



Symposium sur les bovins laitiers

Le jeudi 27 octobre 2016
Centrexpo Cogéco, Drummondville

Défis et opportunités des changements climatiques pour les fermes laitières du Québec

Gilles Bélanger, D.Sc., chercheur scientifique,
agronomie et physiologie des cultures fourragères
Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche
et de développement de Québec

Collaborateurs

Annick Bertrand, Ph.D., chercheuse scientifique, physiologie des cultures fourragères¹
Guillaume Jégo, Ph.D., chercheur scientifique, modélisation des systèmes agricoles¹
Édith Charbonneau, Ph.D., professeure²
Marie-Noëlle Thivierge, Ph.D., chercheuse scientifique, agronomie et
physiologie des cultures fourragères¹
Véronique Ouellet, M.Sc., étudiante au doctorat²
Sébastien Fournel, Ph.D., Stagiaire postdoctoral
Gaëtan Tremblay, Ph.D., chercheur scientifique, valeur nutritive
des aliments du ruminant¹

¹ Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherche et de développement de Québec

² Université Laval, Département des sciences animales

Défis et opportunités des changements climatiques pour les fermes laitières du Québec

FAITS SAILLANTS

- Le réchauffement climatique dans les régions agricoles du Québec et les variations prévues des précipitations affecteront la production fourragère sur les fermes laitières par : 1) une augmentation du rendement annuel grâce à une récolte additionnelle, 2) une augmentation des risques de dommages hivernaux des espèces fourragères sensibles à l'hiver, et 3) une faible diminution de la valeur nutritive des fourrages. Ces effets varieront selon l'espèce fourragère et la région.
- L'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique favorisera davantage la luzerne que les graminées fourragères cultivées au Québec.
- Les projections d'augmentation de rendements pour plusieurs espèces typiquement cultivées sur les fermes laitières ainsi que le déplacement vers le nord de certaines cultures (p. ex. maïs et soja) laissent présager de nouvelles opportunités et de nouveaux défis pour les cultures fourragères sur les fermes laitières du Québec.
- Le réchauffement climatique affectera directement les troupeaux laitiers par l'augmentation de la fréquence de stress thermique des animaux et la nécessité de mettre en place des mesures d'atténuation.

INTRODUCTION

Les changements climatiques prévus auront des répercussions en agriculture pour toutes les régions du monde. La production laitière au Québec n'y échappera pas. Il est toutefois intéressant de s'attarder aux répercussions potentielles pour le Québec puisque des particularités régionales existent lorsque l'on traite de changements climatiques. Le climat plutôt nordique du Québec implique des modifications des cultures sur les fermes laitières très différentes de celles d'autres régions du monde. Des défis, mais également des opportunités pourraient résulter des changements climatiques sur les fermes laitières. Ainsi, cette présentation vise à faire le point sur l'impact potentiel des changements climatiques prévus sur le rendement, la valeur nutritive et la pérennité des cultures fourragères canadiennes avec une emphase particulière sur le Québec. Nous discuterons principalement de la luzerne et la fléole des prés, les deux principales espèces fourragères cultivées au Québec et sur lesquelles nos travaux de recherche ont porté. Les augmentations de température et de la concentration en CO₂ de l'atmosphère, de même que les variations des précipitations seront prises en compte. Nous présenterons également une analyse préliminaire de l'impact direct des changements climatiques sur les troupeaux laitiers.

CHANGEMENTS CLIMATIQUES PRÉVUS

Des conditions plus chaudes dans toutes les régions agricoles du Canada avec une légère augmentation annuelle des précipitations sont prédites pour la période 2040-2069. Dans une première étude, nous avons caractérisé les changements climatiques prévus pour dix sites situés à des latitudes comprises entre 43,03 et 58,38° N et représentant diverses régions agricoles du Canada où se fait la production fourragère (Jing et al., 2013b); deux de ces sites étaient situés au Québec. Quatre séries de données climatiques générées par deux modèles climatiques pour deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre (A1B, concentration moyenne en CO₂; A2, concentration élevée en CO₂) du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat; IPCC, 2007) ont été utilisées. Un scénario d'émission de gaz à effet de serre représente un estimé mondial de l'augmentation moyenne de la concentration en CO₂ en fonction de différentes prémisses socio-économiques. Ces scénarios sont alors combinés à des modèles climatiques complexes pour générer des séries de données climatiques. Des augmentations de

températures mensuelles de 4,0°C en hiver et de 3,1°C en été sont prédites entre les scénarios futurs (2040-2069) et la période de référence de 1961 à 1990. En moyenne pour les dix sites, les différences de précipitations mensuelles sont positives de novembre à juin (+8,0 mm), négatives en août et septembre (-5,4 mm), et autour de 0 en juillet et octobre. Les augmentations prévues des températures annuelles varient à travers le Canada de 2,4°C dans l'Est à 3,8°C dans le Nord de l'Alberta.

