

## RAPPORT FINAL

### **Choix des graminées fourragères et des mesures d'atténuation du stress thermique des vaches sur les fermes laitières québécoises dans un contexte de changements climatiques**

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

Véronique Ouellet, Ph. D., U. Laval  
Sébastien Fournel, Ph. D., U. Laval  
Camille Payant, U. Laval  
Guillaume Jégo, Ph. D., AAC  
Gilles Bélanger, D. Sc., AAC  
Gaëtan Tremblay, Ph. D., AAC  
Patrick Grenier, M. Sc., Ouranos  
Victor Cabrera, Ph. D. U. of Madison  
Doris Pellerin, agr., Ph. D., U. Laval  
Annick Bertrand, Ph. D., AAC  
Stéphane Godbout, Ph. D., IRDA  
René Roy, Valacta

*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.....	4
2. Contexte / objectifs .....	5
3. Méthodologie, résultats, analyse et discussion pour chacun des objectifs spécifiques .....	8
a. Résumé des principaux résultats du projet intitulé Amémoration des graminées fourragères dans un contexte de changements climatiques et financé par l’action concertée FRQNT-Novalait-MAPAQ .....	8
b. Identifier les principales mesures d’adaptation aux changements climatiques mises en œuvre sur les fermes laitières au Québec et répertorier ce qui se fait ailleurs en Amérique du Nord en matière d’atténuation des stress thermiques. (Objectif spécifique 3) .....	10
i. Enquête sur la perception des producteurs laitiers québécois par rapport aux changements climatiques	10
ii. Revue de littérature sur les pratiques utilisées pour réduire les risques de stress thermiques pour les vaches laitière dans un climat continental humide .....	14
c. Calculer des projections de rendements potentiels des principales associations d’espèces suites aux changements climatiques en complémentarité avec l’essai au champ visant à identifier des alternatives à la fléole des prés cultivée en association avec la luzerne (Objectif spécifique 1) .....	16
d. Évaluer l’impact potentiel des changements climatiques sur les résultats technico-économiques et agroenvironnementaux (bilan N et P, production de GES) des fermes laitières québécoises suite à l’adoption de nouvelles associations fourragères (Objectif spécifique 2) ...	25
e. Évaluer l’augmentation des risques de stress thermiques et leurs effets sur les performances des vaches laitières au Québec dans un contexte de changements climatiques (Objectif spécifique 4) .....	33
i. Est-ce que les conditions actuelles des étables québécoises peuvent causer un stress thermique? ...	34
ii. Les impacts actuels du stress thermique sur les performances de production des vaches laitières québécoises .....	35
iii. L’évolution des effets du stress thermique dans un contexte de changements climatiques .....	38
f. Évaluer l’impact potentiel de l’évolution future des performances des vaches laitières en lien avec les stress thermiques avec ou sans la mise en place de mesures d’atténuation sur les résultats technico-économiques des fermes laitières québécoises. (Objectif spécifique 5 adapté) .....	45
4. Conclusion et recommandations .....	49
5. Références.....	52
Annexes.....	55

## 1. Introduction

La production laitière occupe une place importante en agroalimentaire au Québec. Elle obtient d'ailleurs la première place en ce qui a trait aux productions agricoles et représente plus du quart des recettes monétaires agricoles de la province. L'adaptation aux changements climatiques des fermes laitières est donc essentielle si le secteur veut maintenir sa place prépondérante dans le portrait agricole québécois. Certains étés sont plus difficiles que d'autres en agriculture. Des étés avec de grandes chaleurs, et les répercussions qu'elles ont eues sur les vaches, ou des étés avec des sécheresses, et leurs répercussions sur les cultures, sont frais à la mémoire des producteurs laitiers québécois. On ne peut toutefois pas tirer de conclusion à moyen et long termes à partir de quelques années, mais la considération d'une période de temps significative en conjugaison avec des modèles de prévision, permet de mieux comprendre l'évolution du climat. Ainsi, c'est ce regard à long terme, qui permet aux climatologues d'affirmer qu'il y a présentement des changements climatiques. Pour le territoire agricole du Québec, c'est-à-dire la portion sud de la province, les projections climatiques laissent présager des augmentations de températures pouvant aller de 2 à 4 °C d'ici 2050 et de 4 à 7°C d'ici 2100, plus de précipitations hivernales, allant de 0 à 36 %, et pas de changements significatifs dans les précipitations estivales par rapport à la période 1971-2000 (Ouranos, 2015). Ces variations se répercuteront sur les performances agricoles, dans certains cas de façon positive et dans d'autres cas de façon négative. Du côté positif, on peut, entre autres, s'attendre à des augmentations de la longueur de la saison de croissance et des températures, permettant une amélioration des rendements de certaines cultures comme le maïs, le soya ou certaines espèces fourragères (Charbonneau et al., 2013). En contrepartie, certaines maladies ou insectes pourraient être plus présents (Gagnon et al., 2013). Les précipitations risquent d'être moins bien réparties en cours d'été et des événements météorologiques plus intenses sont anticipés (ex. orages et pluies intenses mais de courte durée; Ouranos, 2015). Finalement, la survie hivernale de certaines cultures pérennes, comme la luzerne, sera plus difficile à cause d'une augmentation des redoux hivernaux jumelée à une diminution de la couverture de neige (Bélanger et al., 2002). Il est donc pertinent de s'attarder à cette problématique des changements climatiques afin de la comprendre et surtout de mieux s'outiller pour s'y adapter.

Ainsi, ce projet s'est penché sur l'impact et sur l'adaptation aux changements climatiques pour les fermes laitières québécoises. La ferme laitière regroupe plusieurs sous-systèmes interreliés. Des modifications dans un de ces sous-systèmes peuvent avoir des répercussions directes sur les autres. Il est donc essentiel de considérer ces interactions lors de l'analyse de facteurs tels que les changements climatiques. Cette analyse s'est d'abord attardée à la perception actuelle des producteurs laitiers sur l'impact des changements climatiques sur leur ferme et l'adaptation qu'ils pensent réaliser pour s'attaquer à cette problématique au cours des prochaines années. Les connaissances publiées dans la littérature ont ensuite été consultées dans le but de bien connaître l'information actuellement disponible sur les stratégies de réduction des stress thermiques pour les vaches en lactation et de vérifier l'intérêt de les utiliser dans un contexte de climat continental humide comme nous retrouvons au Québec. Par la suite, les données climatiques projetées ont été jumelées aux résultats de notre projet en contexte climatique actuel dans le but d'évaluer l'impact potentiel des changements climatiques sur les cultures présentes sur les fermes laitières, en incluant une évaluation de différents mélanges fourragers; le but étant d'être en mesure de donner des recommandations à moyen et long termes sur les graminées fourragères à privilégier sur les fermes laitières. Les dernières parties du projet visaient à vérifier l'impact des stress

thermiques sur les performances des vaches laitières au Québec en climat actuel et futur et à évaluer l'intérêt de mettre en place des stratégies d'atténuation. La vérification en climat actuel de l'impact sur les performances laitières des vaches n'était initialement pas prévue, mais est devenue essentielle suite au sondage sur la perception des producteurs laitiers effectué en 2016 qui montrait que les stress thermiques n'étaient pas perçus comme une problématique actuelle au Québec. Démontrer la problématique nous a paru essentiel avant de penser pouvoir transférer des résultats sur l'adaptation à celui-ci. Il a ensuite été possible d'explorer les impacts futurs grâce aux projections climatiques, puis, finalement, d'évaluer l'intérêt économique d'adopter des stratégies d'adaptation pour les réduire.

## **2. Contexte / objectifs**

La fléole des prés est la graminée fourragère la plus populaire au Québec et elle est souvent cultivée en association avec la luzerne. Elle est adaptée aux conditions fraîches et humides (Baker et Jung, 1968; Bertrand et al., 2008) et est très tolérante aux hivers québécois (Bélanger et al., 2006). Les changements climatiques prévus incluront des températures plus élevées, une plus grande accumulation de degrés-jours (Qian et al., 2013; Ouranos, 2015), et des changements dans la distribution des précipitations (Qian et al., 2010; Ouranos, 2015). Notre analyse de l'impact des changements climatiques sur la fléole des prés au Canada a démontré qu'une plus longue saison de croissance permettra une récolte additionnelle (Jing et al., 2013). Aussi, dus à un déficit hydrique plus important après la première coupe, le regain et la digestibilité de la fléole des prés seront réduits alors que sa teneur en fibres NDF sera augmentée. Ces résultats suggèrent que l'avantage actuel de la fléole des prés sur les autres graminées fourragères risque d'être atténué. Notre première évaluation de l'impact potentiel des changements climatiques sur les fermes laitières du Québec nous a aussi permis de constater que les fourrages tiendront une place importante dans la capacité d'adaptation des entreprises à cette nouvelle réalité (Moreno et al., 2013).

La luzerne, quant à elle, devrait profiter des changements climatiques au cours de la saison de croissance (Moreno et al., 2013), mais l'utilisation de luzernières pures demanderait des rotations fourragères plus courtes étant donné que la survie hivernale de cette espèce sera réduite sous les conditions climatiques futures (Bélanger et al., 2002). La culture de graminées pures exige l'utilisation de fertilisants azotés et l'ajout d'aliments plus riches en protéines dans les rations. L'option des associations fourragères demeurera donc d'actualité, mais demandera l'utilisation d'espèces fourragères mieux adaptées aux changements climatiques.

Ce projet est lié à une recherche financée dans le cadre de l'entente de partenariat en production et en transformation laitières FRQNT/Novalait/MAPAQ qui traite de cette problématique dans le climat actuel et dont les objectifs sont : 1) Évaluer les graminées alternatives à la fléole des prés cultivée en association avec la luzerne; 2) Évaluer l'impact du remplacement de la fléole des prés par la fétuque élevée conservée sous forme d'ensilage préfané ou demi-sec dans les rations de vaches en lactation; 3) Évaluer l'impact du choix d'espèces pures et d'associations binaires à base de luzerne dans les rotations avec ou sans gestion intensive sur la rentabilité des fermes; et 4) Développer une méthode de sélection et produire du germoplasme pouvant être utilisé pour développer des cultivars de fléole des prés à regain élevé. Il était toutefois intéressant de bonifier ces premiers résultats pour, d'une part, valider que les options de graminées fourragères

proposées seront toujours valables dans le climat futur et d'autre part, évaluer l'impact potentiel des changements climatiques sur l'intérêt économique et agroenvironnemental de la modification du choix des espèces fourragères sur la ferme laitière considérée dans son ensemble.

Sur les fermes laitières, l'évolution du climat n'aura pas seulement un impact sur les plantes fourragères. L'environnement thermique dans lequel évolue la vache laitière peut exercer un effet majeur sur ses performances (Kadzere et al., 2002) et, ultimement, sur celles de l'industrie laitière. Le stress thermique se définit comme étant une situation pendant laquelle l'animal n'est pas en mesure de dissiper une quantité adéquate de chaleur, soit produite ou absorbée, afin de maintenir l'équilibre thermique (Bernabucci et al., 2014). En production laitière, la pression entraînée par le stress thermique sur les vaches est présentement un des plus grands défis associés au climat dans plusieurs régions du monde et le deviendra vraisemblablement au Canada avec les changements climatiques anticipés dans les prochaines années. En effet, les plages de valeurs plausibles d'augmentation future dans la durée des vagues de chaleur et dans la fréquence de nuits chaudes au Québec (Ouranos, 2015) pourraient impliquer un impact significatif sur les animaux.

Plusieurs études ont démontré que l'index de température et d'humidité (ITH) peut servir d'indicateur pour quantifier et évaluer le stress thermique chez la vache laitière, et ce, autant dans les régions à climat tropical que dans les régions à climat tempéré (Ravagnolo et Misztal, 2000; Dunn et al., 2014; Schüller et al., 2014). Il combine l'effet de la température ambiante et de l'humidité relative, qui sont deux composantes majeures des situations de stress thermique. À ce sujet, Schüller et al. (2014) ont démontré que la formule développée par Kendall et al. (2009) [ $ITH = (1,8 \times TA + 32) - ((0,55 - 0,0055 \times HR) \times (1,8 \times TA - 26))$ ], où TA représente la température ambiante et HR l'humidité relative] peut être utilisée autant en climat tropical ou subtropical qu'en climat tempéré pour évaluer le stress thermique chez la vache laitière. Il est reconnu par plusieurs auteurs (Armstrong, 1994; West, 2003) que le stress thermique survient chez la vache lorsque le ITH dépasse 72 (p. ex : 25°C avec 50 % d'humidité relative ou 23°C avec 80 % d'humidité relative). Ce seuil mérite toutefois d'être validé sous notre climat et en fonction de notre système de production.

Il a aussi été démontré que le stress thermique provoque une diminution de la prise alimentaire, un déséquilibre hormonal en plus de provoquer une augmentation de la perméabilité intestinale (Baumgard et Rhoads, 2013). En plus de la production laitière, plusieurs processus sont affectés, avec des effets sur les performances de reproduction de la vache laitière en modifiant la durée de l'œstrus (Gangwar et al., 1965), la qualité du colostrum (Nardone et al., 1997), les fonctions utérines (Collier et al., 1982a, 1982b), le statut endocrinien (Howell et al., 1994), ainsi que le développement et la croissance des follicules (Wilson et al., 1998b). Une étude menée en climat tempéré par Schüller et al. (2014) a démontré que le taux de conception des vaches laitières diminue continuellement à partir d'un ITH de 41 avec chaque augmentation d'unité de ITH moyen le jour de l'insémination. Les auteurs ont également rapporté que seulement une heure d'exposition à un ITH supérieur ou égal à 73 la journée de l'insémination est nécessaire pour observer une diminution du taux de conception de l'ordre de cinq unités de pourcentage.

Il est également intéressant de mentionner que les vaches acclimatées aux températures froides démontrent de plus grandes réactions (production de chaleur, taux de respiration) au stress thermique que les vaches acclimatées aux températures chaudes (Robinson et al., 1986). À ce sujet, Schüller et al. (2014) mentionnent que les vaches en climat tempéré peuvent être plus

affectées par le stress thermique puisque les températures et le ITH des climats tempérés fluctuent quotidiennement plus que les températures et le ITH des climats tropicaux. Ainsi, les vaches seraient potentiellement exposées à plus de variations quotidiennes en climat tempéré. La production laitière influence également l'impact du stress thermique. Il est mentionné que les vaches d'aujourd'hui sont sensibles aux stress thermiques que celles d'autrefois, et ce, principalement parce que les vaches modernes produisent significativement plus de lait qu'autrefois (Schüller et al., 2014). À cet effet, Berman (2005) a démontré qu'une production laitière plus élevée (45 vs 35 L/j) augmente la sensibilité au stress thermique en diminuant le seuil de température de 5 °C. Les vaches laitières québécoises, étant reconnues pour leur excellente génétique, pourraient par le fait même être aussi plus susceptibles aux stress thermiques.

D'autres facteurs peuvent également moduler les stress thermiques subis par le bétail comme l'espèce et la taille des animaux, le type d'étable et ses caractéristiques (p. ex. 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 (St-Pierre et al., 2003). La première évaluation de l'impact potentiel des changements climatiques sur les fermes laitières du Québec que nous avons réalisée n'avait pu considérer les impacts potentiels directs sur les animaux. Le présent projet a permis de pousser plus loin l'analyse de cet aspect de la problématique associé aux changements climatiques.

Ainsi, les objectifs du projet étaient de :

**Objectif général :** Évaluer la répercussion potentielle des changements climatiques sur les recommandations d'associations fourragères ainsi que sur les performances des vaches dans les fermes laitières du Québec.

**Objectifs spécifiques :**

1. Calculer des projections de rendements potentiels des principales associations d'espèces fourragères suite aux changements climatiques en complémentarité avec un essai au champ en cours visant à identifier des alternatives à la fléole des prés cultivée en association avec la luzerne;
2. Évaluer l'impact potentiel des changements climatiques sur les résultats technico-économiques et agroenvironnementaux (bilan N et P, production de GES) des fermes laitières québécoises suite à l'adoption de nouvelles associations fourragères;
3. Identifier les principales mesures d'adaptation aux changements climatiques mises en œuvre sur les fermes laitières au Québec et répertorier ce qui se fait ailleurs en Amérique du Nord en matière d'atténuation des stress thermiques;
4. Évaluer l'augmentation des risques de stress thermiques et leurs effets sur les performances des vaches laitières au Québec dans un contexte de changements climatiques;
5. Évaluer l'impact potentiel de l'évolution future des performances des vaches laitières en lien avec les stress thermiques avec ou sans la mise en place de mesures d'atténuation sur les résultats technico-économiques et agroenvironnementaux (bilan N et P, production de GES) des fermes laitières québécoises;
6. Évaluer l'intérêt de la mise en commun de mesures d'adaptation aux changements climatiques sur les résultats technico-économiques et agroenvironnementaux (bilan N et P, production de GES) des fermes laitières québécoises.

### **3. Méthodologie, résultats, analyse et discussion pour chacun des objectifs spécifiques**

Nous avons jugé que pour faciliter la compréhension, il était souhaitable de présenter la méthodologie, les résultats, l'analyse et la discussion par objectif. Ainsi, les prochaines sections reprendront chacun des objectifs précédents. Il est à noter que certaines sections incluent un travail plus large que l'objectif initial. Aussi, l'objectif 5 a été modifié pour inclure, en plus des performances laitières prévues initialement, l'aspect économique. Et finalement, l'objectif 6 a été intégré à la section conclusion et recommandations plutôt que de faire l'objet d'une section indépendante.

#### **a. Résumé des principaux résultats du projet « Amélioration des graminées fourragères dans un contexte de changements climatiques » financé par l'action concertée FRQNT-Novalait-MAPAQ**

Avec les changements climatiques, la production fourragère au Québec devra s'adapter. La fléole des prés est une espèce performante en climat frais et son utilisation est de plus en plus remise en question. Il faut identifier une alternative à cette graminée fourragère, qui sera efficace sous les conditions du Québec. L'objectif du projet était de déterminer la graminée fourragère à privilégier dans un contexte de changements climatiques. Pour ce faire, nous avons: 1) Évalué les graminées alternatives à la fléole des prés cultivée en association avec la luzerne; 2) Évalué l'impact du remplacement de la fléole des prés par la fétuque élevée, en espèce pure ou en association avec la luzerne et conservée sous forme d'ensilage préfané ou demi-sec, sur les performances des vaches en lactation; 3) Évalué l'impact du choix d'espèces pures et d'associations binaires à base de luzerne dans les rotations sur la rentabilité des fermes; 4) Développé une méthode de sélection et produit du germoplasme pouvant être utilisé pour développer des cultivars de fléole des prés à regain élevé.

Les résultats des essais en parcelles ont montré que le mélange luzerne-fléole des prés performe relativement bien à travers le Québec sous notre climat actuel, et que le mélange luzerne-fétuque des prés a une performance similaire en termes de rendement et de valeur nutritive. Les mélanges luzerne-fétuque élevée et luzerne-brome des prés, malgré leur valeur nutritive inférieure, demeurent toutefois des alternatives envisageables au mélange luzerne-fléole des prés dans notre contexte climatique actuel puisqu'ils ont des rendements saisonniers comparables, que leurs persurances sont bonnes au cours des trois premières années de production, et que les productions de lait estimées par hectare associées à ces mélanges sont similaires à celle du mélange luzerne-fléole des prés. Les mélanges incluant les cultivars de festulolium et de ray-grass vivace étudiés ont eu de faibles rendements parce que la contribution de la graminée au rendement était faible, due à une plus faible survie hivernale, ce qui a causé de plus faibles productions de lait estimées à l'hectare. Les cultivars utilisés de ces deux espèces de graminées ne semblent donc pas être des alternatives intéressantes à la fléole des prés au Québec. Pour ce qui est du régime de récolte, récolter les mélanges binaires luzerne-graminée au stade début floraison de la luzerne favorise la persurance des mélanges, leur rendement en matière sèche, et la production de lait estimée par hectare de culture fourragère.

Les résultats de simulation au niveau de la ferme vont dans le même sens que ceux obtenus en parcelles bien que la fétuque élevée pourrait avoir un léger avantage sous certains contextes de production. En effet, les associations binaires précédentes ayant montré le plus de potentiel (fléole des prés, fétuque élevée, fétuque des prés, brome des prés) ont été testées par modélisation pour deux fermes types du Québec. Pour la ferme typique d'une région au climat frais, c'est l'association luzerne/fétuque élevée qui semble permettre d'obtenir les meilleurs résultats au niveau du bénéfice net, soit 1 695 \$ de plus par année que l'association luzerne/fléole des prés. Cela s'explique par le fait que les rendements supérieurs de cette association permettent d'optimiser l'utilisation des fourrages au détriment des concentrés dans les rations, ce qui entraîne une diminution des coûts d'achats d'aliments. Dans une ferme typique d'une région au climat chaud, le bénéfice net varie peu lorsque les associations fourragères sont changées, ce qui indique que toutes les espèces à l'étude semblent adaptées à cette région.

La fléole des prés est l'une des graminées fourragères pérennes les plus résistantes à l'hiver. Cependant, son manque de tolérance au stress hydrique limite son regain lors de la saison de croissance. Une collection, formée de 81 populations de fléole des prés provenant de 19 pays et de trois cultivars témoins provenant du Québec, a été évaluée afin de déterminer le rendement en matière sèche (MS) à chaque coupe lors de deux années de production à Lévis. Le rendement du regain en deuxième coupe a varié entre 0,4 et 3,0 tonnes MS/hectare entre les 81 populations et les trois cultivars avec une moyenne de 1,8 tonne MS/hectare. Les 20 populations de fléole des prés ayant les regains en deuxième coupe les plus élevés ont été sélectionnées et ressemées en parcelles à Saint-Augustin-de-Desmaures afin d'évaluer le rendement en matière sèche, la digestibilité et la concentration en NDF du fourrage récolté au stade début épiaison. Les populations et les plants ayant un meilleur regain lors des stress hydriques et une bonne valeur nutritive ont alors été identifiés. Suite à ces expériences, nous sommes en mesure de déterminer si une relation existe entre l'origine géographique d'une population et sa tolérance au stress hydrique, et d'identifier du matériel génétique pouvant être utilisé afin d'améliorer le regain de la fléole des prés sous nos conditions climatiques.

