlas agroclimatique, on débute le cumul des UTM à la première occurrence d'une moyenne mobile sur 5 jours de la température moyenne quotidienne ($TMM5$) supérieure ou égale à 12.8°C . La date du début du cumul des UTM (DDC_UTM) correspond à la 5^{ème} journée de cette fenêtre mobile. La toute première fenêtre de 5 jours considérée débute avec la médiane pour la période 1971-2000 (ou 2041-2070) des dates de dernier gel printanier par rapport à une température gélive de 0°C (MED_DGPO). Le calcul de la date du dernier gel printanier est présenté à la section 2.1.

Unités : Date

Formule :

$$DDC_UTM = \min\{j | TMM5_j \geq 12.8^{\circ}\text{C}\}$$

dans laquelle

$$TMM5_j = \frac{T_{moy\ j-4} + T_{moy\ j-3} + T_{moy\ j-2} + T_{moy\ j-1} + T_{moy\ j}}{5}$$

$$j \geq MED_DGPO + 4$$

2.10. Date de fin de cumul des unités thermiques maïs

Définition : Suivant l'approche proposée par le groupe de travail « UTM » formé dans le cadre du projet de l'atlas agroclimatique, la fin du cumul des UTM (DFC_UTM) correspond au premier gel automnal par rapport à une température gélive de -2°C ($PGA_{-2^{\circ}\text{C}}$).

Unités : Date

Formule :

$$DFC_UTM = PGA_{-2^{\circ}\text{C}}$$

dans laquelle

$$PGA_{-2^{\circ}\text{C}} = \min\{j | T_{min_j} \leq -2^{\circ}\text{C}\}$$

$$j = 213, \dots, 365$$

2.11. Cumul des unités thermiques maïs

Définition : La somme des UTM journalières (UTM_j) sur une période comprise entre la date de début (DDC_UTM) et la date de fin (DFC_UTM) mentionnées précédemment. Le calcul des UTM journalières est basé sur la formule de Bootsma et al., 1999.

Unités : UTM

Formule :

$$UTM = \sum_{j=DDC_UTM}^{DFC_UTM} UTM_j$$

dans laquelle

$$UTM_j = \frac{1}{2} (Ymax_j + Ymin_j)$$

$$Ymax_j = \begin{cases} 3.33 (Tmax_j - 10) - 0.084(Tmax_j - 10)^2 & \text{si } Tmax_j > 10 \text{ }^\circ\text{C} \\ 0 & \text{si } Tmax_j \leq 10 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases}$$

$$Ymin_j = \begin{cases} 1.8 (Tmin_j - 4.44) & \text{si } Tmin_j > 4.44 \text{ }^\circ\text{C} \\ 0 & \text{si } Tmin_j \leq 4.44 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases}$$

2.12. Cumul des degrés-froid durant la période d'endurcissement (potentiel d'endurcissement)

Définition : Cumul des degrés-froids nets ($DF5$) journaliers entre le 1 août (jour julien 213) et la fin de la période d'endurcissement (FPE) correspondant à la première occurrence d'une température minimale inférieure ou égale à -10°C . À noter que les $DF5_{j=FPE}$ ne sont pas inclus dans le cumul. Les degrés froids nets proviennent de l'écart entre les degrés froids ($CDD5$) et les degrés jours de croissance ($DD5$). À chaque jour, on vérifie si le cumul des degrés-froids nets ($CDF5$) devient négatif et on le remet à zéro le cas échéant.

Unités : Degrés froids

Formule :

$$CDF5 = \sum_{j=213}^{FPE-1} \{CDF5_j | CDF5_j = \max[0, (CDF5_{j-1} + DF5_j)]\}$$

initialisée au 1 août avec,

$$CDF5_{j=213-1} = 0$$

et dans laquelle

$$FPE = \min\{j | T_{min_j} \leq -10^\circ C \text{ et } j \geq 213\}$$

$$DF5_j = CDD5_j - DD5_j$$

$$CDD5_j = \begin{cases} 0 & \text{si } T_{moy_j} \geq 5^\circ C \\ |T_{moy_j} - 5| & \text{si } T_{moy_j} < 5^\circ C \end{cases}$$

$$DD5_j = \begin{cases} T_{moy_j} - 5 & \text{si } T_{moy_j} > 5^\circ C \\ 0 & \text{si } T_{moy_j} \leq 5^\circ C \end{cases}$$

2.13. Cumul des degrés-jours au cours de la période froide (perte d'endurcissement)

Définition : Cumul des degrés-jours base 0°C pendant la saison froide comprise entre de la première (*DHIV*) et la dernière (*FHIV*) occurrence d'une température minimale de -15°C. *DHIV* et *FHIV* sont en jours juliens.