Une étude plus récente, réalisée pour le Québec, s'est concentrée sur la période future de 2050 à 2079, que nous avons comparée à la période de référence de 1971 à 2000. Pour la période future, nous avons étudié deux scénarios possibles d'émission de gaz à effet de serre parmi ceux décrits par le GIEC. Le premier scénario se produirait si on continuait sans réserve d'émettre des gaz à effet de serre dans le futur. Dans ce scénario extrême, la concentration en CO₂ dans l'air augmenterait de 85 % par rapport à la période de référence. Le second scénario se produirait si on réussissait à moyen terme à stabiliser nos émissions. Dans ce scénario modéré, la concentration en CO₂ dans l'air augmenterait de 50 % entre la période de référence et la période future. Les températures moyennes durant la saison de croissance augmenteraient de 3,5°C avec le scénario climatique modéré et de 5,1°C avec le scénario extrême (Thivierge et al., 2016) avec une accumulation supplémentaire de 620 à 1030 degrés-jour (sur une base de 5°C). Les précipitations durant la saison de croissance augmenteraient de 39 à 41 mm pour le Sud-Ouest et de 60 à 73 mm pour l'Est du Québec. La répartition de ces précipitations durant la saison serait aussi affectée.

IMPACT SUR LES CULTURES DES FERMES LAITIÈRES

Cultures fourragères pérennes

Il est évident que cette évolution du climat aura des répercussions sur les cultures fourragères des fermes laitières canadiennes. Notre groupe de travail a réalisé quelques études qui nous donnent un avant-goût de cet impact sur le rendement, la valeur nutritive et la persistance des plantes fourragères pérennes.

Rendement et valeur nutritive

FLÉOLE DES PRÉS. La concentration en CO₂ atmosphérique a dépassé les 400 ppm en 2016, et les cultures fourragères canadiennes seront probablement exposées à une concentration en CO₂ d'environ 200 ppm additionnelles d'ici la fin du siècle. Nos études en conditions contrôlées ont démontré que le rendement de la fléole des prés n'était pas ou peu stimulé par une concentration en CO₂ de 600 ppm dans l'air (Piva et al., 2013). Nos résultats d'études en chambres de croissance ont indiqué que les conditions futures combinant des concentrations de CO₂ et des températures plus élevées que les conditions actuelles (+200 ppm et +4 °C) n'affecteraient pas le rendement, la teneur en fibres et la digestibilité de la fléole des prés, mais en diminueraient la teneur en N (Piva, 2012). L'absence d'un effet positif sur le rendement de l'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique a aussi été observée pour plusieurs graminées fourragères cultivées au Canada (Bertrand et al., 2011).

Ces résultats expérimentaux ont été confirmés par les résultats du modèle CATIMO (*CANadian Timothy MOdel*) pour plusieurs régions du Canada. Ce dernier permet de simuler la croissance et la valeur nutritive de la fléole des prés sur plusieurs cycles de repousse et sur plusieurs années (Bonesmo et Bélanger, 2002a, 2002b; Bonesmo et al., 2005; Jing et al., 2012, 2013a). En 2040-2069 et pour les dix sites mentionnés plus haut, le modèle CATIMO prédit que la croissance printanière de la fléole des prés débutera en moyenne 21 jours plus tôt, que les premières et deuxièmes coupes seront prises respectivement 15 et 21 jours plus tôt, et que l'arrêt de la croissance à l'automne se fera 12 jours plus

tard par rapport à ce qui se fait sous les conditions actuelles (1961-1990) (Jing et al., 2013b). Puisque l'intervalle recommandé entre deux coupes est d'environ 700 degrés-jours de croissance (base 0°C) pour la fléole des prés, l'allongement de la saison de croissance de 581 à 1219 degrés-jours de croissance devrait donc permettre de récolter une coupe additionnelle.

Considérant une gestion à deux coupes par année pour la fléole des prés, soit la gestion actuellement utilisée, le modèle prédit suite au réchauffement climatique une augmentation de rendement de la fléole des prés à la première coupe (+0.36 t MS/ha) mais une diminution à la deuxième coupe (-0.43 t MS/ha) (Jing et al., 2013b). Le rendement annuel serait donc peu affecté (Figure 1). Ces variations de rendement à la première coupe sont attribuées à une période de croissance plus longue à certains sites (6 à 30 jours) ou à un développement foliaire plus rapide aux sites plus nordiques. La réduction de l'intervalle entre la première et la deuxième coupe due à un cumul de degré-jours plus rapide, et l'augmentation du stress hydrique expliquent la diminution de rendement à la deuxième coupe. La valeur nutritive serait toutefois réduite aux deux coupes étant donné une augmentation de la teneur en fibres insolubles dans un détergent neutre (NDF) et une diminution de la digestibilité de la fibre NDF. Ces résultats de simulation confirment les résultats de nos deux études réalisées en conditions contrôlées avec la fléole des prés et au cours desquelles on a observé peu d'effets sur le rendement mais une diminution de la valeur nutritive lorsque la température de croissance augmentait de 3 à 5°C (Bertrand et al., 2008; Piva et al., 2013).