Tel que démontré par le volet végétal, la fétuque élevée montre un potentiel intéressant pour remplacer la fléole des prés. Par contre, certains producteurs lui reprocheraient un manque d'appétence. La phase animale de ce projet avait donc comme objectif d'évaluer l'effet du remplacement de la fléole des prés par la fétuque élevée, offerte en espèce pure ou en mélange avec la luzerne, sur la prise alimentaire et la production des vaches en lactation. Ce projet visait aussi à vérifier l'effet de la méthode de conservation de la fétuque élevée, soit en ensilage préfané (35% MS) ou demi-sec (55% MS), sur les performances de production des vaches laitières. Les résultats de notre expérience ont confirmé la possibilité d'utiliser la fétuque élevée en remplacement de la fléole des prés dans les rations des vaches puisque la production laitière, la prise alimentaire, la teneur en matière grasse du lait et le lait fourrager sont similaires, que la ration soit composée de l'une ou l'autre de ces deux graminées. Aussi, nos résultats indiquent qu'il est avantageux d'offrir les graminées en association avec la luzerne plutôt qu'en espèce pure, et ce, parce que la prise alimentaire, la production laitière et la production de lait fourrager sont augmentées de 8, 6 et 18 %, respectivement. Ceci dit, le lait corrigé pour l'énergie était similaire lorsque les vaches consommaient les espèces pures ou en association. Finalement, malgré une baisse de 8 % de la prise alimentaire, la fétuque élevée servie sous forme d'ensilage demi-sec permet des performances laitières équivalentes à la fétuque élevée servie sous forme d'ensilage

préfané. La fétuque élevée conservée sous forme d'ensilage demi-sec n'est donc pas contre-indiquée.

Cette étude a aussi permis de confirmer l'intérêt d'utiliser des associations graminée-luzerne dans les rations. Les résultats de cette étude sont bien accueillis par les producteurs laitiers de la province, leur permettant de faire des choix mieux éclairés.

**b. Identifier les principales mesures d'adaptation aux changements climatiques mises en œuvre sur les fermes laitières au Québec et répertorier ce qui se fait ailleurs en Amérique du Nord en matière d'atténuation des stress thermiques. (Objectif spécifique 3)**

**i. Enquête sur la perception des producteurs laitiers québécois par rapport aux changements climatiques**

Pour identifier les principales mesures d'adaptation aux changements climatiques mises en œuvre sur les fermes laitières québécoises, une enquête auprès des producteurs laitiers a été réalisée au cours de l'été 2016. Cette enquête touchait les perceptions des producteurs vis-à-vis les changements climatiques au Québec. Elle a été réalisée à partir d'un questionnaire comportant un ensemble de questions ouvertes et à choix de réponses. L'enquête administrée via le web a permis de recueillir les réponses complètes de 194 producteurs issus de douze des dix-sept régions administratives de la province. L'enquête a été réalisée avec comme objectifs de : (1) vérifier les pratiques actuelles et prévues pour gérer les risques climatiques pour les cultures fourragères; (2) vérifier les pratiques d'atténuation des stress thermiques actuellement en place et envisagées pour les conditions futures; (3) vérifier la perception des producteurs face aux changements climatiques. Cette enquête a permis de mieux comprendre la perception des producteurs par rapport aux pratiques aux champs, à l'étable et plus globalement sur leur ferme.

**Aux champs**

Les légumineuses fourragères les plus utilisées sur les fermes des répondants sont la luzerne, le trèfle rouge et le trèfle blanc. Ainsi, 90 % des répondants cultivent la luzerne et 55 % des répondants cultivent le trèfle rouge. Parmi ces répondants, 85 % cultivent le trèfle rouge en association avec la luzerne. Les graminées les plus utilisées sont la fléole des prés, le brome des prés, la fétuque des prés, le brome inerme et la fétuque élevée. En effet, près de 80 % des répondants utilisent la fléole des prés dans leurs associations fourragères. Les critères de rendement, de valeur nutritive et de survie hivernale sont jugés les plus importants par les répondants dans le choix des espèces fourragères (Figure 1). D'autres critères sont pris en considération, mais à moindre importance.

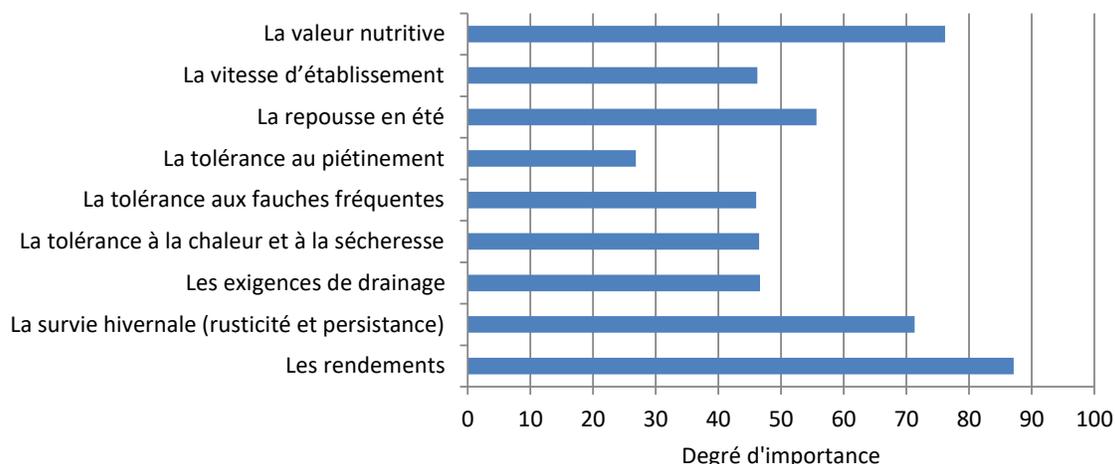


Figure 1. Degré d'importance accordé par les répondants aux caractéristiques considérées lors du choix des espèces fourragères.

Étant donné que le regain de la fléole des prés est plutôt faible en période de chaleur et de sécheresse, son rendement est voué à diminuer avec la hausse des températures estivales associée aux changements climatiques. Ainsi, bien que cette espèce soit adaptée à nos conditions actuelles, des recherches sont présentement réalisées afin de déterminer la ou les graminées fourragères qui auraient le potentiel de la remplacer. Deux de ces espèces, la fétuque des prés et la fétuque élevée, sont toutes deux déjà présentes dans les cultures fourragères pour environ 20 à 25 % des répondants. Aussi, dans un horizon de 15 ans, une majorité des répondants ne manifeste pas l'intention de modifier leurs critères de sélection pour les espèces fourragères semées sur leur ferme.

Les stratégies de coupes automnales sont assez variées. Il est donc intéressant de diviser les répondants en deux régions, soit une zone avec maïs-grain et une zone sans maïs-grain. Dans la zone sans maïs-grain, environ 40 % des répondants ne réalisent pas de coupe automnale, contrairement à 20 % dans la zone avec maïs-grain. Dans les deux régions, si une coupe automnale est réalisée, elle est effectuée tôt après un gel meurtrier (environ 30% pour les deux zones) ou au stade début floraison pour les légumineuses et début épiaison pour les graminées (32 % des répondants de la zone avec maïs-grain et 16 % des répondants de la zone sans maïs-grain).

### À l'étable

Près de 70 % des étables des répondants sont munies d'un système de ventilation principal de type tunnel, ce qui explique en partie le fait que seulement 47 % des répondants rapportent avoir des ventilateurs d'appoint (Tableau 1). Les ventilateurs d'appoint les plus présents sur les fermes québécoises des répondants, avec 30 %, sont les ventilateurs à cadre ou à panier standard. Les technologies de refroidissement sont utilisées par 21 % des répondants. La majorité des répondants, soit 60 %, n'ont pas témoigné d'intérêt à introduire de nouveau système de ventilation ou de refroidissement à court terme. Il reste que les méthodes de rafraîchissement les plus envisagées sont le système de brumisation (15 %), suivie par l'ajout de ventilateurs d'appoint (8 %).

Tableau 1. Proportion des étables des répondants possédant des systèmes de ventilation et des technologies de rafraîchissement

Système de rafraîchissement disponible à la ferme	Répondants (%)
Ventilation principale <sup>1</sup>	99
Ventilation d'appoint <sup>2</sup>	47
Technologies de refroidissement <sup>3</sup>	21

<sup>1</sup> La ventilation principale peut être une ventilation longitudinale (tunnel) ou une ventilation transversale (mécanique ou naturelle).

<sup>2</sup> La ventilation d'appoint peut être réalisée à l'aide de gros ventilateurs de plafond (*Big Ass fan*), de ventilateurs de recirculation à cadre ou à panier et de ventilateurs mobiles.

<sup>3</sup> Les technologies de rafraîchissement peuvent être un système de brumisation ou d'aspersion, des panneaux de refroidissement par évaporation ou autres.

### Perception des changements climatiques

D'après les résultats de l'enquête, 88 % des répondants de la zone avec maïs-grain réalisent trois ou quatre coupes de plantes fourragères dans la majorité de leurs champs (moyenne de 3,2 coupes par saison de croissance). Par ailleurs, 96 % des répondants de la zone sans maïs-grain réalisent plutôt deux ou trois coupes (moyenne de 2,5 coupes par saison de croissance) (Figure 2).

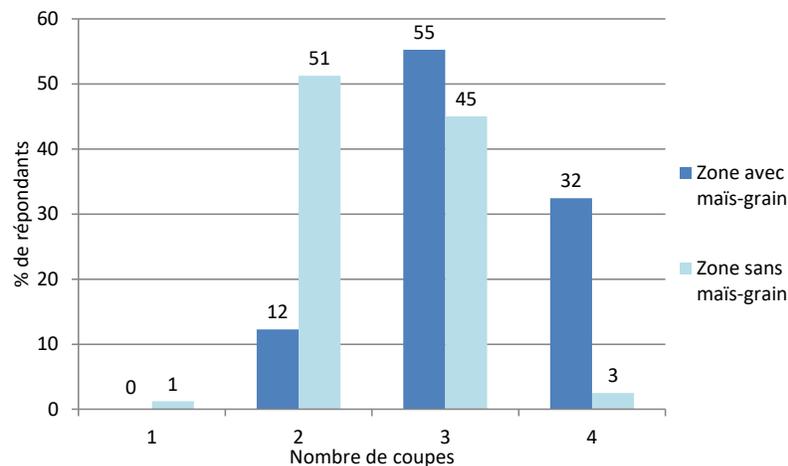


Figure 2. Proportion de répondants interrogés pratiquant 1, 2, 3 ou 4 coupes de plantes fourragères par année sur la majorité des champs de leur ferme.

Au cours des quinze prochaines années, un peu plus d'un répondant sur quatre (27 %) dans la zone avec maïs-grain prévoit augmenter le nombre de coupes de fourrage alors que 44 % des répondants dans la zone sans maïs-grain considèrent favorablement l'augmentation du nombre annuel de coupes (Figure 3). Dans les deux zones, près de 50 % des répondants ont déjà augmenté leur nombre de coupes par année au cours des quinze dernières années. Il est possible que plusieurs répondants aient déjà bénéficié de l'augmentation des températures et de la longueur de la saison de croissance pour augmenter leur nombre de coupes par année.

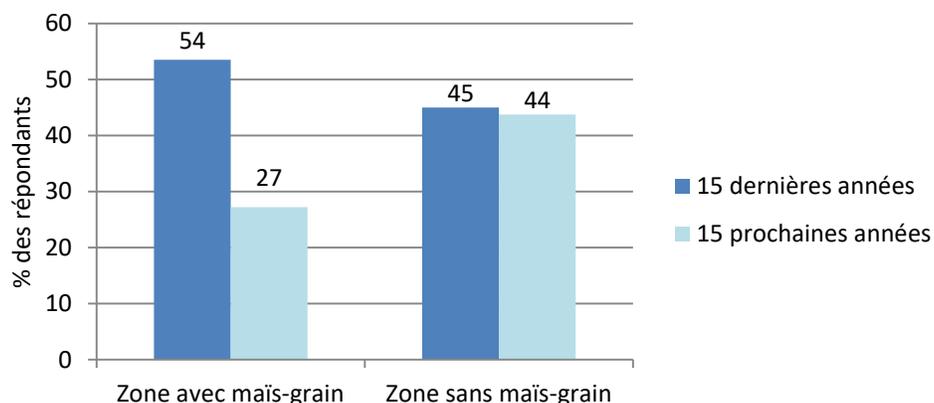


Figure 3. Proportion des répondants qui ont augmenté le nombre de coupes de plantes fourragères effectué annuellement sur leur ferme au cours des quinze dernières années ou qui pensent le faire au cours des quinze prochaines années.

Les rotations des cultures des fermes de 36 % des répondants n’ont pas changé au cours des quinze dernières années. Néanmoins, 34 % des fermes ont introduit de nouvelles cultures et 27 % ont diminué le nombre d’années en cultures fourragères. Les principales motivations des changements passés et futurs des répondants sont la diminution des rendements (46 %), les nouvelles opportunités de vente (45 %), la modification du climat de la région (32 %) et la diminution de la valeur nutritive des cultures (21 %).

Dans les deux régions, le département des cultures est désigné par plus de 75 % des répondants comme étant à risque face aux changements climatiques, alors que les répondants semblent nettement moins préoccupés par celui des animaux ou des sols (Tableau 2). Bien que les producteurs soient préoccupés par plusieurs problématiques comme le déficit hydrique et la fréquence des événements climatiques extrêmes, en 2016, ils considéraient que peu de ces problématiques augmenteront significativement dans le futur. De façon pratique, les répondants du sondage considéraient que les effets des changements climatiques sur la productivité (74 %) et la santé des animaux (81 %) seront négligeables.

Tableau 2. Départements de l’entreprise sur lesquels l’impact des changements climatiques sera le plus important selon les réponses des répondants

Département	Zone avec maïs-grain (% des répondants)	Zone sans maïs-grain (% des répondants)
Animaux	14,0	10,0
Cultures	76,3	77,5
Sols	5,3	8,8
Aucun	4,4	3,8

Les perceptions des producteurs sur la mortalité hivernale des plantes fourragères sont mitigées. En effet, bien que leur préoccupation à ce sujet soit élevée, la majorité des répondants de la zone

avec maïs-grain ne prévoit aucune augmentation significative de l'incidence de la mortalité hivernale des plantes fourragères contrairement à ceux de la zone sans maïs-grain. Néanmoins, les répondants des deux régions considèrent la mortalité hivernale comme une préoccupation importante. Effectivement, les producteurs participants anticipent une diminution du couvert de neige (76 %) et une augmentation des événements gel/dégel hivernaux (85 %). Ainsi, il est possible de poser l'hypothèse que les producteurs de la zone avec maïs-grain subissent déjà certains effets des changements climatiques sur la survie hivernale des espèces cultivées, alors que ceux de la zone sans maïs-grain anticipent ces effets dans un futur proche.

En conclusion, les producteurs sont conscients de la vulnérabilité accrue des cultures face aux changements climatiques. L'effet des changements climatiques semble être déjà ressenti par les producteurs de la zone avec maïs-grain. Ainsi, les producteurs de cette zone, comparativement à leurs pairs de la zone sans maïs-grain, semblent moins optimistes quant à la possibilité d'augmenter le nombre de coupes annuel des cultures fourragères sur leur ferme, mais semblent aussi moins s'attendre à un accroissement des problèmes de mortalité hivernale. La mortalité hivernale des plantes fourragères est tout de même considérée comme une préoccupation importante chez tous les répondants. Pour ce qui est du risque accru de stress thermique chez les animaux, en 2016, la majorité des répondants semblaient considérer leur étable prête à affronter les changements climatiques. Enfin, bien que certaines mesures d'adaptation restent à mettre en place, les producteurs laitiers québécois possèdent une grande capacité d'adaptation. Les changements climatiques ne semblent donc pas perçus comme un obstacle insurmontable.

## **ii. Revue bibliographique sur les pratiques utilisées pour réduire les risques de stress thermiques pour les vaches laitières dans un climat continental humide**

Nous avons publié une revue bibliographique qui avait pour objectif de quantifier le potentiel de réduction du ITH de différentes méthodes pour atténuer l'impact des stress thermiques chez les vaches laitières en lactation (Fournel et al., 2017). Au total, 123 publications scientifiques ont été consultées. Le tableau 3 montre les principales méthodes d'atténuation étudiées dans cette revue bibliographique ainsi que leur potentiel d'atténuation.

Tableau 3. Moyennes d'amélioration potentielle des systèmes de refroidissement pour des fermes laitières sous un climat continental humide.

Méthode	Système de refroidissement	T <sub>db</sub> (°C)	HR (%)	ITH	TR (°C)	TV (°C)	RR (resp./ min)	CVMS (kg/j)	PL (kg/j)
Modification de l'environnement pour limiter l'importance du stress thermique	Ombrières	0,0		0,0	-0,6	-0,2	-22		+0,7
	Isolation du toit	-1,2		-1,3				+0,2	+0,6
	Panneau de refroidissement par évaporation	-3,5	+23,7	-2,4	-0,6	0,0	-10	+1,3	+1,9
	Brumisateur	-2,1	+10,0	-2,5					
	Ventilateur-brumisateur	-4,6	+20,0	-3,5	-0,8	-1,0	-20	+0,9	+1,7
Amélioration des échanges de température entre les vaches et leur environnement	Gicleur	-0,8	+3,9	-0,6	-0,2	-0,1	-16		+1,3
	Ventilateur-gicleur	-2,8	+11,1	-2,5	-0,5	-1,1	-22	+1,8	+2,5
	Ventilation tunnel (+ panneau)	-3,5	+23,8	-2,2	-0,7	0,0	-12	+1,3	+2,9
	Ventilation transversale (+ panneau)	-3,5	+21,7	-3,4					
	FVHV				-0,4	-0,5	-11	+0,6	+1,0
	HVHV (+ gicleur)	-4,2	+5,0	-4,7					
	Tapis d'eau				-0,9		-16	+2,6	+2,4

Abréviations : FVHV = ventilateurs de plafond faible vitesse et haute vitesse, HVHV = ventilateurs de plafond à haute vitesse et à faible vitesse, T<sub>db</sub> = température à bulbe sec, HR = humidité relative, ITH = Indice température-humidité, TR = température rectale, TV = température vaginale, RR = rythme respiratoire, CVMS = consommation volontaire de matière sèche, PL = production laitière.

La revue bibliographique tentait principalement de comprendre l'impact des mesures de refroidissement pour les vaches de fermes situées sous un climat continental humide. Les mesures à sélectionner sur les fermes pour atténuer les risques de stress thermique peuvent différer dans ces régions par rapport aux régions plus arides d'où proviennent souvent les résultats de la recherche scientifique. Les stratégies permettant de réduire l'accumulation de chaleur ou celle favorisant la convection ou la conduction devraient être prioritaires sous les climats continentaux humides. Ainsi, l'ajout de zone d'ombres et l'isolation des toits, l'utilisation de la ventilation tunnel, de ventilateurs de recirculation et de matelas d'eau refroidis sont des solutions pratiques qui devraient être considérées sous notre climat. Toutes ces stratégies pourraient être implantées dans de nouvelles étables ou dans des étables rénovées. L'utilisation de stratégies impliquant l'évaporation, comme l'ajout de panneau de refroidissement par évaporation, la brumisation et les gicleurs, n'est généralement pas recommandée lorsque l'humidité relative peut atteindre un seuil de 75 %. En effet, ces stratégies utilisent toutes l'eau comme source de rafraîchissement de l'environnement, ce qui au départ rafraîchit l'environnement risque à moyen terme de nuire à la dissipation de chaleur de l'animal en augmentant l'humidité relative dans l'environnement de la ferme. En plus, dans un contexte de changements climatiques qui risque d'augmenter la pression sur la ressource eau, l'utilisation d'une quantité importante d'eau pour le rafraîchissement des animaux laitiers dans des systèmes de brumisation et d'aspersion pourrait être critiquable. L'analyse technico-économique des stratégies les plus prometteuses dans le contexte québécois en climat actuel et futur est présentée plus loin dans ce rapport.

**c. Calculer des projections de rendements potentiels des principales associations d'espèces suite aux changements climatiques en complémentarité avec l'essai au champ visant à identifier des alternatives à la fléole des prés cultivée en association avec la luzerne (Objectif spécifique 1)**

L'enquête réalisée auprès des producteurs laitiers québécois a montré que ces derniers s'attendent à conserver les stratégies actuellement utilisées pour la sélection de leurs plantes fourragères dans le futur et que les trois principaux facteurs considérés comme étant les plus importants sont le rendement, la valeur nutritive et la survie à l'hiver. Pour nos projections de climats futurs plausibles, seules les graminées fourragères ayant des résultats intéressants pour ces trois facteurs ont été étudiées. En effet, plusieurs études pointent vers des hivers plus problématiques au niveau de la survie hivernale des plantes fourragères sous les conditions des projections associées aux changements climatiques (Bélanger et al., 2002; Bélanger et al., 2006). Ainsi, les espèces de graminées fourragères qui ont été étudiées en considérant une plage de climats futurs plausibles sont la fléole des prés, la fétuque élevée, la fétuque des prés et le brome des prés.