Unités : Degrés jours

Formule :

$$DJO_HIV = \sum_{j=DHIV}^{FHIV} \max(0, T_{moy_j})$$

dans laquelle

$$DHIV = \min\{j | T_{min_j} \leq -15^\circ C\}$$

$$FHIV = \max\{j | T_{min_j} \leq -15^\circ C\}$$

2.14. Cumul des précipitations d'avril à octobre

Définition : Somme des précipitations journalières entre le premier avril (jour julien 91) et le 31 octobre (jour julien 304).

Unités : mm

Formule :

$$P = \sum_{j=91}^{304} P_j$$

2.15. Cumul des précipitations pendant la saison de croissance

Définition : Somme des précipitations journalières entre le début (*DSC*) et la fin de la saison de croissance (*FSC*) inclusivement.

Unités : mm

Formule :

$$P = \sum_{j=91}^{304} P_j$$

2.16. Cumul des précipitations moins évapotranspiration potentielle (P-ETP) de mai à octobre

Définition : Cumul de l'indice hydrique P-ETP défini comme étant la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle journalières entre le 1^{er} mai et le 31 octobre inclusivement. L'évapotranspiration potentielle est calculée selon la formule de Baier et Robertson (1965). Elle est fonction des températures (*FTmax* et *FTmin*) en °F ainsi que du rayonnement extraterrestre (*Re*) en MJ/m²/min. Ce rayonnement est calculé à l'aide de la constante solaire (*GSC*), de la déclinaison solaire (*ds*, sans unité), de la correction d'excentricité (*dr*, sans unité), de l'angle horaire (Ω) en radians et de la latitude (*LAT*) en degrés du lieu considéré (station ou point de grille d'un modèle climatique).

Unités : mm

Formule :

$$C_{PETP} = \sum_{j=1 \text{ mai}}^{31 \text{ oct}} P_j - ETP_j$$

dans laquelle

$$ETP_j = 0.094[-87.03 + 0.928FTmax_j + 0.933(FTmax_j - FTmin_j) + 0.0486Re]$$

$$FTmax_j = \frac{9}{5}Tmax_j + 32$$

$$FTmin_j = \frac{9}{5}Tmin_j + 32$$

$$Re = \frac{1440}{\pi} GSC dr \left[\Omega \sin\left(\frac{\pi LAT}{180}\right) \sin(ds) + \cos\left(\frac{\pi LAT}{180}\right) \cos(ds) \sin(\Omega) \right]$$

$$dr = 1 + 0.33 \left[\cos\left(\frac{2\pi J}{365}\right) \right]$$

$$ds = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi J}{180} - 1.39\right)$$

J = la date en jours juliens

$$GSC = 0.082 \text{ MJ/m}^2/\text{min}$$

2.17. Cumul des précipitations moins évapotranspiration potentielle pendant la saison de croissance

Définition : Cumul de l'indice hydrique P-ETP défini comme étant la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle journalières entre le début (DSC) et la fin (FSC) de la saison de croissance inclusivement. L'évapotranspiration potentielle est calculée selon la formule de Baier et Robertson (1965). Elle est fonction des températures ($FTmax$ et $FTmin$) en °F ainsi que du rayonnement extraterrestre (Re). Ce rayonnement est calculé à l'aide de la constante solaire (GSC), de la déclinaison solaire (ds , sans unité), de la correction d'excentricité (dr , sans unité), de l'angle horaire (Ω) en radians et de la latitude (LAT) en degrés du lieu considéré (station ou point de grille d'un modèle climatique).

Unités : mm

Formule :

$$C_PETP_{SC} = \sum_{j=DSC}^{FSC} P_j - ETP_j$$

dans laquelle

$$ETP_j = 0.094[-87.03 + 0.928FTmax_j + 0.933(FTmax_j - FTmin_j) + 0.0486Re]$$

$$FTmax_j = \frac{9}{5}Tmax_j + 32$$

$$FTmin_j = \frac{9}{5}Tmin_j + 32$$

$$Re = \frac{1440}{\pi} GSC dr \left[\Omega \sin\left(\frac{\pi LAT}{180}\right) \sin(ds) + \cos\left(\frac{\pi LAT}{180}\right) \cos(ds) \sin(\Omega) \right]$$

$$dr = 1 + 0.33 \left[\cos\left(\frac{2\pi J}{365}\right) \right]$$

$$ds = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi J}{180} - 1.39\right)$$

J = la date en jours juliens

$$GSC = 0.082 \text{ MJ/m}^2/\text{min}$$

Annexe 2: Sélection des projections de changement climatique à l'aide de l'analyse par grappes

L'analyse par grappes considère un ensemble de M points dans un espace à N dimensions, regroupe ceux-ci en un certain nombre G de grappes, et identifie le point le plus près du centroïde de chacune d'elles. Pour la présente étude, les $M=15$ points correspondent aux projections climatiques du tableau 4.5, les $N=12$ dimensions sont définies par les changements dans les divers indices agroclimatiques du tableau 4.4 et $G=2$ grappes car nous avons besoin de sélectionner deux scénarios de changements projetés.