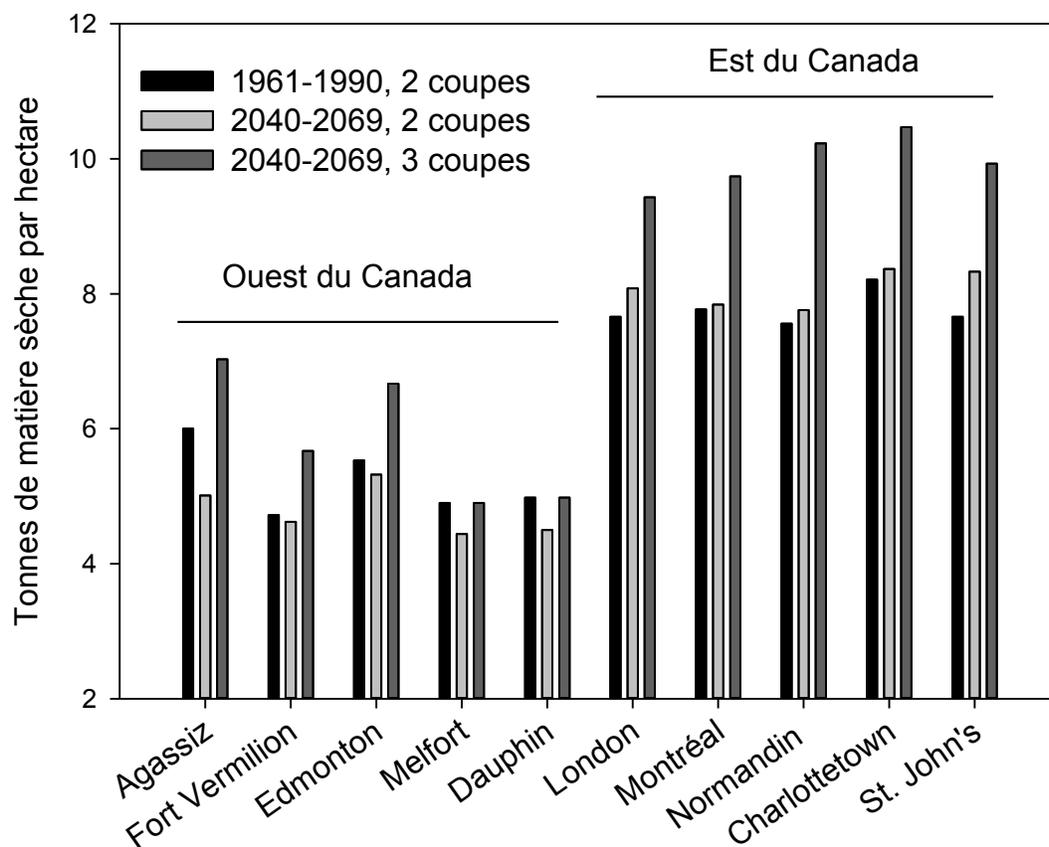


Figure 1. Rendements annuels de la fléole des prés prédits sous les conditions actuelles (1961-1990) avec deux coupes par année et sous les conditions futures (2040-2069) avec deux ou trois coupes par année pour 10 sites d'Ouest en Est au Canada (Jing et al., 2014).

La simulation d'une coupe additionnelle avec le réchauffement prévu, et donc d'un régime à trois coupes, engendrerait une augmentation du rendement annuel de la fléole des prés (+0,46 à 2,47 t MS/ha) comparativement à celui obtenu avec un régime à deux coupes (Figure 1) (Jing et al., 2014). Cette hausse de rendement serait toutefois plus grande dans l'Est du Canada (+1,88 t MS/ha) que dans les Prairies canadiennes (0,84 t MS/ha). L'impact sur la valeur nutritive serait faible.