Cet objectif de recherche se voulait la suite de l'étude de modélisation sur le choix de la graminée fourragère en remplacement à la fléole des prés dans un contexte de changement climatique, mais cette fois, en utilisant des projections climatiques futures. Les fermes typiques étudiées étaient les mêmes dans les deux études, soit une ferme du Bas-Saint-Laurent (région au climat relativement frais) et une ferme de la Montérégie (région au climat relativement chaud) puisque ces deux régions ont des climats très différents et qu'elles comportent toutes deux de nombreuses entreprises laitières. Les scénarios climatiques ont été bâtis à l'aide des données historiques des stations météo de Mont-Joli (Bas-Saint-Laurent) et Saint-Hubert (Montérégie), et considérant 6 simulations climatiques. Des moyennes et des médianes de résultats de banques de données pour les fermes dans les régions avoisinant les stations ont été utilisées. Pour délimiter la région des fermes incluses dans le calcul associé à chacune des stations, la carte du cumul des degrés-jours moyens de l'Atlas agroclimatique du Québec a été utilisée. Ainsi, les municipalités près de chaque station météo avec une accumulation de degrés-jours similaires à cette dernière étaient retenues. À partir de cette délimitation, il a été possible d'associer des résultats de fermes avec les bons codes postaux pour créer chacune des fermes types. La banque de données de Valacta a servi à déterminer les principaux aliments utilisés sur les fermes, la valeur nutritive de ces derniers ainsi que les données moyennes de troupeaux (nombre de vaches, production annuelle moyenne par vaches, taux de gras et de protéine, intervalle entre les vêlages, etc.). La banque de données d'Agritel web a quant à elle été utilisée pour obtenir les données économiques pour les fermes types. Une description sommaire de ces fermes types est disponible au tableau 4.

Tableau 4. Principales caractéristiques retenues pour la ferme moyenne du Bas-St-Laurent et de la Montérégie

	Bas-Saint-Laurent	Montérégie
Superficie (hectares)	135	100
Nombre de vaches	63	71
Production moyenne (kg/vache/an)	8 610	9 108

## Scénarios climatiques

Six scénarios climatiques représentant chacun une trajectoire climatique plausible obtenue en post-traitant une simulation climatique ont été utilisés. Post-traiter une simulation climatique consiste essentiellement à raisonner en considérant son contenu informatif conjointement à celui d'un produit dit de référence (observations en station, observations interpolées, réanalyses, etc.). Succinctement, dans le cas présent, la simulation dicte les alternances entre minima et maxima ainsi que les tendances de fond, alors que le produit de référence dicte le climat de base (durant typiquement 30 ans du passé récent). Il s'agit en fait d'ajuster les biais des simulations, et de compenser pour leur basse résolution. L'utilisation de plusieurs scénarios est essentielle, puisque chaque scénario climatique représente une trajectoire potentielle et que la considération d'un ensemble de scénarios permet de mieux couvrir l'ensemble des futurs climatiques plausibles (on parle alors de couvrir l'incertitude). Les scénarios climatiques considérés sont le résultat du post-traitement des six simulations suivantes (modèle / scénario d'émissions des GES) :

- 1) CRCM5-UQAM, piloté par MPI-ESM-LR / RCP4.5
- 2) CRCM5-UQAM, piloté par CanESM2 / RCP4.5
- 3) MIROC5 / RCP4.5
- 4) MIROC5 / RCP8.5
- 5) MRI-CGCM3 / RCP4.5
- 6) MRI-CGCM3 / RCP8.5

Les scénarios d'émissions anthropiques forçant le modèle global à partir de 2006 sont RCP4.5 (scénario relativement "optimiste") pour quatre des scénarios climatiques utilisés et RCP8.5 pour les deux autres (scénario sans effort majeur de réduction des émissions des GES).

Pour chacun des scénarios climatiques, les variables fournies à une résolution quotidienne étaient : température minimale (°C), température maximale (°C), précipitations (mm/jour), radiation solaire incidente à la surface (kJ/m<sup>2</sup>/jour) et humidité relative (%). Les scénarios couvraient la période 1971-2100. La résolution des simulations varie de 25 à 150 km, mais puisqu'on post-traite, les scénarios se veulent des trajectoires à l'échelle d'un point (la station concernée). La méthode de post-traitement est une des variantes du "quantile mapping". Par ce post-traitement, on souhaite ajuster statistiquement la simulation de manière à ce que sa distribution vienne épouser la distribution observée pendant une certaine période dite de référence ou de calibration. Le post-traitement est fait de manière univariée, ce qui en général mène à l'utilisation des corrélations inter-variables du modèle.

Les données climatiques couvrent une période d'environ cent ans, et ont été regroupées en trois périodes temporelles, soit la période de référence (1971-2000), le futur proche (2020-2049) et le futur lointain (2050-2079). Les valeurs de CO<sub>2</sub> atmosphérique pour chaque période et chaque scénario climatique ont également été utilisées, en plus des valeurs de radiation solaire, températures minimales et maximales et précipitations quotidiennes. Les principaux indices agroclimatiques ont été calculés à partir des données quotidiennes fournies par Ouranos pour chacun des modèles utilisés et pour chacune des périodes temporelles. Les calculs de la longueur de la saison de croissance, du cumul des degrés-jours et du cumul des unités thermiques maïs

(UTM) étaient basés sur les équations présentées dans l'Atlas agroclimatique (2012). Ces équations sont présentées en annexe.

### **Évaluation du rendement et de la valeur nutritive**

L'*Integrated Farm System Model* (IFSM) a été utilisé pour évaluer les rendements de quatre associations fourragères (luzerne + fléole des prés, luzerne + fétuque élevée, luzerne + fétuque des prés et luzerne + brome des prés) ainsi que pour les principales autres cultures retrouvées sur les fermes laitières (maïs ensilage, maïs grain, soya, blé et orge). Des éléments de valeur nutritive sont en plus disponibles pour les plantes fourragères dans IFSM. C'est un modèle mécaniste (process-based) qui vise à intégrer simultanément l'influence et les interactions des processus majeurs de production et des conditions pédoclimatiques (Rotz et al., 2015). Ce type de modèle permet des projections de résultats calculés avec précision, mais reste dans un cadre plus statique (c.-à-d. reflétant la situation initiale entrée par l'utilisateur). Il a déjà été calibré et validé pour simuler la plupart des cultures utilisées sur les fermes laitières au Québec (Jégo et al., 2015; Thivierge et al., 2016, 2017). Certains ajustements ont cependant été nécessaires au cours de ce projet, notamment pour les mélanges qui n'avaient pas été simulés jusqu'à présent (luzerne en association avec le brome des prés, la fétuque des prés et la fétuque élevée).

Trois périodes temporelles ont été définies pour l'étude en utilisant les données journalières calculées précédemment, soit la période de référence (1971-2000), le futur proche (2020-2049), le futur lointain (2050-2079). Ceci dit, certaines calibrations dans IFSM nécessitaient un ajustement en partant de rendements et de valeurs nutritives connues. Ainsi, les données de rendement et valeurs nutritives de l'étude en climat actuel (projet FRQNT-Novalait-MAPAQ) ont été utilisées pour effectuer ces calibrations, en utilisant les valeurs climatiques réelles de 2007-2017. Puis, les valeurs des paramètres calibrés pendant cette étape préalable ont été utilisées pour les simulations dans les périodes futures ainsi que la période de référence. D'autre part, les valeurs calculées pour la longueur de la période de croissance moyenne, le cumul de degrés-jour (base 5°C) et le cumul des UTM ont été utilisées pour ajuster les dates à partir desquelles le semis et la récolte étaient possibles. À partir de ces données, les groupes de maturité du maïs et du soya ont également été ajustés lorsque nécessaires pour chacune des périodes étudiées. Nous avons également calculé le nombre de coupes annuelles pour les plantes fourragères pérennes qu'il serait possible de réaliser en fonction de chacun des scénarios climatiques pour le futur. Il a été considéré qu'une accumulation de 450 degrés-jours était nécessaire avant de faire la première coupe, sachant que ce dernier commence à partir du dernier jour de cinq jours consécutifs avec une température moyenne supérieure ou égale à 5°C, puis 520 degrés-jours supplémentaires devaient être cumulés entre chacune des coupes subséquentes (Bélanger et al., 2016; Thivierge et al., 2016). Finalement, il ne devait y avoir aucune coupe dans les 40 jours précédents le premier gel. La fertilisation a également été ajustée pour répondre à l'augmentation des besoins en azote selon la hausse de rendement simulée, afin de ne pas devenir limitante. Les aliments foin ont été créés à partir des ensilages d'herbes, en diminuant la quantité de luzerne pour tenir compte du fait que cette dernière tend à disparaître du champ avec les années et en enlevant une coupe pour les ensilages à trois coupes et plus. Le foin est souvent utilisé pour son apport en fibre aux rations, et diminuer le nombre de coupes annuelles permet de mieux représenter les pratiques courantes sur les fermes.

Sachant qu'une variabilité existe entre les différents scénarios climatiques, avec certains qui correspondent à des augmentations de température plus grandes, il a été décidé de regrouper et

moyenner les modèles selon des critères agronomiques pour l'étape d'optimisation. Ainsi, les résultats regroupés seront présentés dans la suite de cette section. Le nombre de coupes annuelles possibles pour les plantes fourragères pérennes est le facteur agronomique qui a été retenu pour ce regroupement. Ce regroupement a été réalisé de manière distincte pour chacune des périodes climatiques. Le tableau 5 présente les modèles climatiques utilisés pour chaque regroupement.

Tableau 5. Modèles climatiques sélectionnés pour chaque scénario

		Modèles
<i>Bas-Saint-Laurent</i>		
Référence		Tous
Futur proche 2 Coupes		CGM3 4.5, CGM3 8.5
Futur proche 3 Coupes		CCMA, MIROC5 4.5, MPI, MIROC5 8.5
Futur lointain 3 Coupes		CCMA, CGM3 4.5, MIROC5 4.5, MPI, CGM3 8.5
Futur lointain 4 Coupes		MIROC5 8.5
<i>Montérégie</i>		
Référence		Tous
Futur proche 4 Coupes		Tous
Futur lointain 4 Coupes		CGM3 4.5, MPI, CGM3 8.5
Futur lointain 5 Coupes		CCMA, MIROC5 4.5, MIROC5 8.5

Le tableau 6 présente les moyennes et écarts-types pour les principaux indices agroclimatiques en fonction des regroupements de scénarios climatiques faits dans cette étude. Il est possible de constater que la longueur de la saison de croissance augmentera probablement dans le futur, dû aux températures plus chaudes, ce qui amène la possibilité de cumuler plus de degrés-jours et d'unité thermique maïs. Dans le Bas-Saint-Laurent, l'augmentation probable de la longueur de la saison de croissance sera de 17 jours en moyenne entre les années, et entre les scénarios, dans le futur proche par rapport à la période de référence et d'en moyenne 40 jours dans le futur lointain. En Montérégie, la longueur de la saison de croissance augmentera d'en moyenne 19 jours dans le futur proche et d'en moyenne 30 jours dans le futur lointain. En plus, les cumuls d'UTM devraient permettre l'introduction de maïs-grain et de soya au Bas-St-Laurent dans tous les scénarios projetés pour le futur lointain et dans les scénarios avec les projections de réchauffement les plus élevés (3 coupes) pour le futur proche. Pour ce qui est de la Montérégie, les indices agroclimatiques laissent présager des conditions qui favoriseront encore l'utilisation de plantes bénéficiant des températures plus chaudes, comme le maïs-grain, l'ensilage de maïs, la luzerne et certaines graminées fourragères.

Tableau 6. Longueur de la saison de croissance, cumul des unités thermiques maïs (UTM) et cumul des degrés-jours attendus pour la période de référence, le futur proche et le futur lointain dans le Bas-Saint-Laurent et en Montérégie. Les résultats présentés sont les moyennes des scénarios regroupés qui sont eux-mêmes chacun la moyenne des 30 années de la période.

	Bas-Saint-Laurent					Montérégie			
	Référence (1971-2000)	Futur proche (2020-2049)		Futur lointain (2050-2079)		Référence (1971-2000)	Futur proche (2020-2049)		Futur lointain (2050-2079)
	2 coupes	2 coupes	3 coupes	3 coupes	4 coupes	3 coupes	4 coupes	4 coupes	5 coupes
Longueur de la saison de croissance (j)	106 ± 12	118 ± 16	128 ± 15	137 ± 17	155 ± 14	131 ± 14	150 ± 18	153 ± 16	169 ± 18
Cumul UTM	2006 ± 222	2323 ± 222	2625 ± 307	2771 ± 320	3517 ± 347	2986 ± 210	3629 ± 355	3718 ± 337	4288 ± 387
Cumul des degrés-jours (base 5°C)	1033 ± 146	1198 ± 163	1415 ± 200	1547 ± 224	1971 ± 184	1527 ± 137	1946 ± 270	2021 ± 230	2426 ± 278

Une fois les ajustements réalisés, il a été possible d’obtenir des projections de rendements et de valeurs nutritives pour les différentes cultures retrouvées sur les fermes laitières au Bas-St-Laurent (Tableau 7). Une simulation a été réalisée pour le scénario regroupant les simulations avec un réchauffement projeté moins intense et le scénario regroupant les simulations avec un réchauffement projeté plus intense (3 coupes) du futur proche (2 coupes et 3 coupes respectivement) et du futur lointain (3 coupes et 4 coupes respectivement). Le nombre de coupes permises a été calculé à partir de l’accumulation des degrés-jours pour chaque scénario pendant la saison de croissance (Tableau 5). Les projections de rendement pour les ensilages de plantes fourragères pérennes laissent présager que, dans le Bas-Saint-Laurent, la fétuque élevée sera la graminée avec les plus hauts rendements en association avec la luzerne. Les trois autres associations avec la luzerne obtiennent des rendements majorés avec les changements climatiques, mais interchangent leurs positions en fonction du regroupement de scénarios climatiques et les rendements demeurent inférieurs aux projections trouvées pour l’association avec la fétuque élevée. Aussi, la moyenne d’augmentation des rendements futurs des quatre regroupements de scénarios par rapport à la période de référence laisse présager que c’est l’association avec la fléole des prés qui profitera le moins des changements climatiques. Les associations avec le brome des prés et la fétuque des prés obtiennent des moyennes d’augmentation de rendement intermédiaires alors que l’association avec la fétuque élevée obtient la majoration la plus importante.

Pour la majorité des associations fourragères, plus l’intensité du réchauffement climatique projeté est importante, plus la teneur en protéine brute augmente alors que celle de la NDF diminue (Tableau 7). Cela peut s’expliquer par une augmentation de la proportion de luzerne dans les associations lors des premières années de production dans le futur (Tableau 8), puisque cette légumineuse bénéficie plus des températures plus élevées que les graminées pérennes étudiées. Peu importe le scénario, l’association luzerne et brome des prés est projetée avec la teneur en protéines brutes la plus élevée alors que l’association avec la fétuque des prés se voit attribuer la teneur en PB la plus faible. Dépendamment des scénarios, la fléole des prés et la fétuque élevée s’échangent la deuxième place.

Tableau 7. Rendements (t MS/ha) et valeurs nutritives (% MS) des quatre associations fourragères<sup>1</sup> récoltées en ensilage, leur équivalent foin ainsi que des grandes cultures les plus couramment utilisées au Québec pour la période de référence, le futur proche et le futur lointain dans le Bas-Saint-Laurent. Les résultats présentés sont les moyennes par regroupement de scénarios climatiques.

	Bas-Saint-Laurent														
	Référence (1971-2000)			Futur proche (2020-2049)						Futur lointain (2050-2079)					
	2 coupes			2 coupes			3 coupes			3 coupes			4 coupes		
	Rdt <sup>2</sup> (t/ha)	PB <sup>2</sup> (%)	NDF <sup>2</sup> (%)	Rdt (t/ha)	PB (%)	NDF (%)	Rdt (t/ha)	PB (%)	NDF (%)	Rdt (t/ha)	PB (%)	NDF (%)	Rdt (t/ha)	PB (%)	NDF (%)
Ens. LU + FL	7,0±0,9	14,6±1,3	49,7±2,3	7,5±0,8	14,5±1,2	50,2±2,4	9,2±1,0	15,6±1,2	47,3±2,4	9,4±1,1	15,2±1,4	48,1±2,6	10,7±1,1	15,8±1,0	46,6±2,3
Ens. LU + FÉ	6,8±0,8	15,1±0,9	43,4±1,6	7,7±0,9	15,2±1,0	43,6±1,8	9,6±1,1	15,9±0,9	41,1±1,7	9,9±1,1	15,3±1,0	42,4±2,0	11,6±1,1	15,5±0,9	41,0±1,8
Ens. LU + FP	6,6±0,8	13,7±1,2	48,0±2,0	7,3±0,8	13,8±1,3	48,5±2,2	9,1±1,1	14,8±1,3	45,3±2,2	9,3±1,1	14,3±1,4	46,4±2,6	10,9±1,2	14,9±1,0	44,5±2,2
Ens. LU + BP	6,9±0,8	16,1±1,0	48,2±2,0	7,5±0,8	16,1±0,9	48,5±2,2	9,4±1,0	16,7±0,9	46,1±2,1	9,6±1,1	16,3±1,1	47,0±2,5	11,0±1,0	16,6±0,6	45,8±2,3
Maïs ensilage	9,1±3,5	11,1±1,3	65,1±14,8	12,9±4,1	9,5±1,4	53,5±9,3	12,7±4,7	10,2±1	49,2±8,1	14,6±4,8	9,8±1,1	46,9±7,6	14,4±5,4	9,3±1,0	43,8±4,6
Orge	2,4±0,8	ND <sup>3</sup>	ND	2,6±0,8	ND	ND	2,3±0,9	ND	ND	2,4±0,9	ND	ND	2,2±1,0	ND	ND
Maïs grain	-	ND	ND	-	ND	ND	6,0±2,8	ND	ND	7,5±3,0	ND	ND	7,9±2,8	ND	ND
Soya	-	ND	ND	-	ND	ND	2,0±0,4	ND	ND	2,1±0,5	ND	ND	2,4±0,4	ND	ND
Foin LU + FL	7,1±0,9	12,0±1,2	64,5±7,5	7,6±1,0	11,8±1,1	64,8±8	8,5±0,9	12,4±3,5	69,0±7,6	8,8±1,0	11,8±6,0	70,3±7,3	10,1±1,0	12,7±2,2	68±8,9
Foin LU + FÉ	6,0±0,9	11,0±3,0	58,1±14,1	6,9±0,8	11,4±1,9	61,0±8,7	8,4±0,8	13,4±1,8	62,2±7,4	8,8±1,0	12,9±1,9	64,3±7,4	10,4±0,9	12,5±1,7	63,1±9,0
Foin LU + FP	6,7±0,8	10,2±1,2	64,6±7,8	7,3±0,9	10,4±1,5	65,1±8,8	8,4±0,9	11,8±2,2	67,9±7,8	8,8±1,1	11,4±2,6	69,1±7,7	10,3±1,0	11,6±1,8	67,6±9,3
Foin LU + BP	7,1±1,0	12,8±1,1	65,1±7,6	7,7±0,9	12,6±1,6	64,8±10,1	9,1±0,9	13,6±1,8	69,5±7,6	9,4±1,1	13,3±4,6	71,1±7,4	10,5±0,9	12,3±6,9	68,5±9,1

<sup>1</sup>LU = Luzerne; FL = Fléole des prés; FÉ = Fétuque élevée; FP = Fétuque des prés; BP = Brome des prés.

<sup>2</sup>Rdt = rendement; PB = Protéine brute; NDF = Fibre au détergent neutre.

<sup>3</sup>Valeur nutritive non disponible pour cet aliment dans IFSM.

Tableau 8. Moyennes pour les regroupements de scénarios climatiques de la proportion de luzerne (%) de chacune des associations fourragères, à chacune des coupes pour la période de référence, le futur proche et le futur lointain au Bas-Saint-Laurent<sup>1</sup>.

	Bas-Saint-Laurent																			
	Référence (1971-2000)				Futur proche (2020-2049)								Futur lointain (2050-2079)							
	2 coupes				2 coupes				3 coupes				3 coupes				4 coupes			
	FL	FÉ	FP	BP	FL	FÉ	FP	BP	FL	FÉ	FP	BP	FL	FÉ	FP	BP	FL	FÉ	FP	BP
Coupe 1	23±8	48±8	32±9	34±8	24±8	49±9	33±9	36±7	25±9	50±11	34±10	37±9	23±9	46±10	31±10	34±9	23±6	46±10	32±8	34±7
Coupe 2	22±8	66±7	39±10	30±7	28±9	69±8	46±11	36±8	29±11	66±10	46±12	37±9	27±10	63±10	43±12	35±9	28±8	59±11	43±10	34±8
Coupe 3	-	-	-	-	-	-	-	-	28±11	81±7	53±14	30±8	27±10	76±8	51±14	29±7	29±8	67±10	51±10	30±8
Coupe 4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30±6	79±9	57±12	29±5
Moy. total <sup>2</sup>	22	57	35	32	25	59	39	36	27	64	43	35	25	60	40	33	26	60	43	32

<sup>1</sup>FL = Luzerne + Fléole des prés; FÉ = Luzerne + Fétuque élevée; FP = Luzerne + Fétuque des prés; BP = Luzerne + Brome des prés.

<sup>2</sup>Moy. total = moyenne pondérée en fonction du rendement de chacune des coupes.