Une étape préalable à l'analyse par grappes consiste à normaliser les distributions, c'est-à-dire à rendre comparables d'une dimension à l'autre les étalements de la distribution. La normalisation d'une valeur consiste à prendre son score- z décrit par l'équation suivante :

$$z(x)=(x-\mu(X))/\sigma(X) \quad (\text{éq. A2.1})$$

où x représente l'une des MN valeurs, $z(x)$ correspond au score- z de x , X est le vecteur comprenant les M valeurs de l'indicateur considéré (incluant forcément x), et où $\mu(X)$ et $\sigma(X)$ représentent respectivement la moyenne et l'écart-type du vecteur X . Par exemple, si pour l'indicateur de code 1 (changement de la date du dernier gel printanier en base 0°C) les 15 modèles donnent une distribution de Δ ayant une moyenne de -9.6 jours et un écart-type de 2.1. jours, une valeur de -12.2 jours aura un score- z de -1.2, reflétant le fait que ce point se retrouve quelque part entre 1 et 2 écarts-types en dessous de la moyenne. La figure A1, qui combine la région de Centre du Québec et celle du Bas Saint-Laurent, montre que les scores- z obtenus pour la distribution varient grosso modo entre -2 et +2, ce qui rend les valeurs dans les différentes dimensions (différents indices) comparables. La simulation MRC de NARCCAP, désignée par un astérisque (*), permet de réaliser qu'un point peut se retrouver à la marge de la distribution dans une dimension (indicateur de code 10) et près de la moyenne dans une autre (indicateur de code 2). Les carrés dénotent les projections de changement provenant de modèles globaux, alors que les cercles identifient celles du MRCC.

L'analyse par grappe a été appliquée sur la matrice $M \times N$ des scores- z , et le résultat est illustré par l'utilisation de la couleur sur la figure A1 le bleu correspondant à une grappe de 8 points et le rouge à l'autre grappe (de 7 points). La procédure est basée sur l'approche des k -means proposée par Hartigan et Wong (1979). Elle est décrite en détails dans Logan et al. (2011). À partir de la position des points d'une grappe, un centroïde (l'équivalent d'un centre de masse, avec tous les points considérés avec une masse identique) peut être établi, et le point le plus près du centroïde est choisi comme représentant de la grappe. Le marqueur de chacun des 2 points ainsi trouvés apparaît rempli sur la figure A1. Ce sont deux scénarios du modèle global CGCM3.1 qui ont été choisis par la méthode, soit le membre 1 basé sur le scénario de GES SRES B1 ainsi que le membre 3 basé sur le scénario de GES SRES A1B.

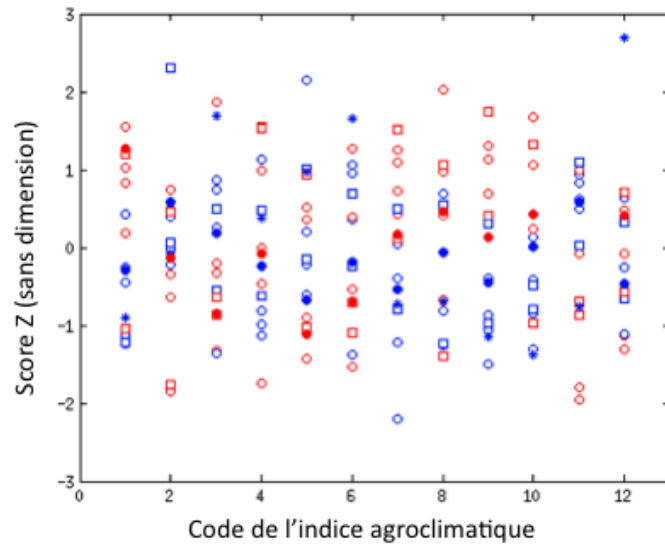


Figure A1: Résultats de l'analyse par grappe combinant tous les points de la grille à 10 km inclus dans les régions du Centre du Québec et du Bas Saint-Laurent. Les scores Z de chacune des projections sont obtenus indépendamment pour chaque indice en soustrayant la moyenne et en divisant par l'écart-type de la distribution. L'analyse des scores Z, réalisée sur la matrice $M \times N$ correspondant aux $M=15$ projections climatiques du tableau 4.5 pour les $N=12$ dimensions du tableau 4.4, permet d'identifier deux grappes (rouge et bleue) dont les centres sont identifiés dans chaque dimension par un cercle plein de la couleur correspondante. Les autres projections sont représentées par des symboles vides : les MCG par des cercles, les MRCC4.2.3 par des carrés et le MRC NARCCAP par un astérisque.