LUZERNE. Pour la luzerne, l'augmentation de la concentration en CO₂ de l'air a causé une augmentation du rendement, à la fois dans nos études en conditions contrôlées (Bertrand et al., 2007b) et dans nos études au champ utilisant des chambres de croissance ouvertes sur le dessus « *Open Top Chambers* » (Messerli et al., 2015). L'augmentation de rendement au champ était toutefois accompagnée d'une augmentation de la teneur en fibres NDF et d'une légère diminution de la digestibilité. Chez la luzerne, l'augmentation de la concentration en CO₂ de l'air semble aussi diminuer la tolérance au gel en stimulant le métabolisme et, en retardant ainsi le processus d'acclimatation au froid (Bertrand et al., 2007a). Les résultats des simulations réalisées avec le modèle IFSM (*Integrated Farm System Model*) sont venus confirmer ces résultats expérimentaux en montrant que l'augmentation de la température et de la concentration en CO₂ de l'air entraîneraient une augmentation des rendements de la luzerne (Thivierge et al., 2016).

LUZERNE ET FLÉOLE DES PRÉS EN MÉLANGE. Nos expérimentations sur les répercussions potentielles des changements climatiques, incluant l'augmentation de la concentration en CO₂ atmosphérique, ont porté uniquement sur des espèces individuelles et se sont faites sur des périodes courtes en chambres de croissance. La majorité de la production fourragère se fait toutefois à partir d'associations fourragères. Nos recherches actuelles sont donc focalisées sur l'évolution des associations fourragères en prenant en compte surtout l'effet de l'augmentation de la concentration en CO₂ de l'air pendant deux à trois ans grâce à un système de chambres de croissance ouvertes sur le dessus « *Open Top Chambers* » (Messerli et al., 2015) installé au champ au Québec et en Alberta.

Parallèlement, nous avons utilisé le modèle IFSM pour évaluer l'impact des changements climatiques sur le rendement et la valeur nutritive du mélange luzerne- fléole des prés pour des fermes laitières moyennes de deux régions contrastées au Québec, soit le Sud-Ouest et l'Est du Québec. Nous avons considéré que trois coupes par année étaient faites sur la ferme du Sud-Ouest du Québec et que deux coupes étaient faites sur la ferme de l'Est du Québec durant la période de référence. Nous avons d'abord testé ce qu'il arriverait si on gardait la même gestion de coupes, sans changer leurs dates ni leur nombre. La figure 2 illustre le rendement annuel du mélange luzerne-fléole des prés, soit la somme de celui obtenu à chacune des coupes, selon les simulations effectuées avec le modèle IFSM. On peut voir que pour la ferme du Sud-Ouest du Québec, et par rapport à la période de référence, il y aurait une augmentation du rendement annuel avec le scénario futur modéré, mais une diminution avec le scénario futur extrême. Pour la ferme de l'Est de Québec, le rendement annuel augmenterait dans les deux scénarios futurs par rapport aux conditions actuelles.

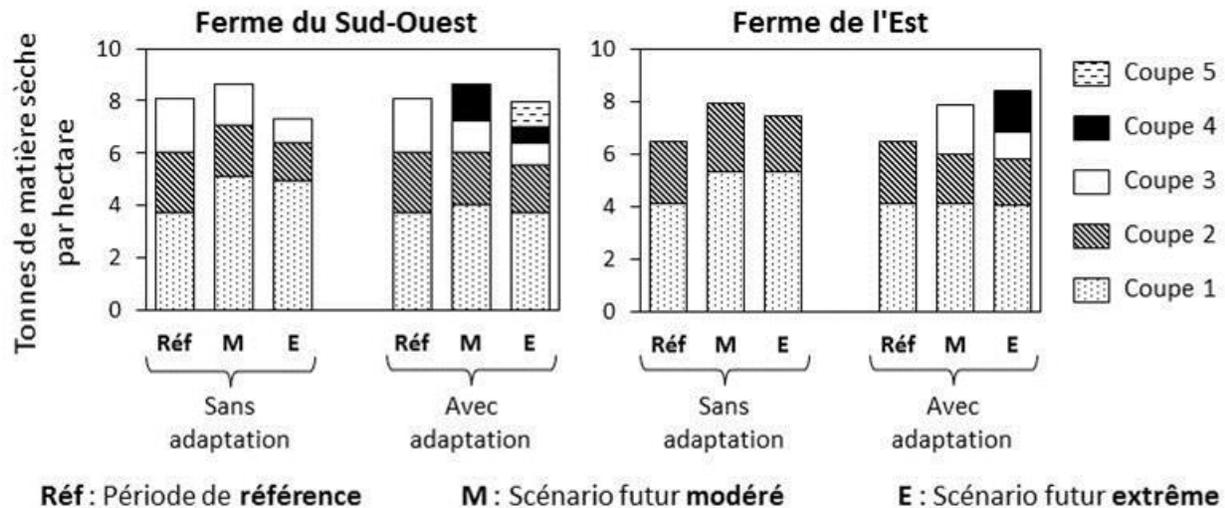


Figure 2. Rendements annuels et à chacune des coupes d'un mélange luzerne-fléole des prés pour des fermes-types du Sud-Ouest du Québec et de l'Est du Québec prédits sous les conditions actuelles (1971-2000) et sous les conditions futures (2050-2079) suite à deux scénarios de changements climatiques (scénario modéré avec une augmentation de la concentration en CO₂ dans l'air de 50 % par rapport à la période de référence et scénario extrême avec une augmentation de 85 %) avec ou sans adaptation de gestion de coupes. Adapté de Thivierge et al. (2016).