Pour ce qui est du maïs ensilage au Bas-St-Laurent, une hausse du rendement d'en moyenne 41 % est projetée dans le futur proche (moyenne du scénario moins extrême et plus extrême) par rapport à la période de référence, et d'un 18 % supplémentaire dans le futur lointain. Les teneurs en protéines brutes et en fibres au détergent neutre (NDF) projetées tendent à diminuer. Ceci s'explique par le fait qu'au Bas-Saint-Laurent, la température actuelle de certaines années peut être limitante pour amener le maïs à pleine maturité. Or, dans le futur, les conditions climatiques permettront de se rapprocher de la maturité souhaitée. D'ailleurs, selon les données nutritionnelles de l'ensilage de maïs (NRC, 2001), les teneurs en protéines brutes et en NDF tendent à diminuer avec une augmentation de la maturité. On remarque aussi que le rendement de l'orge augmente dans le regroupement de futur proche 2 coupes (scénarios climatiques avec un réchauffement projeté moins important), mais diminue dans les autres scénarios par rapport à la période de référence, sauf pour celui du futur lointain avec 3 coupes (simulations climatiques avec un réchauffement moins important). Cela peut s'expliquer par le fait que des températures élevées peuvent devenir limitantes pour cette culture. Finalement, on constate qu'il sera possible dans un futur rapproché de cultiver du maïs grain et du soya avec des rendements acceptables au Bas-Saint-Laurent.

Les grandes tendances de projections de rendements des associations fourragères observées au Bas-St-Laurent sont également observées en Montérégie (Tableau 9). Tout comme pour le Bas-Saint-Laurent, les périodes de temps sont séparées en scénarios de réchauffement plus ou moins intense et présentées en fonction du nombre de coupes possibles. Pour le futur proche, tous les modèles climatiques permettraient de faire quatre coupes (Tableau 5). Bien que l'ordre des rendements entre les différentes espèces de graminées soit conservé dans le futur lointain 5 coupes (scénario avec la simulation du réchauffement climatique le plus important), on commence à voir des diminutions de rendements projetés en comparaison aux autres scénarios de projection. Cela pourrait être expliqué par des températures élevées potentiellement limitantes et un stress hydrique probable plus grand pour certaines espèces fourragères pérennes dans les années 2050-2079 en Montérégie. En ce qui concerne la valeur nutritive, tout comme au Bas-St-Laurent, une hausse des teneurs projetées en protéine brute et une baisse de celles en fibres NDF sont attendues du fait de la modification dans la proportion de luzerne dans les associations lors des premières années de production (Tableau 10).

Tableau 9. Rendements (t MS/ha) et valeurs nutritives (% MS) des quatre associations fourragères<sup>1</sup> récoltées en ensilage, le foin ainsi que des grandes cultures les plus couramment utilisées au Québec pour la période de référence, le futur proche et le futur lointain en Montérégie. Les résultats présentés sont les moyennes par regroupement de scénarios climatiques.

	Montérégie											
	Référence (1971-2000)			Futur proche (2020-2049)			Futur lointain (2050-2079)					
	3 coupes			4 coupes			4 coupes			5 coupes		
	Rdt (t/ha)	PB (%)	NDF (%)	Rdt (t/ha)	PB (%)	NDF (%)	Rdt (t/ha)	PB (%)	NDF (%)	Rdt (t/ha)	PB (%)	NDF (%)
Ens. LU + FL	9,2 ± 1,0	14,0 ± 0,9	50,3 ± 1,8	11,1 ± 1,5	15,0 ± 1,2	48,3 ± 1,9	11,3 ± 1,2	14,6 ± 1,2	49,2 ± 1,6	11,0 ± 1,3	15,8 ± 0,9	47,6 ± 1,6
Ens. LU + FÉ	9,4 ± 1,0	13,2 ± 1,0	46,4 ± 1,5	12,0 ± 1,5	14,2 ± 1,0	44,0 ± 1,5	12,3 ± 1,3	13,5 ± 1,1	45,7 ± 1,7	12,2 ± 1,5	14,0 ± 1,0	44,4 ± 1,7
Ens. LU + FP	8,8 ± 1,0	13,4 ± 1,1	48,5 ± 1,7	11,0 ± 1,5	14,6 ± 1,1	45,7 ± 1,9	11,3 ± 1,3	14,1 ± 1,1	47,2 ± 1,7	11,1 ± 1,4	15,0 ± 0,9	44,8 ± 1,7
Ens. LU + BP	9,4 ± 1,0	14,7 ± 0,8	50,7 ± 1,8	11,3 ± 1,4	15,5 ± 1,0	48,9 ± 2,0	11,5 ± 1,2	15,0 ± 0,9	50,0 ± 1,7	11,2 ± 1,1	16,0 ± 0,8	48,6 ± 2,1
Maïs ensilage	15,3 ± 4,0	8,3 ± 1,9	48,8 ± 4,1	16,8 ± 4,5	8,3 ± 1,7	45,9 ± 3,6	18,4 ± 4,9	7,7 ± 1,7	46,5 ± 4,0	18,7 ± 5,1	8,1 ± 1,8	45,3 ± 4,1
Blé	3,0 ± 1,0	ND <sup>3</sup>	ND	3,1 ± 1,0	ND	ND	3,3 ± 1,1	ND	ND	2,9 ± 1,1	ND	ND
Maïs grain	8,1 ± 2,6	ND	ND	9,2 ± 2,7	ND	ND	9,7 ± 2,7	ND	ND	9,4 ± 2,6	ND	ND
Soya	2,0 ± 0,3	ND	ND	2,5 ± 0,4	ND	ND	2,6 ± 0,5	ND	ND	2,9 ± 1,1	ND	ND
Foin LU + FL	8,5 ± 0,9	13,1 ± 1,2	64,5 ± 5,2	10,2 ± 1,3	13,7 ± 1,6	61,8 ± 5,8	10,5 ± 1,2	13,5 ± 1,6	62,3 ± 5,3	10,1 ± 1,2	14,4 ± 1,5	59,6 ± 5,0
Foin LU + FÉ	8,8 ± 0,8	13,1 ± 1,3	60,6 ± 6,0	10,8 ± 1,2	13,1 ± 1,7	58,2 ± 6,2	11,3 ± 1,2	12,5 ± 1,6	60,0 ± 6,0	11,1 ± 1,0	12,5 ± 1,5	57,6 ± 5,5
Foin LU + FP	8,4 ± 0,9	12,6 ± 1,5	63,0 ± 6,7	10,1 ± 1,3	12,9 ± 1,8	60,5 ± 6,3	10,5 ± 1,2	12,6 ± 1,7	61,8 ± 5,8	10,0 ± 1,2	12,9 ± 1,6	59,2 ± 5,9
Foin LU + BP	8,9 ± 0,9	13,8 ± 1,1	65,1 ± 5,3	10,7 ± 1,2	14,3 ± 1,3	62,6 ± 5,3	11,1 ± 1,2	14,0 ± 1,2	63,4 ± 4,7	10,7 ± 1,1	14,7 ± 1,2	61,2 ± 4,8

<sup>1</sup>LU = Luzerne; FL = Fléole des prés; FÉ = Fétuque élevée; FP = Fétuque des prés; BP = Brome des prés.

<sup>2</sup>Rdt = rendement; PB = Protéine brute; NDF = Fibre au détergent neutre.

<sup>3</sup>Valeur nutritive non disponible pour cet aliment dans IFSM.

Tableau 10. Moyennes par les regroupements de scénarios climatiques de la proportion de luzerne (%) de chacune des associations fourragères, à chacune des coupes pour la période de référence, le futur proche et le futur lointain en Montérégie<sup>1</sup>.

	Montérégie															
	Référence (1971-2000)				Futur proche (2020-2049)				Futur lointain (2050-2079)							
	3 coupes				4 coupes				4 coupes				5 coupes			
	FL	FÉ	FP	BP	FL	FÉ	FP	BP	FL	FÉ	FP	BP	FL	FÉ	FP	BP
Coupe 1	13 ± 4	33 ± 6	26 ± 6	17 ± 5	15 ± 6	35 ± 9	29 ± 8	22 ± 5	14 ± 5	32 ± 8	26 ± 7	20 ± 5	15 ± 5	33 ± 9	28 ± 8	20 ± 5
Coupe 2	14 ± 5	46 ± 8	33 ± 8	17 ± 5	19 ± 7	50 ± 10	39 ± 11	21 ± 6	17 ± 6	44 ± 9	37 ± 10	19 ± 5	18 ± 6	46 ± 10	38 ± 10	19 ± 5
Coupe 3	15 ± 6	59 ± 8	43 ± 10	16 ± 5	23 ± 9	61 ± 10	53 ± 12	20 ± 6	21 ± 8	54 ± 11	49 ± 12	18 ± 5	24 ± 8	51 ± 11	52 ± 11	18 ± 5
Coupe 4	-	-	-	-	25 ± 12	75 ± 9	65 ± 13	18 ± 7	23 ± 9	67 ± 12	60 ± 12	17 ± 7	31 ± 10	58 ± 13	66 ± 11	17 ± 5
Coupe 5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32 ± 10	70 ± 14	76 ± 9	19 ± 6
Moy. total <sup>2</sup>	14	43	31	18	19	52	42	21	17	46	38	19	21	48	45	19

<sup>1</sup>FL = Luzerne + Fléole des prés; FÉ = Luzerne + Fétuque élevée; FP = Luzerne + Fétuque des prés; BP = Luzerne + Brome des prés.

<sup>2</sup>Moy. total = moyenne pondérée en fonction du rendement de chacune des coupes.

Comme pour les plantes fourragères, les rendements des autres cultures couramment présentes sur la ferme laitière typique de la Montérégie devraient bénéficier, dans un premier temps, des changements climatiques (Tableau 9). En effet, la hausse de rendement moyen projetée pour l'ensilage de maïs est de 10 % entre le scénario de référence et le regroupement du futur proche 4 coupes puis de 11 % supplémentaire pour le regroupement du futur lointain 4 coupes (scénario le moins extrême du futur lointain). On note que la proportion d'augmentation des rendements projetés est moins importante qu'au Bas-Saint-Laurent. Ceci pourrait s'expliquer le climat actuellement plus optimal pour les cultures en Montérégie, alors qu'il fait actuellement trop froid dans le Bas-Saint-Laurent. Par contre, peu de gain supplémentaire est attendu pour le scénario associé au futur lointain 5 coupes. Les teneurs en protéines brutes et en fibres NDF tendent à diminuer avec les scénarios climatiques projetant une augmentation plus importante des températures. Une réponse similaire est projetée pour les rendements du blé et du maïs-grain. En effet, une augmentation des rendements projetés est calculée avec l'augmentation de l'intensité des scénarios climatiques (augmentation du nombre de coupes) avec les regroupements des scénarios futurs 4 coupes, mais une baisse des rendements est projetée dans le futur lointain 5 coupes. Ces résultats peuvent s'expliquer par des températures probables trop élevées pour le blé et le maïs sous le scénario futur lointain 5 coupes, mais aussi par une augmentation du nombre de jours potentiels avec stress hydriques pour le maïs sous ce même scénario tel que présenté au tableau 11. Finalement, le rendement projeté du soya devrait augmenter de 0,9 t MS/ha entre la période de référence et le futur lointain 5 coupes.

Tableau 11. Nombre potentiel de jours en stress hydrique<sup>1</sup> pour les grandes cultures les plus couramment récoltées sur les fermes laitières du Québec pour la période de référence, le futur proche et le futur lointain dans le Bas-Saint-Laurent et en Montérégie. Les résultats présentés sont les moyennes par regroupement de scénarios climatiques.

	Bas-Saint-Laurent					Montérégie			
	Référence (1971-2000)	Futur proche (2020-2049)		Futur lointain (2050-2079)		Référence (1971-2000)	Futur proche (2020-2049)		Futur lointain (2050-2079)
	2 coupes	2 coupes	3 coupes	3 coupes	4 coupes	3 coupes	4 coupes	4 coupes	5 coupes
Orge/blé <sup>2</sup>	33 ± 16	27 ± 15	32 ± 13	32 ± 12	28 ± 11	31 ± 16	32 ± 14	29 ± 15	31 ± 13
Maïs	50 ± 22	59 ± 23	67 ± 20	66 ± 20	75 ± 16	62 ± 26	77 ± 21	71 ± 22	74 ± 17
Soya	-	-	47 ± 18	52 ± 17	59 ± 13	42 ± 18	62 ± 17	69 ± 21	73 ± 17

<sup>1</sup> Le stress hydrique est calculé dans IFSM en utilisant le facteur de stress hydrique développé par Jones et Kiniri (1986).

<sup>2</sup>L'orge est cultivée dans le Bas-Saint-Laurent et le blé en Montérégie

En résumé, l'objectif de cette partie de la recherche était de déterminer les performances agronomiques de quatre associations binaires luzerne-graminée (luzerne et fléole des prés, fétuque élevée, fétuque des prés, et brome des prés) cultivées en rotation avec des cultures annuelles (maïs, soya, orge, et blé de printemps) sur deux fermes laitières virtuelles représentatives de deux réalités de production différente à cause du climat au Québec, soit une au Bas-Saint-Laurent et l'autre en Montérégie. Le modèle Integrated Farm System Model (IFSM) a été utilisé pour simuler le rendement et la valeur nutritive de toutes les cultures sous les climats de référence (RÉF : 1971-2000), de futur proche (FP : 2020-2049) et lointain (FL : 2050-2079) en utilisant six scénarios climatiques de différentes intensités (4 utilisant le Representative concentration pathways (RCP) 4,5; 2 utilisant le RCP 8,5). Le modèle IFSM a été préalablement

calibré et validé pour prédire le rendement et la valeur nutritive de la plupart de ces cultures au Québec. Des calibrations additionnelles du modèle ont été réalisées avant les simulations en utilisant des résultats au champ. Comparés à la période de référence, les rendements des quatre associations luzerne-graminée devraient augmenter avec les conditions climatiques futures. Dans les deux régions (Bas-Saint-Laurent et Montérégie), l'augmentation de rendement de l'association luzerne-féтуque élevée devrait être la plus importante (RÉF :  $6,8 \pm 0,8$ , FP :  $9,0 \pm 1,5$ , FL :  $10,2 \pm 1,2$ , et RÉF :  $9,4 \pm 1,0$ , FP :  $12,0 \pm 1,5$ , FL :  $12,3 \pm 1,4$  t/ha, dans le Bas-Saint-Laurent et la Montérégie, respectivement) et être la moins importante pour l'association luzerne-fléole des prés (RÉF :  $7,0 \pm 0,9$ , FP :  $8,7 \pm 1,2$ , FL :  $9,6 \pm 1,2$ , et RÉF :  $9,2 \pm 1,0$ , FP :  $11,1 \pm 1,5$ , FL :  $11,1 \pm 1,3$  t/ha dans le Bas-Saint-Laurent et la Montérégie respectivement). La proportion de luzerne devrait augmenter au cours des premières années de production dans l'association avec les conditions climatiques futures, augmentant ainsi la concentration de protéine brute attendue dans les quatre associations et diminuant la concentration en fibres NDF. Pour les deux régions, les résultats des simulations suggèrent que le rendement des cultures à saison chaude (maïs et soya) pourrait augmenter dans le futur, alors que le rendement des céréales (blé et orge) pourrait légèrement diminuer. Les résultats de cette étude suggèrent donc que la féтуque élevée et la féтуque des prés en associations avec la luzerne pourraient bénéficier plus des changements climatiques que la fléole des prés.

**d. Évaluer l'impact potentiel des changements climatiques sur les résultats technico-économiques et agroenvironnementaux (bilan N et P, production de GES) des fermes laitières québécoises suite à l'adoption de nouvelles associations fourragères (Objectif spécifique 2)**

Les résultats sur le rendement et la valeur nutritive des principales cultures retrouvées sur les fermes laitières obtenus dans IFSM et validés par des experts du milieu ont été utilisés pour une évaluation plus complète de l'impact des changements climatiques au niveau de la ferme. Considérant que les producteurs seront appelés à modifier leurs décisions sur les cultures en fonction des résultats, et que la gestion des superficies est donc appelée à évoluer en fonction des rendements et des besoins du troupeau, un modèle d'optimisation a été choisi pour la suite de l'analyse. Le modèle *Nutrient-Cycling, Crops, Livestock, Environment and Soils* (N-CyCLES) est un modèle basé sur des outils d'optimisation utilisant la programmation linéaire et il permet de déterminer la meilleure stratégie permettant d'atteindre un objectif donné. Ainsi, l'impact d'un changement dans un sous-système sur le choix de pratique que ce changement entraînera dans l'ensemble de la ferme est pris en compte. En effet, N-CyCLES considère que les aliments cultivés sur la ferme entrent dans l'alimentation des animaux et que les rejets de ces derniers seront retournés aux champs, ce qui affectera la valeur nutritive et le rendement des cultures à son tour (Figure 4). Une autre force de ce modèle est qu'il 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 cultures. 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.

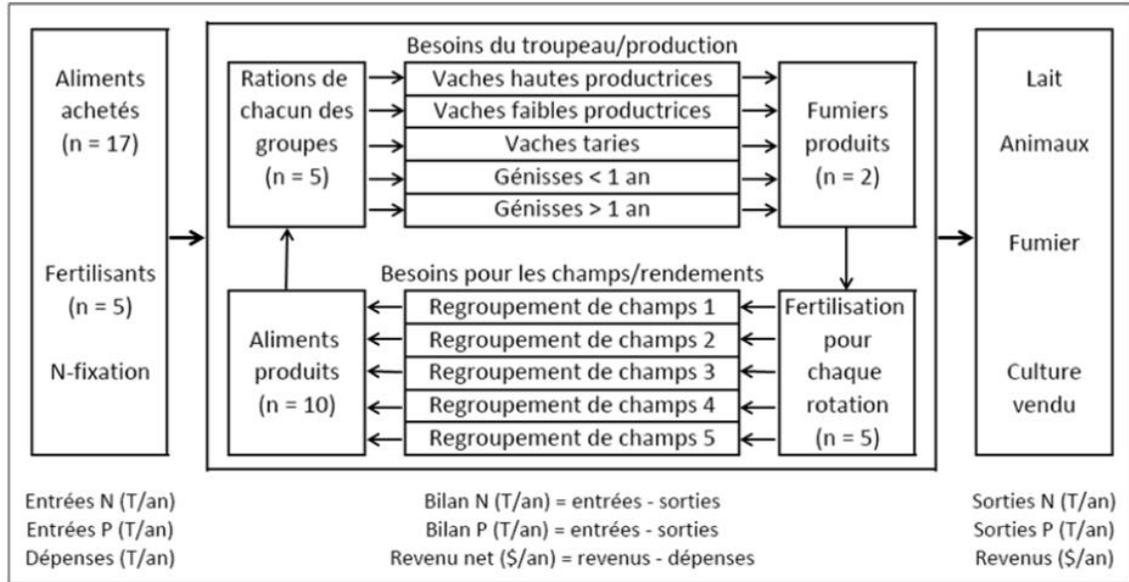


Figure 4. Représentation des interactions considérées dans le modèle N-CyCLES.

Le projet dans le climat actuel (financé par l'action concertée FRQNT-Novalait-MAPAQ) utilisait déjà N-CyCLES. La mise à jour du modèle pour obtenir des fermes types représentatives de la réalité de producteurs laitiers de 2010-2014 du projet en climat actuel a donc servi de base pour l'évaluation de l'impact des changements climatiques dans le futur. Ainsi, la ferme du Bas-Saint-Laurent comprenait 63 vaches avec une moyenne de production de 8 610 kg de lait/an à 4,01% de gras et 3,25% de protéine. La ferme de la Montérégie comprenait quant à elle 71 vaches avec une moyenne de production de 9108 kg lait/an à 4,01% et 3,29% de gras et de protéine respectivement. Chacune des fermes comprenait deux types de sols; un plus riche, et un autre plus faible en phosphore. Les valeurs de rendements, de PB et fibres NDF simulées dans IFSM ont été utilisées. Les informations provenant de la banque de données de Valacta ont servi à combler les valeurs pour les nutriments manquants qui sont nécessaires à la formulation de ration dans N-CyCLES.

Un ajustement pour la proportion de fourrage dans l'ensilage de maïs a été considéré pour les scénarios permettant la plus grande accumulation d'UTM (futur lointain au Bas-Saint-Laurent et tous les scénarios de la Montérégie), pour tenir compte du fait que la proportion de grain dans le fourrage est généralement plus élevée lorsque les UTM le permettent. Ainsi, l'ensilage de maïs a été considéré comme étant 80% fourrage et 20% grains. La fertilisation, préalablement réglée pour répondre aux besoins en N et en P selon les méthodes locales (CRAAQ) a aussi été ajustée pour l'azote afin de considérer l'augmentation des besoins associée à celle des rendements. En Montérégie, les coûts des pesticides ont été augmentés dans le maïs grain et le soya, pour contrebalancer le fait qu'une génération supplémentaire d'insectes est attendue dans le futur (Gagnon et al., 2013). De la même manière, les pertes au champ et la cotisation à l'ASRA ont été augmentées en réaction aux événements météorologiques extrêmes dont la probabilité risque d'augmenter dans le futur (Moreno Prado et al., 2015).

L'optimisation s'est faite de façon à maximiser le bénéfice net. À défaut d'avoir des chiffres fiables sur lesquels se baser, aucune donnée économique n'a été modifiée pour les scénarios futurs,

seules les modifications aux aspects agronomiques précédents ont été considérées. L'évaluation de l'intérêt des différentes graminées fourragères s'est faite sur une base d'impact sur le bénéfice net ainsi que sur le bilan en N et en P et sur les émissions de gaz à effet de serre.