Pour les deux fermes et sans adaptation de gestion de coupes, le rendement de la pousse printanière (coupe 1) augmenterait alors que ceux des repousses estivales (coupes 2 et 3) diminueraient, et ce, surtout avec le scénario extrême. Cela s'explique par le fait que, durant l'été, les températures projetées dépasseraient la température optimale de croissance de la luzerne (20°C), et surtout celle de la fléole des prés (13,5°C). Ce stress de température serait plus accentué dans le Sud-Ouest que dans l'Est du Québec. De plus, les augmentations de précipitations dans le futur seraient compensées par une plus grande transpiration des cultures et une plus grande évaporation de l'eau du sol. Ainsi, le stress hydrique durant l'été augmenterait en durée et en intensité chez les cultures fourragères des deux fermes.

Finalement, la valeur nutritive du mélange luzerne-fléole des prés serait légèrement plus faible en raison d'une teneur en fibres plus élevée. En effet, dû à l'accumulation supplémentaire de degrés-jours entre les coupes, la luzerne et la fléole des prés seraient plus avancées en maturité lors des fauches, d'où l'augmentation des teneurs en fibres.

L'accumulation supplémentaire de degrés-jours dans le futur permettrait cependant de devancer les dates de coupes du mélange fourrager et de prendre des coupes additionnelles durant la saison de croissance. Nous avons donc testé cette adaptation en simulant quatre coupes de fourrage (luzerne-fléole des prés) dans le scénario modéré et cinq coupes dans le scénario extrême pour la ferme du Sud-Ouest, ainsi que trois coupes dans le scénario modéré et quatre coupes dans le scénario extrême pour la ferme de l'Est du Québec. Avec cette adaptation, le rendement annuel de la ferme du Sud-Ouest pour le scénario extrême demeurerait équivalent au rendement de la période de référence, au lieu de diminuer (Figure 2, Tableau 1). Pour la ferme de l'Est du Québec avec adaptation, les rendements futurs augmenteraient encore plus que ceux obtenus sans adaptation.

Tableau 1. Valeurs saisonnières de rendement, proportion de luzerne dans le mélange, et teneurs en fibres insolubles dans un détergent neutre (NDF), unités nutritives totales (UNT) et protéines brutes (PB) pour un mélange luzerne-fléole des prés cultivé sur des fermes-types du Sud-Ouest du Québec et de l'Est du Québec prédites sous les conditions actuelles (1971-2000) et futures (2050-2079) suite à deux scénarios de changements climatiques (scénario modéré avec une augmentation de la concentration en CO₂ dans l'air de 50 % par rapport à la période de référence et scénario extrême avec une augmentation de 85 %) avec adaptation de gestion de coupes. Adapté de Thivierge et al. (2016).

Ferme type	Variable mesurée	1971-2000	2050-2079	
			Scénario modéré	Scénario extrême
Sud-Ouest du Québec	Rendement (t MS/ha)	8,2	8,7	8,6
	Luzerne (%)	44	47	47
	NDF (g/kg MS)	429	442	428
	UNT (g/kg MS)	776	757	766
	PB (g/kg MS)	213	210	214
Est du Québec	Rendement (t MS/ha)	6,5	8,1	8,7
	Luzerne (%)	29	36	37
	NDF (g/kg MS)	473	451	437
	UNT (g/kg MS)	758	757	764
	PB (g/kg MS)	193	205	213

Bien que le rendement des coupes estivales soit tout de même affecté par le stress lié à la température et par le stress hydrique, les coupes additionnelles fourniraient un rendement supplémentaire qui compenserait ces pertes de sorte que le rendement annuel se trouverait augmenté surtout sur la ferme-type de l'Est du Québec. Finalement, grâce à l'adaptation de la gestion de coupe, la valeur nutritive du mélange luzerne-fléole des prés ne serait presque pas affectée dans le futur (Tableau 1).

Bien que les graminées perdent généralement de la valeur nutritive lorsqu'elles croissent sous des températures élevées, cette perte serait compensée par une proportion plus importante de luzerne dans le mélange fourrager sous un climat futur (Tableau 1). En effet, les légumineuses bénéficieraient davantage des changements climatiques que les graminées, notamment à cause de leur réponse plus marquée à l'augmentation du CO₂ dans l'air. Toutefois, un couvert de neige possiblement moins abondant et plus variable dans le climat futur pourrait contrebalancer les effets positifs de la température et du CO₂ en augmentant les risques de dommages hivernaux chez la luzerne.

Persistence

Certaines espèces fourragères comme la luzerne et le dactyle pelotonné sont particulièrement sensibles aux conditions hivernales du Québec (Bélanger et al., 2006). Une étude réalisée à l'aide d'indices agro-climatiques a démontré que les risques de dommages hivernaux seraient accrus chez la luzerne suite au réchauffement climatique (Bélanger et al., 2002). Lorsque les jours raccourcissent et que les températures baissent, les plantes pérennes subissent des changements importants qui leur permettent de résister au froid pendant l'hiver. Un automne plus doux, favorisant la croissance des plantes, retarde ce processus d'endurcissement au froid et rend les plantes plus sensibles aux gelées hâtives. Nos études démontrent que les automnes plus chauds ne favoriseront pas un endurcissement optimal des plantes fourragères au Québec.

De plus, même lorsque les plantes ont développé une résistance maximale au froid, elles peuvent être exposées à des températures plus basses que leurs limites de tolérance. Par exemple, la luzerne peut

tolérer des températures pouvant atteindre -15°C alors que la température de l'air peut descendre jusqu'à -44°C au Québec. La survie à l'hiver des plantes fourragères pérennes dépend donc de la couverture de neige isolante qui assure la protection des racines et du collet. Malheureusement, des hivers plus doux impliquent plus de précipitations sous forme de pluie plutôt que de neige et plus de périodes de dégel, deux conditions entraînant une réduction de la couverture de neige. Le nombre de jours d'exposition à des températures très froides ($< -15^{\circ}\text{C}$) sans une couverture de neige adéquate d'au moins 10 cm devrait augmenter avec les changements climatiques, augmentant ainsi le risque de dommages hivernaux causés par le gel.

Les pluies hivernales peuvent aussi causer la formation de couches de glace en surface, lesquelles entraînent l'asphyxie de la plante et des dommages physiques au système racinaire. La glace peut aussi favoriser une plus grande pénétration du gel dans le sol. Les risques de dommages associés à la présence de glace devraient donc augmenter avec les changements climatiques. D'autre part, des températures hivernales au-dessus de 0°C entraînent une perte graduelle de l'endurcissement au froid ce qui rend les plantes plus susceptibles aux températures froides subséquentes.

On s'attend donc à ce que l'effet combiné de la diminution de l'endurcissement au froid, de la diminution de la couverture de neige, de l'augmentation des pluies hivernales et de l'augmentation des cycles gel-dégel cause plus de dommages hivernaux aux plantes pérennes sous le climat futur. Ce risque accru de dommages hivernaux suite aux changements climatiques pourrait influencer le choix des espèces fourragères cultivées en favorisant des espèces plus tolérantes au détriment des espèces sensibles à l'hiver.

Cultures annuelles

En plus des plantes fourragères pérennes, plusieurs cultures annuelles sont présentes sur les fermes laitières. Les cultures mieux adaptées aux températures chaudes (p. ex. maïs et soya) connaîtront des augmentations de rendements, alors que les cultures plus adaptées aux températures fraîches (p. ex. orge, blé et canola) maintiendront des rendements similaires sous les conditions climatiques futures du Québec (Tableau 2). Le maïs profitera très peu de l'augmentation en CO_2 de l'air comparativement aux espèces telles que le soya et les céréales à paille. Par contre, l'augmentation en unités thermiques maïs (UTM) devrait permettre un accroissement important des rendements du maïs et du soya. Dans certaines régions agricoles du Québec (p. ex. Saguenay-Lac-St-Jean, Abitibi-Témiscamingue, Bas-St-Laurent/Gaspésie) qui ont présentement une faible accumulation d'UTM (< 2300), les conditions climatiques prédites au cours de la période 2041-2070 devraient y permettre d'envisager la culture du maïs grain et du soya (Tableau 2).

Tableau 2. Rendements (tonnes de matière sèche par hectare) des principales cultures annuelles présentes dans les rotations de fermes laitières de deux régions du Québec sous des conditions actuelles et prédits¹ sous les conditions futures (2041-2070) selon deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre³ (1971-2000).

Culture	Centre-du-Québec			Bas-St-Laurent		
	Actuel	Scénario inférieur	Scénario supérieur	Actuel	Scénario inférieur	Scénario supérieur
Maïs grain ²	6,1	9,9	10,4	-	6,0	6,1
Soya ²	1,9	2,5	2,5	-	2,1	2,1
Orge	2,1	2,1	2,1	2,0	2,0	2,0
Blé	2,1	2,1	2,1	1,9	1,9	1,9
Canola	-	-	-	1,7	1,7	1,7
Ensilage de maïs ¹	13,8	15,8	16,3	11,1	13,6	14,0

¹ Estimation faite à partir des projections des indices agroclimatiques, des recherches bibliographiques et d'un Focus group (Charbonneau et al., 2014).