Les valeurs de rendement et de valeurs nutritives simulées dans IFSM ont par la suite été intégrées dans N-CyCLES afin de faire ressortir les impacts économiques et environnementaux de chacune des associations fourragères pour chacune des périodes temporelles. Encore une fois, les regroupements des scénarios climatiques par nombre de coupes possible ont été utilisés. Au Bas-Saint-Laurent, dans la période de référence et dans le futur proche 2 coupes, c'est l'association avec le brome des prés qui permet le plus grand bénéfice net tandis que dans les trois autres regroupements de scénarios climatiques, c'est l'association avec la fétuque élevée qui permet le bénéfice net le plus élevé (Tableau 12). La protéine brute plus élevée de l'association avec le brome des prés l'avantage dans les climats plus modérés. Par contre, les rendements supérieurs de l'association avec la fétuque élevée l'avantage dans le futur. Aussi, l'association avec la fétuque des prés obtient toujours le plus faible bénéfice net. Ce résultat s'explique surtout par le besoin accru en aliments achetés. En effet, la valeur nutritive de l'association avec la fétuque des prés est inférieure à celle des autres associations, ce qui implique que les rations doivent être plus riches en aliments concentrés achetés à l'extérieur de la ferme. L'ampleur des variations de bénéfice net entre les associations d'espèces fourragères pérennes augmente avec l'amplitude du réchauffement attendue, ce qui s'explique principalement par l'impact des rendements en fourrages de qualité sur la possibilité de récolter d'autres cultures pour la vente (maïs grain et soya). Pour ce qui est des proportions d'augmentation du bénéfice net pour chaque période de temps, on remarque qu'en général, pour chacun des scénarios, la plus faible augmentation de bénéfice net par rapport à la période de référence est l'association avec la fléole des prés, sauf pour le regroupement futur lointain 4 coupes. L'augmentation la plus élevée est quant à elle avec l'association avec la fétuque élevée, sauf pour le futur proche 2 coupes. Lorsqu'on prend l'augmentation moyenne des quatre scénarios futurs, la fléole des prés et le brome des prés se traduisent en des bénéfices nets plus faibles que la fétuque des prés et la fétuque élevée. La variation calculée pour le bénéfice net dans le scénario climatique le plus extrême, soit le futur lointain avec 4 coupes, lorsqu'une association de luzerne et fétuque élevée plutôt qu'une association de luzerne et fléole des prés est utilisée, est de l'ordre de 5 649 \$/année pour la ferme type du Bas-St-Laurent. Pour cette ferme, l'impact du climat lors des changements climatiques est majeur. En effet, en ne modifiant que les données agronomiques précédemment décrites, on obtient des bénéfices nets plus que doublés pour la ferme type du Bas-St-Laurent, et ce, peu importe l'association fourragère considérée. Les modifications aux climats devraient permettre des rendements accrus des cultures déjà cultivées sur cette ferme en plus de permettre l'ajout de cultures connues pour être plus rentables (maïs grain et soya). C'est l'augmentation des revenus associés à la vente des cultures qui a le plus gros impact sur le bénéfice net de cette ferme.

Tableau 12. Sources de revenus et de dépenses et bénéfice net (\$/kg de lait corrigé pour le gras et la protéine (LCGP)) selon chacune des quatre associations fourragères utilisés pour la période de référence, le futur proche et le futur lointain au Bas-Saint-Laurent<sup>1</sup>.

	Bas-Saint-Laurent																			
	Référence (1971-2000)				Futur proche (2020-2049)				Futur lointain (2050-2079)											
	2 coupes				2 coupes				3 coupes				3 coupes				4 coupes			
	FL	FÉ	FP	BP	FL	FÉ	FP	BP	FL	FÉ	FP	BP	FL	FÉ	FP	BP	FL	FÉ	FP	BP
<b>Bénéfice net</b>																				
<i>\$/100kg de LCGP<sup>2</sup></i>	11,4	11,5	11,0	11,8	13,0	13,4	13,0	13,8	15,6	16,6	15,4	16,2	23,2	24,2	22,5	24,0	24,7	25,8	23,9	25,0
<b>Revenus, \$/100kg de LCGP</b>																				
Revenus du lait	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3	73,3
Animaux vendus	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
Revenus des cultures	5,3	5,3	5,3	4,3	7,9	8,0	7,7	6,3	9,4	9,4	10,2	9,5	25,1	24,6	25,7	24,7	27,8	26,9	27,8	27,7
<b>Dépenses, \$/100kg de LCGP</b>																				
Aliments achetés	10,9	10,4	11,5	9,4	11,6	11,5	12,2	9,3	8,2	7,1	9,1	7,6	11,5	9,8	12,5	10,3	11,2	9,4	12,3	10,5
Aliments cultivés	12,2	12,5	12,0	12,7	12,3	12,2	11,9	12,5	14,5	15,0	14,7	14,9	19,7	19,7	20,1	19,8	21,5	21,2	21,2	21,6
Fertilisants	2,4	2,4	2,3	2,1	2,5	2,5	2,3	2,3	2,7	2,4	2,7	2,4	2,2	2,4	2,1	2,2	2,1	2,1	2,1	2,1
Épandage des fumiers	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Coûts variables + fixes	47,8	47,8	47,8	47,8	47,8	47,8	47,8	47,8	47,8	47,8	47,8	47,8	47,8	47,8	47,8	47,8	47,8	47,8	47,8	47,8

<sup>1</sup>FL : luzerne + Fléole des prés; FÉ : Luzerne + Fétuque élevée; FP : Luzerne + Fétuque des prés; BP : Luzerne + Brome des prés.

<sup>2</sup>LCGP : Lait corrigé pour le gras et la protéine.

En Montérégie, l'association de luzerne avec le brome des prés est associée au bénéfice net le plus élevé pour tous les scénarios, alors que celle avec la fétuque des prés est toujours associée au plus faible bénéfice (Tableau 13). Bien que la fétuque élevée ait toujours un meilleur rendement que le brome des prés dans le futur, l'écart de protéine brute entre les deux espèces est plus important que dans le Bas-Saint-Laurent, ce qui explique la différence de résultats entre les deux régions. En effet, dans le Bas-Saint-Laurent, le rendement de l'association avec la fétuque élevée est entre 2,1 et 5,3 % supérieur à celui du brome des prés tandis que ce dernier a une teneur en protéines brutes entre 5,0 et 5,9 % plus élevée. Or, en Montérégie, il est vrai que le rendement de la fétuque élevée est supérieur de 1,1 à 8,2 %, mais la teneur en protéine brute de l'association avec le brome des prés est de 7,7 à 14,2 % supérieure à celle de l'association avec la fétuque élevée. Si la teneur en protéine brute est supérieure, moins de concentrés seront achetés, ce qui vient augmenter le bénéfice net de l'entreprise. Ceci dit, les variations de bénéfice net entre les associations sont moins importantes en Montérégie qu'au Bas-Saint-Laurent. Par exemple, la différence de bénéfice net entre l'association avec du brome des prés et celle avec de la fléole des prés dans le futur lointain 5 coupes n'est que de 1843 \$/année en Montérégie alors qu'il est de 5 649 \$/année au Bas-Saint-Laurent. Donc, en Montérégie, toutes les associations sont compétitives et ils le resteront dans le futur selon nos projections et il est possible de confirmer que le Bas-Saint-Laurent bénéficiera davantage du réchauffement climatique que la Montérégie. La proportion d'augmentation du bénéfice net à travers le temps est semblable pour toutes les associations fourragères, quoique légèrement inférieure pour l'association avec le brome des prés dans les regroupements de scénarios climatiques pour le futur proche 4 coupes et le futur lointain 4 coupes.

Tableau 13. Sources de revenus et de dépenses et bénéfice net (\$/kg de LCGP) selon chacune des quatre associations fourragères utilisées pour la période de référence, le futur proche et le futur lointain en Montérégie<sup>1</sup>

	Montérégie															
	Référence (1971-2000)				Futur proche (2020-2049)				Futur lointain (2050-2079)							
	3 coupes				4 coupes				4 coupes				5 coupes			
	FL	FÉ	FP	BP	FL	FÉ	FP	BP	FL	FÉ	FP	BP	FL	FÉ	FP	BP
<b>Bénéfice net</b>																
\$/100kg de LCGP <sup>2</sup>	21,6	21,6	21,3	21,9	24,2	24,4	24,0	24,5	24,9	24,9	24,6	25,0	24,7	24,5	24,2	25,0
<b>Revenus, \$/100kg de LCGP</b>																
Revenus du lait	73,5	73,5	73,5	73,5	73,5	73,5	73,5	73,5	73,5	73,5	73,5	73,5	73,5	73,5	73,5	73,5
Animaux vendus	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7	9,7
Revenus des cultures	10,4	10,9	10,6	10,4	13,6	14,6	13,9	13,5	15,2	16,7	16,0	15,7	13,3	16,3	15,5	13,5
<b>Dépenses, \$/100kg de LCGP</b>																
Aliments achetés	13,8	14,3	14,4	13,4	12,8	13,3	13,3	12,1	12,6	13,7	13,5	12,7	10,8	13,4	13,1	10,6
Aliments cultivés	12,6	12,7	12,5	12,7	14,3	14,6	14,2	14,4	14,9	15,2	14,9	15,0	14,9	15,5	15,2	15,0
Fertilisants	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	1,2	1,2	1,2	1,6	1,7	1,7	1,7	1,6	1,8	1,8	1,7
Épandage des fumiers	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Coûts variables + fixes	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6	43,6

<sup>1</sup>FL : luzerne + Fléole des prés; FÉ : Luzerne + Fétuque élevée; FP : Luzerne + Fétuque des prés; BP : Luzerne + Brome des prés.

<sup>2</sup>LCGP : Lait corrigé pour le gras et la protéine.

Pour ce qui est du bilan environnemental de la ferme type dans le Bas-Saint-Laurent (Tableau 14), l'association avec la fléole des prés obtient les bilans P les plus élevés dans tous les regroupements de scénarios climatiques. Les bilans P les plus faibles sont obtenus avec les associations luzerne et brome des prés et luzerne et fétuque élevée. Le P exporté dans les récoltes vendues explique majoritairement ce résultat. En effet, de meilleurs rendements fourragers permettent d'utiliser plus de superficies pour les grandes cultures qui sont ensuite majoritairement vendues. Cela s'amplifie lorsque la valeur nutritive de l'association est élevée parce que moins de concentrés sont nécessaires pour répondre aux besoins des vaches. Pour ce qui est des bilans N, l'association avec la fétuque élevée est généralement associée aux bilans les plus faibles, ce qui s'explique encore une fois par une meilleure combinaison de rendements et de valeurs nutritives de chacune des associations. Les bilans N et P diminuent dans le temps et selon les scénarios de coupes. Le bilan P devient même négatif dans le futur lointain. Les recommandations pour la fertilisation devront donc être ajustées pour cette période. Pour ce qui est des émissions de gaz à effet de serre (GES), les émissions sont comparables entre les associations fourragères dans la période de référence et dans le futur proche 2 coupes, tandis que l'association avec la fétuque élevée et celui avec la fétuque des prés ont les émissions les plus faibles dans le futur proche 2 coupes et le futur lointain 3 coupes, respectivement. La majorité de la production de GES au niveau de la ferme est associée à la production du lait, ce qui était attendu. En effet, les fermes simulées tirent leurs principaux revenus de la production laitière. Il est intéressant de constater que l'allocation des GES pour la vente de récolte augmente. Ainsi, la quantité de produits sur la ferme augmente, et avec cette augmentation de productivité, la portion des ressources et de leurs émissions allouées à la production laitière diminue. Comme le lait est sous gestion de l'offre, la quantité de lait produite reste quant à elle stable dans le temps. Encore une fois, si l'on regarde la moyenne des quatre scénarios pour chaque association fourragère, le bilan P diminue plus pour les associations

contenant la fétuque élevée et le brome des prés que la fétuque des prés et la fléole des prés. Pour ce qui est du bilan N, ce dernier diminue de façon similaire pour les quatre associations. C'en est de même pour les GES.

Tableau 14. Bilan (kg/an) en phosphore (P) et en azote (N), émissions de GES (ég, CO<sub>2</sub>/kg LCGP) de la ferme dans son ensemble selon chacune des quatre associations fourragères utilisées pour la période de référence, le futur proche et le futur lointain dans le Bas-Saint-Laurent<sup>1</sup>

	Bas-Saint-Laurent																			
	Référence (1971-2000)				Futur proche (2020-2049)				Futur lointain (2050-2079)											
	2 coupes				2 coupes				3 coupes				3 coupes				4 coupes			
	FL	FÉ	FP	BP	FL	FÉ	FP	BP	FL	FÉ	FP	BP	FL	FÉ	FP	BP	FL	FÉ	FP	BP
<b>Bilan P</b>																				
g/kg of LCGP <sup>2</sup>	2,44	1,79	2,01	1,76	2,16	1,66	1,85	1,54	1,51	0,95	1,20	0,97	-0,58	-0,77	-0,69	-0,79	-0,99	-1,13	-0,98	-1,15
<i>P importé, g/kg of LCGP</i>																				
Aliments achetés	1,75	1,66	1,86	1,58	1,99	1,89	1,12	1,44	1,29	1,12	1,51	1,18	1,86	1,58	2,05	1,67	1,78	1,44	1,83	1,68
Fertilisants	2,56	2,04	2,03	1,92	2,46	2,11	1,99	2,13	2,54	2,11	2,09	2,10	1,22	1,25	1,00	1,16	1,20	1,27	1,14	1,11
<i>P exporté, g/kg of LCGP</i>																				
Lait et animaux	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12	1,12
Cultures vendues	0,75	0,79	0,75	0,62	1,17	1,22	1,15	0,91	1,20	1,17	1,28	1,20	2,54	2,47	2,61	2,50	2,84	2,73	2,83	2,82
<b>Bilan N</b>																				
g/kg of LCGP	18,1	16,9	18,3	18,9	16,9	15,6	17,0	16,9	15,3	14,6	15,2	14,8	10,0	9,5	9,8	10,5	7,9	8,3	8,8	8,2
<i>N importé, g/kg of LCGP</i>																				
Aliments achetés	11,5	9,7	12,6	9,0	13,8	12,2	14,0	9,9	7,5	6,1	8,8	6,9	11,0	9,0	12,5	9,7	10,4	7,9	11,6	9,4
Fertilisants	7,8	8,2	7,9	6,9	8,3	8,4	8,0	7,7	9,0	8,0	9,3	8,3	8,0	8,5	7,6	8,1	7,7	7,7	7,2	7,8
Fixation de N	8,9	8,9	7,8	11,9	7,4	7,6	6,8	10,3	10,9	12,2	9,6	11,6	12,1	12,4	11,4	13,5	13,4	15,0	13,3	14,4
<i>N exporté, g/kg of LCGP</i>																				
Lait et animaux	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9
Cultures vendues	5,7	5,6	5,7	4,6	8,3	8,4	8,1	6,7	7,8	7,4	8,2	7,6	16,8	16,0	17,5	16,4	19,3	18,0	19,0	19,1
<b>Émissions GES, CO<sub>2</sub>eq/ kg LCGP</b>																				
Allocation au lait	1,49	1,48	1,48	1,51	1,44	1,43	1,44	1,47	1,35	1,33	1,37	1,36	1,19	1,20	1,16	1,21	1,22	1,24	1,22	1,23
Allocation à la viande	0,31	0,31	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30	0,31	0,28	0,28	0,28	0,28	0,25	0,25	0,24	0,25	0,25	0,26	0,25	0,25
Allocation aux cultures vendues	0,12	0,12	0,12	0,10	0,17	0,17	0,17	0,14	0,19	0,19	0,21	0,20	0,45	0,44	0,45	0,45	0,51	0,50	0,51	0,51
Total	1,92	1,91	1,91	1,92	1,91	1,90	1,91	1,92	1,82	1,80	1,86	1,84	1,89	1,89	1,85	1,91	1,98	2,00	1,98	1,99

<sup>1</sup>FL : luzerne + Fléole des prés; FÉ : Luzerne + Fétuque élevée; FP : Luzerne + Fétuque des prés; BP : Luzerne + Brome des prés.

<sup>2</sup>LCGP : Lait corrigé pour le gras et la protéine.

En Montérégie, le bilan P est généralement faible pour tous les scénarios et toutes les associations fourragères (Tableau 15). Ici aussi, il sera nécessaire d'assurer un suivi adéquat pour les recommandations en P dans le futur puisque l'augmentation du P dans les récoltes vendues résulte en des bilans P négatifs dans le futur. Dans cette région, la charge animale par hectare est plus élevée et le fumier est souvent la source principale de fertilisants. Pour ce qui est du bilan N, c'est l'association avec la fétuque des prés qui a le bilan N le plus élevé. Un certain ajustement dans la fertilisation en N a été considéré lors de l'établissement des rendements dans IFSM pour les scénarios climatiques projetant de plus grands réchauffements et cet ajout de N a suivi lors des simulations dans N-CyCLES. Ainsi, le bilan N est plus stable que le bilan P dans les regroupements de scénarios climatiques futurs. Ce résultat démontre l'importance de revoir

périodiquement les recommandations en fertilisations en fonction des besoins des cultures dans le futur. Pour ce qui est des GES, les émissions sont comparables entre les associations, mis à part pour les scénarios climatiques futur lointain 5 coupes pour lequel il y a plus de fluctuation entre les associations fourragères. Ces dernières fluctuations sont en lien avec la productivité globale de la ferme. En effet, les associations fourragères qui permettent une plus grande productivité dans les champs sont associées à une émission un peu plus élevée de GES sur la ferme dans son ensemble. Par contre, une part moins grande de ces GES est allouée à la production laitière. Lorsqu'on regarde les résultats en termes de moyenne de diminution du bilan P par rapport à la période de référence pour chacune des associations fourragères, on constate que le bilan P diminue le plus pour l'association avec le brome des prés alors qu'il diminue le moins avec l'association avec la fétuque des prés. Pour ce qui est du bilan N, ce dernier diminue de façon similaire pour les quatre associations. Finalement, l'émission de GES augmente de la même façon pour les quatre associations.

Tableau 15. Bilan (kg/an) en phosphore (P) et en azote (N), émissions de GES (éq, CO<sub>2</sub>/kg LCGP) de la ferme dans son ensemble selon chacune des quatre associations fourragères utilisées pour la période de référence, le futur proche et le futur lointain en Montérégie<sup>1</sup>

	Montérégie															
	Référence (1971-2000)				Futur proche (2020-2049)				Futur lointain (2050-2079)							
	3 coupes				4 coupes				4 coupes				5 coupes			
	FL	FÉ	FP	BP	FL	FÉ	FP	BP	FL	FÉ	FP	BP	FL	FÉ	FP	BP
<b>Bilan P</b>																
g/kg of LCGP <sup>2</sup>	0,34	0,33	0,40	0,26	-0,22	-0,31	-0,19	-0,28	-0,42	-0,37	-0,28	-0,40	-0,60	-0,43	-0,46	-0,54
<i>P importé, g/kg of LCGP</i>																
Aliments achetés	2,65	2,70	2,74	2,57	2,46	2,48	2,52	2,38	2,44	2,66	2,66	2,51	2,04	2,55	2,44	2,12
Fertilisants	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>P exporté, g/kg of LCGP</i>																
Lait et animaux	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11	1,11
Cultures vendues	1,20	1,26	1,23	1,20	1,57	1,68	1,60	1,55	1,75	1,92	1,83	1,80	1,53	1,87	1,79	1,56
<b>Bilan N</b>																
g/kg of LCGP	16,0	15,9	16,5	15,8	13,4	13,3	13,9	13,4	15,0	15,1	15,5	15,1	13,7	15,1	15,3	14,3
<i>N importé, g/kg of LCGP</i>																
Aliments achetés	16,9	17,4	17,6	16,2	15,4	15,7	15,9	14,6	15,7	16,8	16,5	15,4	12,6	16,2	15,8	12,9
Fertilisants	4,9	4,9	5,2	5,2	4,8	4,9	5,2	5,1	6,9	7,2	7,3	7,3	6,9	7,5	7,6	7,1
Fixation de N	6,9	6,7	6,6	7,2	8,4	8,4	8,1	8,7	8,6	8,3	8,3	8,7	9,2	8,5	8,4	9,5
<i>N exporté, g/kg of LCGP</i>																
Lait et animaux	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9	5,9
Cultures vendues	7,9	8,2	8,0	7,9	10,2	10,9	10,4	10,1	11,2	12,2	11,7	11,5	10,1	12,2	11,6	10,3
<b>Émissions GES, CO<sub>2</sub> eq/ kg LCGP</b>																
Allocation du lait	1,29	1,28	1,30	1,31	1,28	1,27	1,29	1,29	1,33	1,31	1,32	1,33	1,37	1,34	1,36	1,38
Allocation de la viande	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,25	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,27	0,27	0,27	0,27
Allocation des cultures vendues	0,19	0,20	0,20	0,20	0,25	0,27	0,26	0,25	0,29	0,32	0,30	0,30	0,26	0,31	0,30	0,27
Total	1,74	1,74	1,76	1,77	1,79	1,79	1,81	1,80	1,88	1,89	1,88	1,89	1,90	1,92	1,93	1,92

<sup>1</sup>FL : luzerne + Fléole des prés; FÉ : Luzerne + Fétuque élevée; FP : Luzerne + Fétuque des prés; BP : Luzerne + Brome des prés.

<sup>2</sup>LCGP : Lait corrigé pour le gras et la protéine.

En résumé, l'objectif de cette partie du projet était de projeter l'impact du choix de l'association luzerne-graminée sur la rentabilité et la performance environnementale de deux fermes laitières québécoises localisées dans des climats opposés dans le futur proche (FP : 2020-2049) et lointain (2050-2079) en considérant des modifications dans l'allocation des cultures dans les champs. Les résultats de l'étude précédente ont servi de base à cette étude pour les comparaisons de : 1) luzerne-fléole des prés; 2) luzerne-fétuque élevée; 3) luzerne-fétuque des prés; 4) luzerne-brome des prés. Le rendement et les valeurs nutritives projetés ont été utilisés comme entrées dans un modèle d'optimisation (Nutrient Cycling : Crops, Livestock, Environment and Soil; N-CyCLES) qui avait été préalablement ajusté pour tenir compte des contraintes associées aux changements climatiques. Les résultats des simulations ont montré que comparé à la période de référence, le bénéfice net pourrait augmenter dans les deux fermes, avec la différence la plus importante étant de 13,4 \$ CAN et 3,2\$ /kg de lait corrigé pour le gras et la protéine pour les fermes dans les régions du Bas-Saint-Laurent et de la Montérégie, respectivement. Les balances de N et P à la ferme

devraient diminuer dans le futur à cause de l'augmentation de la vente de cultures. Les projections d'émissions de GES augmentent de la même façon pour les quatre associations, mais plus de gaz à effet de serre devrait être attribué aux cultures commerciales et moins à la production laitière dans le futur comparé à la période de référence. Ceci s'explique principalement par l'augmentation de la productivité globale des fermes. Autrement dit, on s'attend à plus d'aliments produits au total par ferme. Les associations fourragères avec le bénéfice net le plus élevé étaient la luzerne avec la fétuque élevée ou le brome des prés dépendamment de la région et des simulations climatiques. Finalement, il sera intéressant de considérer des projections du bénéfice net et des paramètres environnementaux à l'aide d'une approche fondée sur un modèle à l'échelle de la ferme entière pour améliorer l'allocation des cultures sur les fermes laitières.