² Les rendements futurs pour le Bas-St-Laurent sont prédits à partir de ceux couramment obtenus dans le Centre-du-Québec.

³ Le scénario inférieur correspond au scénario d'émission de gaz à effet de serre SRES B1 tandis que le scénario supérieur correspond au scénario d'émission de gaz à effet de serre SRES A1B.

IMPACT SUR LES ANIMAUX

En plus d'affecter les cultures utilisées sur les fermes laitières du Québec, les changements climatiques auront des effets directs sur les animaux. En effet, les hausses prévues des températures combinées à une humidité relative élevée pourraient affecter la productivité, la reproduction et la santé des vaches laitières due à une augmentation de l'occurrence de stress thermique (West, 2003). Le stress thermique est une situation pendant laquelle les conditions environnementales ne permettent pas à l'animal de dissiper une quantité adéquate de chaleur afin de maintenir son équilibre thermique (Bernabucci et al., 2014). La chaleur produite par la vache s'additionne alors à celle provenant de l'environnement et l'animal entre en stress thermique.

Le stress thermique chez la vache laitière peut être évalué par un indice climatique, soit l'indice de température et d'humidité ou le « *temperature humidity index* » (THI). Cet indice combine l'effet de la température ambiante et de l'humidité relative sur l'animal. Plusieurs formules permettent de calculer le THI et la formule suivante développée par Kendall et al. (2009) a été utilisée avec succès dans le contexte climatique du Québec :

$$THI = [(1,8 \times T) + 32] - [(0,55 - (0,0055 \times RH)) \times ((1,8 \times T) - 26)]$$

dans laquelle T représente la température ambiante en °C et RH l'humidité relative en %.

Le seuil critique du THI au-dessus duquel un stress thermique survient chez la vache laitière a fait l'objet de nombreuses études (Ravagnolo et Mistral, 2000; West, 2003; Bernabucci et al., 2014). Un seuil critique de 68 semble faire consensus (Zimbelman et al., 2009). Ce seuil peut être atteint avec une gamme de température et d'humidité relative (p. ex. température de 22 °C avec une humidité relative de 55 % ou température de 25°C avec une humidité relative de 15 %).

Nous avons caractérisé le nombre de jours avec un THI supérieur à 68 pour un futur proche (2020-2049) et un futur lointain (2050-2079) aux villes de Mont-Joli et de Saint-Hubert. Pendant la période de

référence (1971-2000), le nombre de jours avec un THI supérieur à 68 est de 17 à Mont-Joli et de 67 à Saint-Hubert (Tableau 3). Pour un scénario d'émission modéré, ce nombre de jours avec un THI supérieur à 68 augmenterait de 18 jours à Mont-Joli et de 39 jours à Saint-Hubert pour un futur proche, et de 35 et 63 jours pour un futur lointain. Pour un scénario d'émission extrême, ces augmentations du nombre de jours avec un THI supérieur à 68 seraient de 23 jours à Mont-Joli et de 43 jours à Saint-Hubert pour un futur proche et de 55 et 88 jours pour un futur lointain. La fréquence de stress thermique dans les troupeaux laitiers devrait donc nettement augmenter sous les conditions climatiques futures.

Tableau 3. Nombre de jours moyen avec un indice de température et d'humidité (« *temperature humidity index* », THI) supérieur à 68 pour la période de référence (1971-2000) et prédits¹ pour les futurs proche (2020-2049) et lointain (2050-2079) selon deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre¹ aux villes de Mont-Joli et Saint-Hubert.

	1971-2000	2020-2049		2050-2079	
	Scénario actuel	Scénario modéré	Scénario extrême	Scénario modéré	Scénario extrême
Mont-Joli	17	35	40	52	72
Saint-Hubert	67	106	110	130	155

¹Le scénario modéré correspond à un scénario d'émission de gaz à effet de serre avec une augmentation de la concentration en CO₂ dans l'air de 50 % (RCP 4.5; stabilisation des émissions à moyen terme) tandis que le scénario extrême correspond à un scénario d'émission de gaz à effet de serre avec une augmentation de 85 % (RCP 8.5; augmentation sans réserve des émissions).