**e. Évaluer l'augmentation des risques de stress thermiques et leurs effets sur les performances des vaches laitières au Québec dans un contexte de changements climatiques (Objectif spécifique 4)**

La chaleur émane de tous les processus physiologiques survenant aux différentes échelles cellulaires chez la vache laitière. Cette chaleur, nommée chaleur métabolique, doit être dissipée dans l'environnement afin que l'animal maintienne une température corporelle stable, ce qui est un prérequis à son fonctionnement optimal. Pour ce faire, quatre voies d'échange de chaleur sont empruntées : la radiation, la conduction, la convection et l'évaporation. Le taux d'échange de chaleur observé entre la vache et son environnement dépend alors des gradients de température et d'eau existant entre l'interface peau-environnement. Ainsi, les mécanismes de dissipation de chaleur perdent de leur efficacité lorsque la température et l'humidité s'élèvent parallèlement tel qu'il est possible de l'observer pendant l'été au Québec. La chaleur métabolique peut alors s'accumuler et entraîner une augmentation de la température corporelle de la vache et provoquer du même coup un stress thermique. En fin de compte, le stress thermique est une condition qui survient lorsque les pressions environnementales dépassent la capacité de dissipation de chaleur de l'animal; elle est ainsi directement associée au climat.

Chez la vache laitière, le stress thermique enclenche plusieurs mécanismes d'adaptations physiologiques visant à diminuer la production de chaleur métabolique et à augmenter les pertes de chaleur via les voies nommées plus haut. Bien que ces mécanismes soient essentiels à la survie de l'animal, ceux-ci sont reconnus pour entraîner des impacts négatifs au niveau des performances de production et de reproduction, ainsi que de la santé et du bien-être (Wheelock et al., 2010; Schüller et al., 2014). Les effets observés au niveau de l'animal se répercutent ultimement sur l'ensemble de la ferme et de la filière laitière.

La problématique du stress thermique et ses effets inhérents ont été traités à de nombreuses reprises pendant les dernières années, et ce, principalement dans le cadre d'études conduites en climat tropical ou aride ou en chambres climatiques contrôlées reproduisant les conditions de ces climats. Jusqu'à maintenant peu d'études concernant le stress thermique ont été menées en contextes climatique et de production comparables à ceux du Québec. D'ailleurs, l'enquête menée par notre équipe de recherche auprès de 194 producteurs laitiers en 2016 et présenté dans le cadre du présent rapport a démontré que 74 % des répondants considéraient que le climat a des effets négligeables sur les animaux. Pourtant, les données mensuelles collectées par le

réseau canadien pour l'excellence laitière Lactanet démontrent que les performances des troupeaux laitiers québécois sont plus faibles pendant les mois les plus chauds de l'année. Ces diminutions sont potentiellement attribuables au stress thermique. De plus, considérant les tendances dégagées des projections climatiques effectuées par le consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques Ouranos, la fréquence et l'intensité des épisodes de stress thermique devraient augmenter dans le futur. Le manque d'information concernant le stress thermique au Québec représente actuellement un frein majeur à l'optimisation des performances des animaux tout au long de l'année et à la durabilité économique des fermes laitières québécoises en contextes climatiques actuel et futur. C'est dans cette optique que le programme de recherche concernant le stress thermique au Québec présenté dans le cadre de ce rapport a été élaboré.

**i. Est-ce que les conditions actuelles des étables québécoises peuvent causer un stress thermique?**

Le niveau de stress thermique subi par une vache laitière est souvent évalué grâce au calcul d'un indice bioclimatique sans unité combinant l'effet de la température et de l'humidité sur le bilan thermique des animaux: l'indice de température-humidité (ITH). Dans la littérature, des seuils d'ITH allant de 62 à 72 (Lambertz et al., 2014; Ravagnolo et al., 2002) sont associés à l'apparition des impacts négatifs liés au stress thermique. Ces seuils varient en fonction de la race, du stade physiologique de l'animal et selon le climat dans lequel il a été élevé (Kadzere et al., 2002).

Dans le cadre des études réalisés dans ce projet par notre équipe, nous avons d'abord visé à déterminer si les conditions environnementales actuelles des étables laitières québécoises moyennes, exprimées sous forme d'ITH, sont en mesure de provoquer un stress thermique. Pour ce faire, nous avons mesuré la température ambiante et l'humidité relative de six fermes laitières en stabulation entravée dont trois étaient situées au Bas-Saint-Laurent et trois en Montérégie. Ces régions ont été ciblées pour leur contribution à la filière laitière provinciale et puisqu'elles sont climatiquement contrastées. Chaque ferme a été munie de trois capteurs (2 à l'intérieur, 1 à l'extérieur) permettant de mesurer en continu la température et l'humidité pour la période s'échelonnant du mois d'août 2016 au mois d'août 2017. Pour les deux régions, nos résultats ont démontré que la température mesurée à l'intérieur des étables était plus élevée ( $P < 0,001$ ) que celle mesurée à l'extérieur. Pour sa part, l'humidité relative était numériquement plus faible à l'intérieur qu'à l'extérieur des étables. En fin de compte, l'ITH journalier moyen mesuré à l'intérieur des étables pendant les mois de juin, juillet et août étaient de 66,2 pour le Bas-Saint-Laurent et de 69,5 pour la Montérégie (Figure 5; Ouellet et al., 2019). De plus, l'ITH moyen mesuré à l'intérieur des étables était plus élevé ( $P < 0,05$ ) que l'ITH mesuré à l'extérieur.

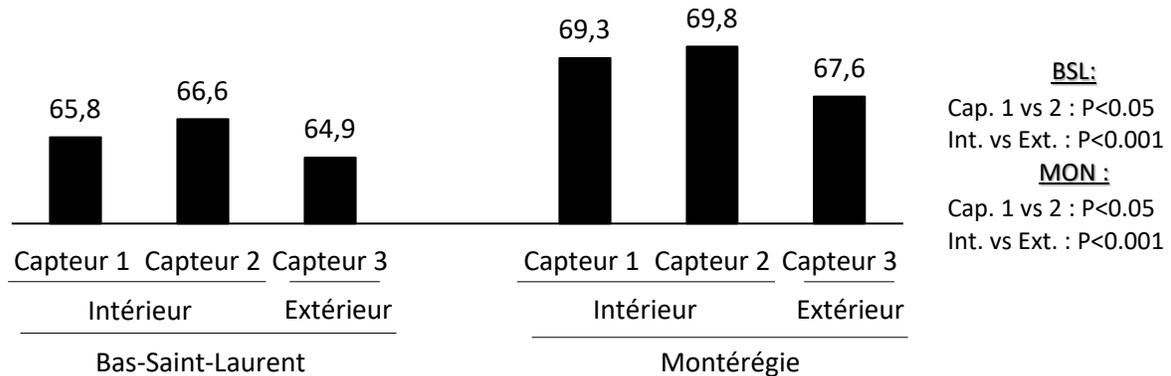


Figure 5. Indice de température-humidité (ITH) moyen mesurée pendant l'été (août 2016 et de juin à août 2017) au Bas-Saint-Laurent et en Montérégie

Ultimement, les résultats obtenus dans le cadre cette première expérience ont suggéré que les conditions environnementales observées à l'intérieur des fermes, munies d'un système de ventilation installé en respectant les recommandations du manufacturier, pouvaient à certaines périodes provoquer un stress thermique chez la vache laitière et potentiellement causer les impacts négatifs associés à cette condition.

## ii. Les impacts actuels du stress thermique sur les performances de production des vaches laitières québécoises.

Dans le cadre de la deuxième étude concernant le stress thermique au Québec, la relation entre les performances de production et la durée des épisodes de stress thermique a été caractérisée grâce à un modèle multivarié dans le but ultime d'évaluer l'impact du stress thermique sur les performances de production des vaches laitières québécoises en contexte climatique actuel (2010-2015). Pour ce faire, une banque de données incluant plus de 600 000 contrôles de la production de 34 360 vaches a été utilisée et bonifiée de données environnementales exprimées sous forme d'ITH. L'indice de température-humidité a été calculé pour la journée du test et pour les 16 jours la précédant. Ensuite, des régressions linéaires ont été effectuées et ont révélé un délai de 24 heures entre un stress thermique et les impacts négatifs qui lui sont associés. Les résultats ont aussi suggéré que le stress thermique avait un effet persistant de huit jours sur les performances de production des vaches laitières de la banque de données. Ainsi, chaque jour de test a été assigné à une catégorie d'exposition au stress thermique : 0 = aucune exposition, 1-2 = 1 à 2 jours d'exposition, 3-4 = 3 à 4 jours d'exposition, 5-6 = 5 à 6 jours d'exposition, et 7-8 = 7 à 8 jours d'exposition. Le modèle final utilisé pour évaluer la relation entre le stress thermique et les performances de production incluait les jours en lait, la catégorie d'exposition au stress thermique, la génétique, la lactation et l'interaction entre les jours en lait et la lactation comme effets fixes. Les effets imbriqués de l'animal (troupeau), du troupeau (mois de vêlage) et de l'animal (troupeau x lactation x année de vêlage x mois de vêlage) ont été considérés comme effets aléatoires.

Ultimement, des pertes de production de 20 g de gras par vache par jour suite à une exposition d'un à deux jours de stress thermique et des pertes de protéines variant de 20 à 30 g par vache par jour selon la parité de l'animal ont été mesurées après trois ou quatre jours d'exposition au stress thermique (Tableau 16). Toutefois, contrairement à ce qui est rapporté dans les études menées en climats tropicaux ou en chambres contrôlées reproduisant ces conditions (Wheelock et al., 2010), aucune relation ( $P > 0,05$ ) n'a été observée entre la durée des épisodes de stress thermique et les productions de lait et de lactose. Considérant le système de paiement du lait actuellement basé sur les composants laitiers, nos résultats suggèrent que le stress thermique, en entraînant des pertes de gras et de protéines dans le lait, peut également avoir des effets sur la rentabilité des fermes laitières.

Tableau 16. Production laitière (kg/j) et composants du lait (% , kg/j) de vaches laitières québécoises en fonction de la parité et de la durée de l'exposition à un stress thermique pendant les années 2010-2015.

Variable <sup>1</sup>	Première lactation					Deuxième lactation					Troisième lactation et plus					
	0	1-2	3-4	5-6	7-8	0	1-2	3-4	5-6	7-8	0	1-2	3-4	5-6	7-8	ET
Lait (kg/j)	25,9	25,9	26,0	26,0	25,9	29,0	29,0	29,1	29,1	29,2	28,5	28,6	28,7	28,9	28,7	0,15
LCGP <sup>2</sup> (kg/j)	26,1 <sup>a</sup>	25,9 <sup>b</sup>	25,7 <sup>c</sup>	25,7 <sup>c</sup>	25,3 <sup>d</sup>	29,1 <sup>a</sup>	28,9 <sup>b</sup>	28,6 <sup>b</sup>	28,6 <sup>b</sup>	28,1 <sup>c</sup>	27,9 <sup>a</sup>	27,4 <sup>b</sup>	27,3 <sup>c</sup>	27,2 <sup>c</sup>	26,8 <sup>d</sup>	0,11
Gras (%)	4,15 <sup>a</sup>	4,09 <sup>b</sup>	4,03 <sup>c</sup>	4,00 <sup>d</sup>	3,96 <sup>e</sup>	4,15 <sup>a</sup>	4,08 <sup>b</sup>	4,01 <sup>c</sup>	3,96 <sup>d</sup>	3,94 <sup>e</sup>	4,13 <sup>a</sup>	4,05 <sup>b</sup>	3,98 <sup>c</sup>	3,95 <sup>d</sup>	3,92 <sup>e</sup>	0,02
Gras (kg/j)	1,03 <sup>a</sup>	1,02 <sup>b</sup>	1,00 <sup>c</sup>	1,00 <sup>c</sup>	0,97 <sup>d</sup>	1,17 <sup>a</sup>	1,15 <sup>b</sup>	1,13 <sup>c</sup>	1,13 <sup>c</sup>	1,12 <sup>c</sup>	1,24 <sup>a</sup>	1,22 <sup>b</sup>	1,21 <sup>b</sup>	1,20 <sup>c</sup>	1,17 <sup>d</sup>	0,04
Protéine (%)	3,38 <sup>a</sup>	3,34 <sup>b</sup>	3,31 <sup>c</sup>	3,30 <sup>c</sup>	3,27 <sup>d</sup>	3,44 <sup>a</sup>	3,40 <sup>b</sup>	3,36 <sup>c</sup>	3,34 <sup>d</sup>	3,32 <sup>e</sup>	3,36 <sup>a</sup>	3,32 <sup>b</sup>	3,29 <sup>c</sup>	3,27 <sup>d</sup>	3,24 <sup>e</sup>	0,01
Protéine (kg/j)	0,86 <sup>a</sup>	0,86 <sup>a</sup>	0,84 <sup>b</sup>	0,84 <sup>b</sup>	0,82 <sup>c</sup>	1,00 <sup>a</sup>	0,99 <sup>a</sup>	0,97 <sup>b</sup>	0,96 <sup>b</sup>	0,95 <sup>c</sup>	0,95 <sup>a</sup>	0,95 <sup>a</sup>	0,93 <sup>b</sup>	0,92 <sup>b</sup>	0,89 <sup>c</sup>	0,01
Lactose (%)	4,65	4,65	4,66	4,65	4,66	4,52	4,53	4,53	4,53	4,53	4,37	4,37	4,39	4,38	4,39	0,02
Lactose (kg/j)	1,21	1,22	1,22	1,22	1,22	1,34	1,33	1,34	1,33	1,34	1,26	1,27	1,27	1,28	1,29	0,01

<sup>a-e</sup> Les moyennes des vaches du même groupe de parité avec des lettres différentes diffèrent significativement ( $P \leq 0.05$ ).

<sup>1</sup> 0 = aucune exposition au stress thermique; 1-2 = 1 ou 2 jours consécutifs avec un stress thermique; 3-4 = 3 ou 4 jours consécutifs avec un stress thermique; 5-6 = 5 ou 6 jours consécutifs avec un stress thermique; 7-8 = 7 ou 8 jours consécutifs avec un stress thermique; ET = erreur type.

<sup>2</sup>LCGP : lait corrigé pour le gras et la protéine calculé selon la formule de Madsen et al. (2008):  $LCGP = 23,8 \times (\text{protéines, kg/j}) + 38,9 \times (\text{gras, kg/j}) + 16,3 \times (\text{lactose, kg/j}) / 3,14$

### **iii. L'évolution des effets du stress thermique dans un contexte de changements climatiques**

Dans l'ensemble du Canada, le prix du lait versé aux producteurs laitiers (\$/hl) est directement lié à sa composition en gras, protéines, lactose et autres solides. Dans le but de maximiser les revenus issus de la vente de lait, les producteurs laitiers ont alors avantage à minimiser leurs coûts de production tout en optimisant les performances de leurs animaux, et ce, tout au long de l'année. Dans le cadre la troisième étude en lien avec le stress thermique, les pertes économiques associées aux diminutions de performances en conditions de stress thermique dans un contexte de changements climatiques ont été calculées. Pour ce faire, la base de données de contrôles laitiers et de conditions climatiques compilées pendant 6 ans décrite dans le projet précédent a été utilisée afin de développer des équations de prédiction des performances de production. La production (kg/j) de lait, gras, protéines et de lactose des troupeaux ont été projetées sous les conditions climatiques issus des six scénarios décrits dans les objectifs 1 et 2 du présent rapport pendant une période de référence climatique (REF: 1971 à 2000) et deux horizons futurs (FUT1: 2020 à 2049; FUT2: 2050 à 2079). Ultimement, les pertes économiques ont été évaluées en suivant une méthodologie de budget partiel en comparant le prix du lait du futur à celui de la période de référence.

Globalement, les scénarios climatiques utilisés dans cette étude suggèrent une augmentation de la fréquence et de l'intensité des épisodes de stress thermique dans le futur proche et dans le futur lointain comparativement à la période de référence (Figure 6).

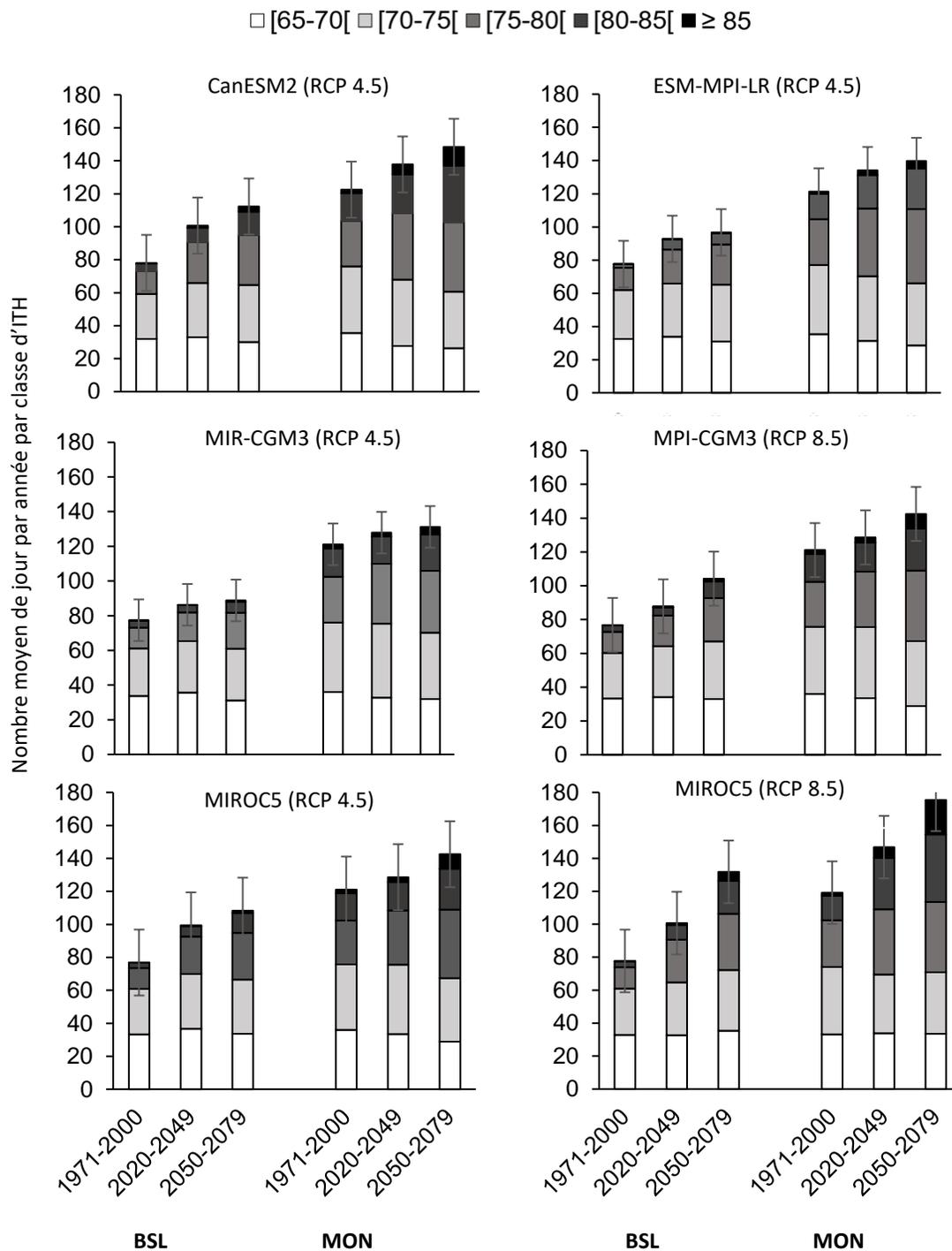


Figure 6. Moyenne ( $\pm$  écart-type) du nombre annuel de jours avec un indice de température-humidité (ITH) plus grand que 65 et par classe d'ITH (□ : [65-70[ , □ : [70-75[ , ■ : [75-80[ , ■ : [80-85[ , ■ :  $\geq 85$ ) selon six scénarios climatiques pour trois périodes (1971-2000; 2020-2049; 2050-2079) dans deux régions du Québec (BSL : Bas-Saint-Laurent; MON : Montérégie)

Plus spécifiquement, au Bas-Saint-Laurent, on note que les vaches seraient exposées en moyenne par année à 77,3, 95,3, et 108,5 jours susceptibles de causer un stress thermique pendant la période de référence, le futur proche et le futur lointain respectivement. Pour leur part, les vaches de la Montérégie seraient exposées en moyenne par année à 120,8, 138,1 et 145,3 jours susceptibles de causer un stress thermique pendant la période de référence, le futur proche et le futur lointain respectivement. Dans les deux régions, nos résultats indiquent également que le nombre de jours avec un ITH se retrouvant dans la classe 80 à 85 et supérieur à 85 devrait augmenter dans le futur. En plus de la fréquence et de l'intensité, nos résultats suggèrent que la durée des épisodes de stress thermique devrait augmenter dans le futur dans les deux régions agricoles étudiées alors que le nombre d'épisodes de stress thermique de 7 à 8 jours consécutifs devrait augmenter dans les deux régions (Figure 7).

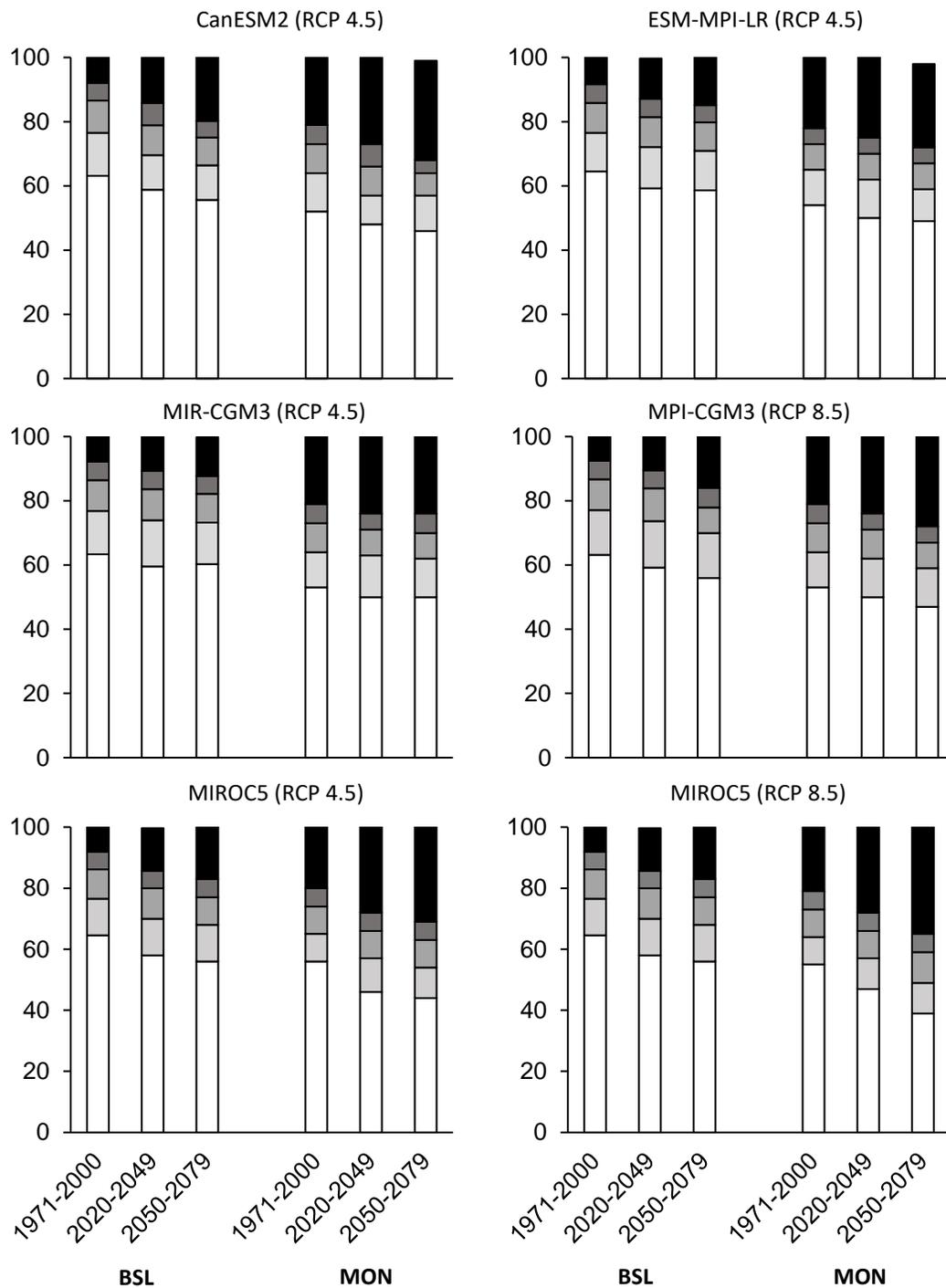


Figure 7. Proportion annuelle (%) de jours sans stress thermique □ et d'épisodes de stress thermique avec 1-2, 3-4, 5-6, 7-8 journées consécutives pouvant provoquer un stress thermique selon six scénarios climatiques pour trois périodes (1971-2000; 2020-2049; 2050-2079) dans deux régions du Québec (BSL : Bas-Saint-Laurent; MON : Montérégie)

Dans la région du Bas-Saint-Laurent, en utilisant les résultats des six scénarios climatiques, nous avons calculé que l'évolution de la fréquence et de la durée des épisodes de stress thermique pendant les années 2020–2049 pourrait se traduire par des diminutions moyennes de production gras et de protéines de et de 2406 et 1990 kg/année par troupeau comparativement à la période de référence (Tableau 17; Tableau 18). Dans la région de la Montérégie, des pertes moyennes de gras et de protéines de 2361 et de 2056 kg/année par troupeau ont respectivement été projetées dans le futur proche comparativement à la période de référence. Dans les deux régions, les pertes de composants laitiers étaient légèrement supérieures lorsque le futur lointain (2050–2079) était comparé à la période de référence.

Tableau 17. Productions moyennes ( $\pm$  écart-type) de gras (kg/an) par troupeau par année obtenus pour la période de référence (1971-2000), pour le futur proche (2020-2049) et pour le futur lointain (2050-2070) selon divers scénarios climatiques.

	1971-2000		2020-2049		2050-2079	
	Gras (kg/an/troupeau)	Écart- Type (kg)	Gras (kg/an/troupeau)	Écart- Type (kg)	Gras (kg/an/troupeau)	Écart- Type (kg)
<b><i>Bas-Saint-Laurent</i></b>						
CanESM2 (RCP 4.5)	21 465	3656	19 050	3658	19 025	3653
MPI-ESM-LR (RCP 4.5)	21 466	3652	19 065	3660	19 054	3658
MRI-CGM3 (RCP 4.5)	21 466	3657	19 074	3662	19 071	3661
MRI-CGM3 (RCP 8.5)	21 466	2395	19 073	3658	19 043	3654
MIROC5 (RCP 4.5)	21 469	2395	19 053	3662	19 033	3661
MIROC5 (RCP 8.5)	21 467	2395	19 051	3658	18 989	3646
<b><i>Montérégie</i></b>						
CanESM2 (RCP 4.5)	22 197	3767	20 000	4528	19 665	4354
MPI-ESM-LR (RCP 4.5)	22 201	3773	19 725	4464	19 712	4461
MRI-CGM3 (RCP 4.5)	22 201	3776	19 738	4467	19 731	4465
MRI-CGM3 (RCP 8.5)	22 173	3785	19 736	4458	19 627	4452
MIROC5 (RCP 4.5)	21 784	3065	19 701	4466	19 676	4152
MIROC5 (RCP 8.5)	22 207	3769	19 700	4458	19 638	4444

Tableau 18. Productions moyennes ( $\pm$  écart-type) de protéines (kg/an) par troupeau par année obtenues pour la période de référence (1971-2000), pour le futur proche (2020-2049) et pour le futur lointain (2050-2070) selon divers scénarios climatiques.

	1971-2000		2020-2049		2050-2079	
	Protéines (kg/an/troupeau)	Écart- Type (kg)	Protéines (kg/an/troupeau)	Écart- Type (kg)	Protéines (kg/an/troupeau)	Écart- Type (kg)
<b><i>Bas-Saint-Laurent</i></b>						
CanESM2 (RCP 4.5)	17 692	3019	15 699	3014	15 675	3011
MPI-ESM-LR (RCP 4.5)	17 695	3017	15 707	3017	15 698	3015
MRI-CGM3 (RCP 4.5)	17 692	3020	15 711	3018	15 705	3018
MRI-CGM3 (RCP 8.5)	17 692	3019	15 712	3016	15 684	3012
MIROC5 (RCP 4.5)	17 696	3018	15 697	3018	15 680	3012
MIROC5 (RCP 8.5)	17 695	3018	15 696	3016	15 643	3005
<b><i>Montérégie</i></b>						
CanESM2 (RCP 4.5)	18 347	3120	16 287	3676	16 250	3540
MPI-ESM-LR (RCP 4.5)	18 352	3126	16 300	3626	16 291	3624
MRI-CGM3 (RCP 4.5)	18 352	3128	16 308	3628	16 302	3627
MRI-CGM3 (RCP 8.5)	18 328	3134	16 306	3622	16 213	3619
MIROC5 (RCP 4.5)	18 359	3122	16 280	3628	16 261	3381
MIROC5 (RCP 8.5)	18 361	3122	16 280	3618	16 229	3613

Au Canada, la quantité de lait vendu par jour par troupeau est régie par la quantité de quota laitier (kg de matières grasses par jour) détenue par le producteur laitier. Dans un contexte où la production des composants laitiers diminue tel qu'observé dans le présent projet, deux options s'offrent aux producteurs laitiers afin que ceux-ci respectent leur quota laitier. Dans la première, le nombre de vaches est maintenu constant alors que le quota laitier excédentaire est vendu. Pour sa part, la deuxième option implique le maintien du quota laitier détenu et l'achat de vaches afin de combler le déficit de production entraîné par les conditions climatiques.

Au Bas-Saint-Laurent, selon les différents scénarios climatiques, l'option 1 implique que les producteurs laitiers doivent vendre en moyenne  $6,6 \pm 0,03$  kg de matières grasses/jour dans le futur proche et  $6,7 \pm 0,3$  kg de matières grasses/jour dans le futur lointain. Comparativement à la période de référence, cela pourrait se traduire par des pertes monétaires moyennes évaluées à 6,86 \$/hl (31 777,38 \$/an ou 576,72 \$/vache) et 6,93 \$/hL (32 101,64 \$/an ou 582,61 \$/vache) dans le futur proche et dans le futur lointain respectivement. En Montérégie, les producteurs laitiers doivent vendre en moyenne selon les différents scénarios climatiques  $6,5 \pm 0,4$  kg de matières grasses/jour dans le futur proche et  $6,7 \pm 0,5$  kg de matières grasses/jour dans le futur lointain. Comparativement à la période de référence, cela pourrait se traduire par des pertes monétaires moyennes évaluées à 6,64 \$/hl (31 995,37 \$/an ou 559,36 \$/vache) et 6,82 \$/hL (32 854,88\$/an ou 574,39 \$/vache) dans le futur proche et dans le futur lointain respectivement.

L'option 2 au Bas-Saint-Laurent implique que les producteurs laitiers doivent acheter en moyenne  $6,3 \pm 0,3$  vaches dans le futur proche et  $6,3 \pm 0,5$  vaches dans le futur lointain afin de maintenir la production de matières grasses permise par le quota laitier détenu pendant la période de référence. Ultimement, comparativement à la période de référence, cela pourrait se traduire par des pertes monétaires globales de 5,05 \$/hl (26 024,26 \$/an ou 472,31 \$/vache) dans le futur proche et de 5,11 \$/hl (26 358,25 \$/an ou 478,37 \$/vache) dans le futur lointain. En Montérégie, l'option 2 implique l'achat d'en moyenne  $6,4 \pm 0,4$  vaches dans le futur proche et de  $6,6 \pm 0,3$  vaches dans le futur lointain. Comparativement à la période de référence, cela pourrait se traduire ultimement par des pertes monétaires globales de 4,84 \$/hl (25 909,94 \$/an ou 452,96 \$/vache) dans le futur proche et de 4,95 \$/hl (26 594,55 \$/an ou 464,94 \$/vache) dans le futur lointain. Ultimement, les résultats de ce projet ont montré que les impacts du stress thermique et les pertes économiques lui étant associées pourraient augmenter dans le futur si aucune stratégie de mitigation n'est mise en place sur les fermes laitières québécoises. Ce projet réitère l'importance d'adapter des mesures permettant de limiter les impacts du stress thermique sur les fermes laitières québécoises afin de maintenir la durabilité économique de la filière dans un contexte de changements climatiques.

**f. Évaluer l'impact potentiel de l'évolution future des performances des vaches laitières en lien avec les stress thermiques avec ou sans la mise en place de mesures d'atténuation sur les résultats technico-économiques des fermes laitières québécoises. (Objectif spécifique 5 adapté)**

Plusieurs stratégies peuvent être mises en place pour réduire les impacts du stress thermique dans les troupeaux laitiers. Ces stratégies peuvent être regroupées en trois classes selon leur mode d'action: environnementales, nutritionnelles et génétiques. L'efficacité de ces stratégies à minimiser les impacts

des stress thermiques et de limiter leur occurrence peut varier selon le climat (West, 2003). Ainsi, dans le cadre d'une revue de littérature menée par notre équipe de recherche (Fournel et al., 2017), nous avons évalué le potentiel des stratégies permettant de réduire les impacts du stress thermique utilisées sur les fermes laitières afin de déterminer les plus prometteuses en contexte climatique québécois. L'utilisation combinée de ventilateurs de recirculation d'air et d'un système d'aspersion ou de brumisation s'est avérée être la plus efficace pour refroidir les vaches en diminuant l'ITH de l'étable de 0,2 à 5,9 unités. Toutefois, ce genre de système fonctionne de manière optimale dans les climats secs puisqu'il élève l'humidité des étables (de 0,6 à 24,4 unités de pourcentage). Il est donc déconseillé dans les environnements ayant une humidité relative > 75 %, condition fréquemment observée dans plusieurs régions agricoles du Québec. Dans le contexte climatique québécois, nos recherches indiquent que l'utilisation de ventilateurs de recirculation à débit rapide et à petit volume serait une stratégie efficace pour minimiser les impacts du stress thermique alors qu'ils possèdent un potentiel de réduction de la température corporelle de 0,4 °C et un potentiel d'augmentation de la production laitière de 1,0 kg/j et de la matière sèche ingérée de 0,6 kg/j.

Plusieurs producteurs laitiers québécois se questionnent sur la pertinence de l'implantation de stratégies permettant de limiter le stress thermique sur leur ferme laitière considérant le nombre de journées chaudes au Québec. De plus, la stratégie permettant d'obtenir les plus grands gains économiques n'a toujours pas été déterminée en contexte climatique et de production québécois. Dans cette optique, une dernière étude préliminaire en lien avec le stress thermique a été effectuée afin de vérifier l'impact économique de l'achat de ventilateurs de recirculation d'air et d'un système de brumisation dans des troupeaux laitiers situés au Bas-Saint-Laurent et en Montérégie. Pour ce faire, les performances de production (lait, gras, protéines et lactose) des animaux de la banque de données décrites précédemment ont été simulées avec des données météorologiques observées pour les années 2010–2015. Les performances de production ont également été simulées avec les données climatiques projetées avec les six scénarios climatiques décrits dans les objectifs précédents : futur proche (FP : 2020–2049), futur lointain (FL : 2050–2079).

Ensuite, pour tous les horizons temporels, les performances annuelles des troupeaux laitiers ont été simulées sans considérer de technologie de refroidissement. Ensuite, elles ont été simulées en considérant l'impact de l'ajout de ventilateurs de recirculation et finalement, d'un système de brumisation qui sont deux technologies qui suscitent de l'intérêt chez les producteurs laitiers. Cette étape a été effectuée en adaptant les ITH quotidiens calculés pour 2010-2015, 2020-2049, 2050-2079 selon équations proposées par St-Pierre et al. (2003) :

$$\Delta ITH_{\text{ventilateurs}} = -11,06 + (0,25 \times T) + (0,02 \times HR)$$

$$\Delta ITH_{\text{brumisateurs}} = -11,7 + (0,16 \times T) + (0,18 \times HR)$$

où la T représente la température (°C) et HR représente l'humidité relative (%).

Ensuite, les impacts du stress thermique sur les performances de reproduction des animaux ont été évalués en identifiant le nombre d'animaux par troupeau exposés au stress thermique pendant la période s'échelonnant de 40 jours en lait à 136 jours en lait. Le nombre de jours ouverts additionnels (journées avant la saillie fécondante) attribués aux animaux exposés au stress thermique a été déterminé à 5,1 jours au Bas-Saint-Laurent et à 7,0 jours en Montérégie selon des comparatifs climatiques tirés de l'étude de St-Pierre et al. (2003). Ultiment, une étude économique considérant les changements observés au niveau des performances de production et de reproduction en fonction des technologies de refroidissement a été effectuée. Pour ce faire, le système de ventilateurs de

recirculation considéré dans cette étude consistait en six ventilateurs de 36 pouces d'une valeur de 1200 \$ chacun (Steve Adam, communication personnelle, 2019), d'une puissance de 0,475 KW et d'une durée de vie de 10 ans. Pour sa part, le système de brumisation consistait en six ventilateurs de recirculation d'air munie de buses injectant des gouttelettes d'eau à 200 psi se détaillant à 2000 \$ chacun (Steve Adam, communication personnelle, 2019), d'une puissance de 0,475 KW et d'une durée de vie de 8 ans. Le prix versé au producteur par kg de gras a été défini à 9,67 \$/kg alors que le prix par kg de protéines a été défini à 8,89 \$/kg (moyenne 2010-2015). Un coût supplémentaire de 5,51 \$/jours ouverts supplémentaires a été considéré (Devries et al., 2006). Les technologies de refroidissement étaient considérées en fonction pendant 24 heures lorsque la température était supérieure à 18 °C.

Ultimement, le scénario n'incluant pas de technologie de refroidissement, celui incluant les ventilateurs de refroidissements et celui incluant le système de brumisation ont été comparés à l'intérieur de chaque horizon temporel. Ainsi, aucune comparaison entre les différents horizons n'a été effectuée dans le cadre de ce projet puisque cela ne correspond pas à l'objectif du projet présenté.

Les résultats ont suggéré que les troupeaux laitiers du Bas-Saint-Laurent et de la Montérégie produiraient en moyenne plus de gras et de protéines par an lorsque les technologies de refroidissements sont considérées, et ce, pendant les trois périodes des temps à l'étude (Figure 8).

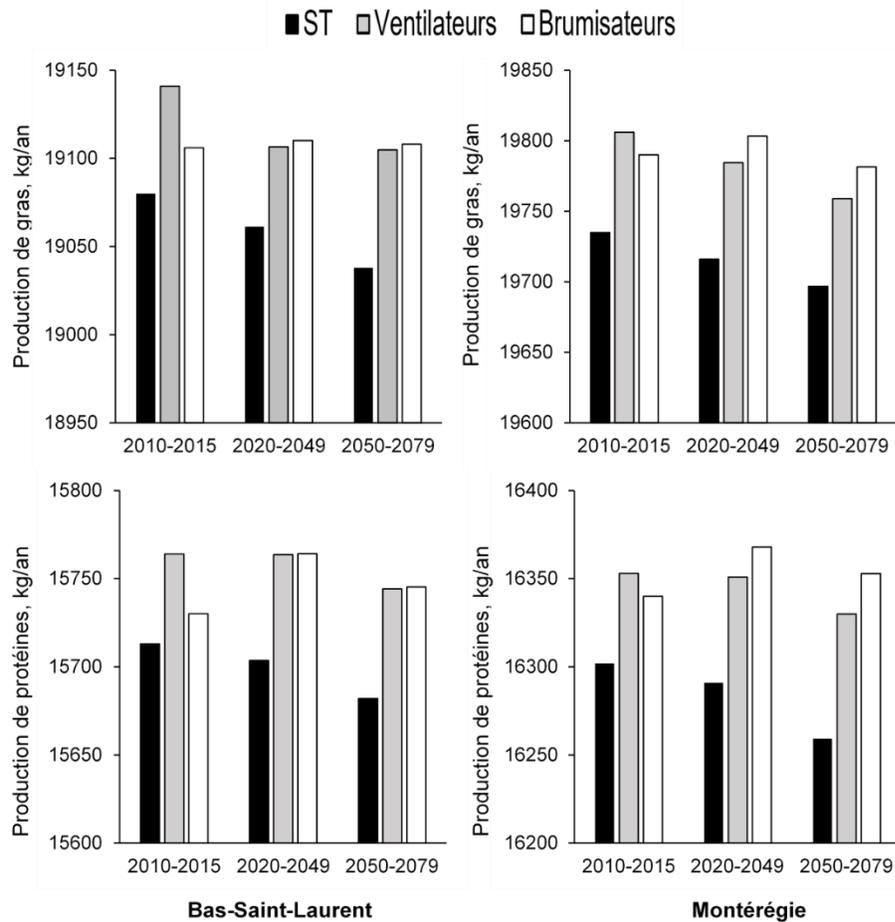


Figure 8. Productions moyennes annuelles de gras et de protéines par troupeau (kg/an) projetées pendant trois périodes temporelles (2010–2015; 2020–2049; 2050–2079) au Bas-Saint-Laurent et en Montérégie. La bande noire ■ représente un scénario standard ne considérant aucune stratégie d’adaptation, la bande grise ▒ représente un scénario considérant des ventilateurs de recirculation, bande blanche □ représente un scénario considérant des brumisateurs.

Dans un contexte climatique actuel (2010–2015), les ventilateurs de recirculation permettent d’obtenir les productions de gras et de protéines les plus élevées dans les deux régions. Dans les horizons futurs, les brumisateurs performant mieux, surtout en Montérégie, que les ventilateurs de recirculation en permettant des productions de gras et de protéines légèrement supérieures à ce qui est observé avec les ventilateurs de recirculation. Les brumisateurs sont reconnus pour entraîner une augmentation de l’humidité relative des étables lorsque l’humidité relative de celles-ci est élevée. Ainsi, la performance supérieure des brumisateurs dans les horizons futurs tel qu’observée dans le présent projet est probablement attribuable au fait que la température ambiante augmente à une plus grande échelle que ce qui est observé pour l’humidité relative alors que celle-ci est majoritairement maintenant constante dans le futur dans les scénarios climatiques allant même jusqu’à légèrement diminuer. Toutefois, ces résultats doivent être interprétés avec prudence puisqu’il subsiste un questionnement important quant

au niveau de confiance des projections futures d'humidité relative. Les performances de reproduction suivent les mêmes tendances que les performances de production alors que les ventilateurs de recirculation permettent une plus grande diminution du nombre de jours ouverts par troupeau que les brumisateurs dans un contexte climatique actuel alors que le contraire est observé dans les horizons temporels futurs.

L'étude économique effectuée a considéré les produits supplémentaires (gras, protéines), les charges en moins (frais de reproduction) ainsi que les charges supplémentaires (frais de mise en marché pour les composantes supplémentaires, coût électricité, coût entretien, amortissement, intérêts sur l'achat technologie et intérêts sur l'achat de quota) associées à chacune des technologies pour les trois périodes temporelles ciblées dans la présente étude. Au Bas-Saint-Laurent, pendant la période actuelle (2010–2015), l'achat de ventilateurs de recirculation a obtenu un déficit de 423,89 \$ alors qu'il a obtenu un déficit de 144,28 \$ en Montérégie. Pendant la même période, l'achat de brumisateurs a résulté en des déficits de 1 673,61 \$ au Bas-Saint-Laurent et de 1182,40 \$ en Montérégie. Ainsi, nos résultats suggèrent que l'achat de ventilateurs de recirculation est préférable à l'achat de brumisateurs, et ce, dans les deux régions en climat actuel.

Pendant le futur proche, en considérant la moyenne des résultats issue des six scénarios climatiques utilisés, il a été calculé que l'achat de ventilateurs de recirculation entraînerait en moyenne une augmentation des profits de 227,61 \$ au Bas-Saint-Laurent et de 353,30 \$ en Montérégie. En ce qui concerne l'achat de brumisateurs, celui-ci provoquerait en moyenne un déficit de 691,17 \$ au Bas-Saint-Laurent et une augmentation des profits de 10,00 \$ en Montérégie.

Finalement, l'achat de ventilateurs de recirculation dans le futur lointain serait associé à un bénéfice de 225,94 \$ alors que l'achat de brumisateurs à un déficit de 517,55 \$ au Bas-Saint-Laurent. En Montérégie, l'achat de ventilateurs de recirculation mènerait à une augmentation des profits de 351,08 \$ alors que celui de brumisateurs résulterait à un bénéfice de 245,67 \$. Ainsi, selon nos calculs, l'achat de ventilateurs de recirculation serait plus profitable pour les troupeaux des deux régions dans les périodes temporelles futures.

#### **4. Conclusion et recommandations**

Les différents objectifs de ce projet ont permis de développer des connaissances sur plusieurs secteurs des fermes laitières en lien avec les changements climatiques. Ainsi, il a d'abord été possible de constater que les producteurs laitiers québécois vivent déjà avec certains impacts des changements climatiques, surtout pour ceux au sud de la province. En effet, pour les plantes fourragères, l'augmentation du nombre de coupes par saison de croissance et la présence plus courante de mortalité hivernale (principalement de la luzerne) sont des réalités déjà vécues par les répondants de l'enquête réalisée dans ce projet. Toutefois, ces derniers ne prévoient pas nécessairement changer leurs stratégies de sélection des espèces fourragères puisqu'ils les considèrent adaptées aux conditions actuelles et futures. Les principaux critères de choix des espèces sont actuellement le rendement, la valeur nutritive et la survie à l'hiver. En 2016, les producteurs laitiers interrogés s'attendaient à ce que les changements climatiques aient plus d'impact aux champs qu'à l'étable. En effet, la majorité des

répondants de l'enquête considéraient leur système de ventilation actuel comme suffisant pour faire face aux changements climatiques. Ceci dit, les deux derniers étés ont été plus éprouvants pour les animaux et la problématique des stress thermiques semble plus présente à l'esprit des producteurs qu'elle l'était en 2016.

Par nos projets antérieurs, nous avons déjà ciblé les plantes fourragères comme un élément clé de l'adaptation aux changements climatiques sur les fermes laitières. Notre projet sur l'amélioration des graminées fourragères en contexte de changement climatique nous a permis de cibler des graminées fourragères pérennes avec le plus grand potentiel en association avec la luzerne sous le climat actuel. En effet, la fléole des prés, bien que moins adaptée aux épisodes de chaleur et de sécheresse, a tout de même montré des performances comparables à ses alternatives en climat actuel. La fétuque élevée, la fétuque des prés et le brome des prés ont également montré des performances intéressantes pour leur rendement et leur valeur nutritive sous le climat actuel. Dans le présent projet, nous avons bonifié les résultats en climat actuel en les jumelant avec des projections climatiques pour estimer les rendements et valeurs nutritives futurs en plus de modéliser les impacts des changements climatiques sur le bénéfice net et les bilans agroenvironnementaux de fermes laitières types de deux régions du Québec. Les régions choisies l'ont été pour représenter des systèmes de production typiques du Québec. Les résultats de ce projet pour les conditions futures permettent de confirmer les recommandations provenant du projet en condition climatique actuelle. L'ordre des graminées fourragères à privilégier est toutefois légèrement différent lors des projections futures. En effet, le rendement et la valeur nutritive des associations de luzerne avec de la fétuque élevée ou du brome des prés donnent un léger avantage économique sous certains scénarios climatiques en Montérégie par rapport aux associations avec la fléole des prés ou la fétuque des prés. Cet avantage est encore plus marqué pour le Bas-St-Laurent.

Dans l'étude de modélisation de l'impact des changements climatiques sur les fermes laitières considérées dans leur ensemble, l'effet du climat était majeur sur les résultats projetés de la ferme type du Bas-St-Laurent. En effet, la possibilité de produire de nouvelles cultures comme le maïs-grain et le soya et l'augmentation des rendements des plantes fourragères cultivées sur la ferme devraient permettre une augmentation majeure du bénéfice net sur ces fermes. Lors de la modélisation, les GES de la ferme augmentent avec l'intensité des scénarios climatiques, mais la portion allouée au lait diminue puisque globalement la ferme devient plus productive. La modélisation montre également l'importance de revoir régulièrement les grilles de fertilisation dans le futur pour s'assurer d'éviter l'appauvrissement des sols si la productivité globale de la ferme augmente. Les variations au niveau du bénéfice net, bien qu'existant, sont moins marquées pour la ferme type de la Montérégie. Cette ferme bénéficie déjà d'un climat favorable pour l'agriculture. En fait, cette ferme bénéficiera à court terme des changements climatiques, mais connaîtra plus d'effets négatifs à moyen et long termes, surtout pour les scénarios projetant un réchauffement plus intense.

Une ferme laitière intègre plusieurs composantes. La production des cultures aux champs et l'utilisation de ces dernières par le troupeau sont certainement des aspects majeurs à considérer lorsque l'impact des changements climatiques est évalué. Ceci dit, il est également essentiel d'ajouter l'impact potentiel associé au stress thermique ressenti par les vaches pour avoir une analyse plus complète de la situation. Ainsi, une analyse de cet élément a été réalisée dans le cadre de ce projet. Comme mentionné précédemment, le stress thermique des vaches était perçu comme une problématique peu présente par les producteurs laitiers québécois au début du projet. Il était donc essentiel d'établir qu'une

problématique existait avant d'essayer de trouver des mesures efficaces pour l'atténuer. Nous avons donc réalisé une première étude dans lequel nous avons installé des capteurs de température et d'humidité sur des fermes laitières québécoises. Les résultats obtenus dans le cadre cette expérience ont suggéré que les conditions environnementales internes des fermes à l'étude, bien que celles-ci étaient munies d'un système de ventilation suivant les recommandations du fabricant, étaient en mesure de provoquer un stress thermique chez la vache laitière et de potentiellement causer les impacts négatifs associés à cette condition. Une seconde étude sur les stress thermiques a permis d'établir l'impact actuel des changements climatiques sur les troupeaux québécois en utilisant la banque de données de Valacta. Il a été possible de voir qu'un impact non négligeable était présent sur les composantes du lait ainsi que sur le lait corrigé pour le gras et la protéine. Contrairement à d'autres études dans d'autres contextes, le lait non corrigé n'était pas significativement affecté par les changements climatiques. Toutefois, la production de gras et dans une moindre mesure celle de protéine du lait risquent d'être diminuées. Les équations développées dans ce projet en climat actuel ont ensuite été ajustées pour pouvoir être utilisées avec les projections climatiques futures. Cette évaluation a permis de montrer l'importance de l'augmentation des répercussions des stress thermiques dans le futur avec les changements climatiques. Finalement, des stratégies d'atténuation des stress thermiques ont été évaluées pour leurs intérêts technico-économiques sur les fermes laitières. Dans cette dernière étude portant sur les stress thermiques chez la vache, l'utilisation des ventilateurs de recirculation devient rapidement rentable, alors qu'il faut des scénarios de réchauffement plus intenses dans la région la plus chaude pour rentabiliser l'ajout de brumisateurs aux ventilateurs. Il est certain que l'analyse effectuée était réalisée pour une ferme type moyenne. Il est possible que la rentabilité soit plus rapide pour des fermes avec une grande productivité. Il serait intéressant de poursuivre l'analyse en incluant différents niveaux de production et en considérant en plus l'impact sur les animaux non productifs, comme les vaches tarées et les veaux. Le bien-être des animaux est aussi une préoccupation sociétale importante. Plus que les résultats économiques, l'ajout de certaines stratégies pour réduire les problématiques de stress thermiques pourrait être bénéfique de ce point de vue et justifiable dans certaines régions du Québec dans le contexte climatique attendu au cours des prochaines décennies. Ainsi, des mesures pour réduire la température et l'inconfort des vaches lors de canicules pourraient même être intégrées à des plans de bonnes pratiques pour le bien-être animal et dans des initiatives structurantes telles que le programme proAction.

Ce projet démontre que, malgré un impact négatif sur les performances laitières des vaches, les changements climatiques permettront de nouvelles opportunités aux champs pour la ferme du Bas-St-Laurent, représentant les fermes dans des climats plus frais du Québec. Par contre, pour les fermes plus au sud de la province, représentées par la ferme type de la Montérégie, il sera nécessaire de mettre en place des mesures d'adaptation pour éviter de trop grandes répercussions des changements d'un point de vue économique. En effet, cette ferme pourrait connaître des impacts négatifs autant aux champs qu'à l'étable. On s'attend à ce que l'impact des changements climatiques sur les différentes composantes de la ferme soit additif. Ainsi, les propriétaires des fermes des régions plus fraîches qui sauront mettre en place des mesures d'adaptation devraient pouvoir bénéficier de certaines opportunités associées aux changements climatiques. En contrepartie, les fermes des régions plus chaudes risquent d'être plus exposées aux effets négatifs. Il sera essentiel pour ces fermes de s'adapter progressivement aux nouvelles réalités associées aux changements climatiques pour limiter les effets néfastes leurs étant associés.

## 5. Références

- Armstrong, D.V. 1994. Heat stress interactions with shade and cooling. *J. Dairy Sci.* 77:2044–2050.
- 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>
- Baker, B.S. et G.A. Jung. 1968. Effect of environmental conditions on the growth of four perennial grasses. 1. Response to controlled temperature. *Agron. J.* 60:155-158.
- Baumgard, L.H. et R.P. Rhoads. 2013. Effects of heat stress on postabsorptive metabolism and energetics. *Annu. Rev. Anim. Biosci.* 1:311-337.
- 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. *Agron. J.* 94 :1120-1130.
- Bélanger, G., Y. Castonguay, A. Bertrand, C. Dhont, P. Rochette, L. Couture, R. Drapeau, D. Mongrain, F.P. Chalifour et R. Michaud. 2006. Winter damage to perennial forage crops in eastern Canada: Causes, mitigation, and prediction. *Can. J. Plant Sci.* 86:33-47.
- Bélanger, G., A. Bertrand, G. Jégo, É. Charbonneau, M.-N. Thivierge, V. Ouellet, S. Fournel et G. Tremblay. 2016. Défis et opportunités des changements climatiques pour les fermes laitières du Québec. Cahier de conférences du 40e Symposium sur les bovins laitiers, 27 octobre, Drummondville, QC.
- 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.
- Berman, A. 2005. Estimates of heat stress relief needs for Holstein dairy cows. *J. Anim. Sci.* 83:1377–1384.
- Bernabucci, U., S. Biffani, L. Buggiotti, A. Vitali, N. Lacetera et A. Nardone. 2014. The effects of heat stress in Italian Holstein dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 97:471-486.
- Collier, R.J., S.G. Doelger, H.H. Head, W.W. Thatcher et C.J. Wilcox. 1982a. Effects of heat stress during pregnancy on maternal hormone concentrations, calf birth weight, and postpartum milk yield of Holstein dairy cows. *J. Anim. Sci.* 54:309-319.
- Collier, R.J., D.K. Beede, W.W. Thatcher, L.A. Israel et C.J. Wilcox. 1982b. Influences of environment and its modification on dairy animal health and production. *J. Dairy Sci.* 65, 2213– 2227.
- De Vries, A. 2006. Determinants of the cost of days open in dairy cattle. Proceedings of the 11th Symposium of the International Society for Veterinary Epidemiology and Economics, Cairns, Australia
- Dunn, R.J.H., N.E. Mead, K.M. Willett et D.E. Parker. 2014. Analysis of heat stress in UK dairy cattle and impact on milk yields. *Environ. Res. Lett.* 9 : 1-11 doi:10.1088/1748-9326/9/6/064006.
- Fournel, S., V. Ouellet, and E. Charbonneau. 2017. Practices for alleviating heat stress of dairy cows in humid continental climates : A literature review. *Animals.* 7–37.
- Gangwar, P.C., C.C. Branton et D.L. Evans. 1965. Reproductive and physiological responses of Holstein heifers to controlled and natural climatic conditions. *J. Dairy Sci.* 48:222–227.
- Howell, J.L., W. Fuquay et A.E. Smith. 1994. Corpus luteum growth and function in lactating Holstein cows during spring and summer. *J. Dairy Sci.* 77: 735-739.
- Jégo, G., Rotz, C.A., Bélanger, G., Tremblay, G.F., Charbonneau, É., and Pellerin, D. 2015. Simulating forage crop production in a northern climate with the Integrated Farm System Model. *Can. J. Plant Sci.* 95(4): 745-757.
- Jing, Q., G. Bélanger, B. Qian et V. Baron. 2013. Timothy yield and nutritive value under climate change in Canada. *Agron. J.* 105:1683-1694.

- Jones, C.A. et J.R. Kiniry. 1986. CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development. Texas A&M University Press, College Station, TX, USA.
- Kadzere, C.T., M.R. Murphy, N. Silanikove et E. Maltz. 2002. Heat stress in lactating dairy cows: a review. *Livest. Prod. Sci.* 77:59–91.
- Kendall, P.E. et J.R. Webster. 2009. Season and physiological status affects the circadian body temperature rhythm of dairy cows. *Livest. Sci.* 125:155–60.
- Lambertz, C., C. Sanker, and M. Gauly. 2014. Climatic effects on milk production traits and somatic cell score in lactating Holstein-Friesian cows in different housing systems. *J. Dairy Sci.* 97:319–329.
- Moreno, J.M., G. Bélanger, H. Côté, D. Pellerin, V. Bélanger, G. Allard, R. Audet, D. Chaumont et E. Charbonneau. 2013. Potential impact of climate change on crop yield and nutritive value of dairy farms in Quebec. *J. Anim. Sci.* 91 (E-Suppl.2)/*J. Dairy Sci.* 96 (E-suppl.1):601.
- Nardone, A., N. Lacetera, U. Bernabucci et B. Ronchi. 1997. Composition of colostrum from dairy heifers exposed to high air temperatures during late pregnancy and the early postpartum period. *J. Dairy Sci.* 80:838–844.
- NRC. 2001. Nutrient Requirements of Dairy Cattle. 7th ed. Natl.Acad. Press, Washington, DC.
- Ouranos. 2015. Vers l'adaptation; Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec
- Qian, B., R. De Jong, S. Gameda, T. Huffman, D. Neilsen, R. Desjardins, H. Wang et B. McConkey. 2013. Impact of climate change scenarios on Canadian agroclimatic indices. *Can. J. Plant Sci.* 93: 243-259.
- Qian, B., S. Gameda, R. de Jong, P. Falloon et J. Gornall. 2010. Comparing scenarios of Canadian daily climate extremes derived using a weather generator. *Clim. Res.* 41: 131-149.
- Ravagnolo, O. et I. Misztal. 2000. Genetic Component of Heat Stress in Dairy Cattle, Parameter Estimation. *J. Dairy Sci.* 83:2126–2130.
- Ravagnolo, O., I. Misztal et G. Hoogenboom. 2000. Genetic component of heat stress in dairy cattle, development of heat index function. *J Dairy Sci.* 83:2120–2125.
- Ravagnolo, O., and I. Misztal. 2002. Effect of heat stress on nonreturn rate in Holstein cows: Genetic analysis. *J. Dairy Sci.* 85:3092–3100.
- Rhoads M.L., R.P. Rhoads, M.J. VanBaale, R.J. Collier, S.R. Sanders, W.J. Weber, B.A. Crooker, and L.H. Baumgard. 2009. Effects of heat stress and plane of nutrition on lactating Holstein cows: I. Production, metabolism and aspects of circulating somatotropin. *J. Dairy Sci.* 92:1986–97.
- Robinson, J.B., D.R. Ames et G.A. Milliken. 1986. Heat production of cattle acclimated to cold, thermoneutrality and heat when exposed to thermoneutrality and heat stress. *J. Anim. Sci.* 62:1434–1440.
- Rotz, C.A., Corson, M.S., Chianese, D.S., Montes, F., Hafner, S.D., Bonifacio, H.F., Coiner, C.U., 2015. The Integrated Farm System Model, Reference Manual Version 4.2. Agricultural Research Service, USDA. <https://www.ars.usda.gov/northeast-area/uppa/pswmru/docs/integrated-farm-system-model/#Reference>
- Schüller, L.K., O. Burfeind, W. Heuwieser. 2014. Impact of heat stress on conception rate of dairy cows in the moderate climate considering different temperature– humidity index thresholds, periods relative to breeding, and heat load indices. *Theriogenology.* 81:1050-1057.
- St-Pierre, N.R., B. Cobanov et G. Schnitkey. 2003. Economic losses from heat stress by US livestock industries. *J. Dairy Sci.* 86:(E. Suppl.): E52-E77.
- Thivierge, M.-N., G. Jégo, G. Bélanger, A. Bertrand, G.F. Tremblay, C.A. Rotz et B. Qian. 2016. Predicted yield and nutritive value of an alfalfa–timothy mixture under climate change and elevated atmospheric carbon dioxide. *Agron. J.* 108:505–603.

Thivierge, M.N., Jégo, G., Bélanger, G., Chantigny, M.H., Rotz, C.A., Charbonneau, É., Baron, V.S., and Qian, B. 2017. Projected impact of future climate conditions on the agronomic and environmental performance of Canadian dairy farms. *Agric. Sys.* 157: 241-257.

West, J.W. 2003. Effects of heat-stress on production in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 86:2131–2144.

Wheelock, J. B., R. P. Rhoads, M. J. VanBaale, S. R. Sanders, and L. H. Baumgard. 2010. Effects of heat stress on energetic metabolism in lactating Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 93:644–655.

Wilson, S.J., C.J. Kirby, A.T. Koenigsfeld, D.H. Keisler et M.C. Lucy. 1998a. Effects of controlled heat stress on ovarian function of dairy. 2. cattle Heifers. *J. Dairy Sci.* 81:2132–2138.

Wilson, S.J., R.S. Marion, J.N. Spain, D.E. Spiers, D.H. Keisler, M.C. Lucy. 1998b. Effects of controlled heat stress on ovarian function of dairy cattle. 1. Lactating cows *J. Dairy Sci.* 81:2124–2131.

## Annexes

Les méthodes de calculs présentées dans cette annexe sont tirées de l'atlas agroclimatique du Québec (<http://www.agrometeo.org/atlas/>).

### Date de début de la saison de croissance

**Définition :** Le début de la saison de croissance (*DSC*) suivant un hiver correspond au 5<sup>ième</sup> 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 :**

$$DSC = \min\{j | TMMP5_j > 5,5^\circ\text{C}\}$$

dans laquelle

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

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

### Date de fin de la saison de croissance

Pour le projet, la date de la fin de la saison de croissance est le 40<sup>ième</sup> jour précédant le premier gel

### 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 :**

$$LSC = FSC - DSC$$

### Cumul des degrés-jours durant la saison de croissance

**Définition :** Cumul, entre le début et la fin de la saison de croissance (*DSC*) et (*FSC*), de l'excédent de la température moyenne quotidienne par rapport à un seuil de température  $T_{base}$  de 5°C

**Unités :** Degrés jours

**Formule :**

$$DJ = \sum_{j=DSC}^{FSC} DJ_j$$

dans laquelle

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

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

#### **Date de début de cumul des unités thermiques maïs**

**Définition :** La date du début du cumul des UTM ( $DDC\_UTM$ ) correspond à la 3<sup>ème</sup> journée de trois jours consécutifs où la température moyenne est supérieure à 12,8°C,

**Unités :** Date

**Formule :**

$$DDC\_UTM = \min\{j | TMM5_j \geq 12,8^{\circ}\text{C}\}$$

dans laquelle

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

#### **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

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

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

## 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

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

$$Ymax_j = \begin{cases} 3,33 (Tmax_j - 10) - 0,084(Tmax_j - 10)^2 & \text{si } Tmax_j > 10^\circ\text{C} \\ 0 & \text{si } Tmax_j \leq 10^\circ\text{C} \end{cases}$$

$$Ymin_j = \begin{cases} 1,8 (Tmin_j - 4,44) & \text{si } Tmin_j > 4,44^\circ\text{C} \\ 0 & \text{si } Tmin_j \leq 4,44^\circ\text{C} \end{cases}$$