Pertes économiques associées au stress thermique sur les vaches laitières

Les stress thermiques étaient associés à des pertes économiques évaluées à plus de 1,5 milliards \$ US par année (167 \$/vache/année) aux États-Unis en 2003 (St-Pierre et al., 2003). Ces pertes étaient par contre estimées à 900 millions \$ US par année (100 \$/vache/année) lorsque des stratégies d'atténuation étaient mises en place. Dans cette même étude, lorsqu'on restreint l'analyse à dix états des États-Unis ayant des températures similaires à celles du Québec, on obtient une perte moyenne de 50 \$/vache/année lorsque des mesures d'atténuation optimales sont utilisées comparativement à 80 \$/vache/année si aucune mesure n'est mise en place. Ces pertes économiques devraient augmenter avec l'augmentation prévue de la fréquence de stress thermique due au réchauffement climatique. Les pertes économiques associées au stress thermique sont principalement liées à son effet sur la productivité, la reproduction et la santé des vaches laitières.

Conséquences du stress thermique sur la productivité

Le stress thermique peut provoquer des pertes de lait allant de 0,2 à 2,2 kg/vache/jour (Zimbelman et al., 2009; Moallem et al., 2010; Bernabucci et al. 2014). Ces diminutions sont observées à des THI variant de 68 à 73 selon le niveau de production des vaches. L'effet négatif du stress thermique sur la production laitière a longtemps été exclusivement associé à la diminution de la prise alimentaire observée en condition de stress thermique (West, 2003). Toutefois, des études récentes ont démontré que la diminution de la prise alimentaire due au stress thermique explique seulement 35 à 50 % de la diminution de la production laitière observée (Rhoads et al., 2009; Wheelock et al., 2010).

Le stress thermique affecte le métabolisme des lipides, des protéines et des glucides chez l'animal. En effet, il entraîne une augmentation de l'insuline plasmatique qui empêche la vache de mobiliser les tissus adipeux et ainsi d'utiliser les acides gras non-estérifiés comme source d'énergie (Baumgard et Rhoads, 2013). Ceci fait en sorte que moins de glucose est acheminé vers la glande mammaire en conditions de stress thermique. Ainsi, moins de lactose peut être synthétisé (Wheelock et al., 2010). Chez la vache, le

lactose est le principal osmorégulateur et aussi le déterminant principal de la production laitière (Baumgard, 2007). Une diminution de la synthèse de lactose peut donc entraîner une diminution de la production laitière.

Conséquences du stress thermique sur les composantes du lait

Des diminutions de production de 0,013 à 0,07 kg de protéines/vache/jour ont été mesurées chez des vaches en stress thermique (Bernabucci et al., 2014; Bernabucci et al., 2015). Ceci suggère qu'un stress thermique affecte directement le métabolisme des protéines (Rhoads et al., 2009; Shwartz et al., 2009). Par contre, cet effet du stress thermique sur le métabolisme des protéines n'est pas encore bien connu. Les effets du stress thermique sur le gras du lait sont moins connus mais des diminutions allant de 0,051 à 0,095 kg/vache/jour ont été rapportées (Hammami et al., 2013; Bernabucci et al., 2014).

Conséquences du stress thermique sur la reproduction

Lorsque les vaches sont soumises à un stress thermique, leurs performances reproductives diminuent (Jordan, 2003). Il a été démontré que le stress thermique provoque un déséquilibre hormonal incluant une diminution de la concentration sérique d'œstradiol (Wilson et al., 1998), de la concentration plasmatique d'hormone lutéinisante (LH) et de la sécrétion de progestérone (Wolfenson et al., 2000). Ce déséquilibre hormonal affecte les performances reproductives 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., 1982), le statut endocrinien (Howell et al., 1994), de même que le développement et la croissance des follicules (Wilson et al., 1998). Le taux de conception des vaches laitières est également affecté par les changements induits par le stress thermique alors que des diminutions de vingt à trente unités de pourcentage ont été mesurées à des THI supérieurs ou égaux à 72 (Morton et al., 2007; Schüller et al., 2014).

Conséquences du stress thermique sur la santé

Le stress thermique affecte la santé de plusieurs façons et peut même entraîner la mort (West, 2003). L'effet le plus souvent rapporté est l'augmentation de l'incidence des acidoses ruminales. En conditions de stress thermique, les vaches dissipent la chaleur en accélérant leur taux de respiration, ce qui augmente la quantité de CO₂ expirée par l'animal (Kadzere et al., 2002). Afin d'agir à titre de système tampon efficace pour maintenir le pH sanguin, le corps de l'animal doit maintenir un ratio de 20:1 entre le bicarbonate (HCO₃⁻) et le CO₂ sanguins. L'hyperventilation induisant une diminution du CO₂ sanguin, les reins sécrètent alors du HCO₃⁻ pour maintenir ce ratio. Ceci réduit le HCO₃⁻ pouvant être utilisé (via la salive) pour tamponner et maintenir un pH ruminal optimal.

De plus, les vaches haletant bavent. La salive excrétée diminue alors la salive qui serait normalement envoyée dans le rumen. La diminution de la consommation de matière sèche observée en période de stress thermique entraîne également une diminution du temps de rumination (Baumgard et Rhoads, 2013). Les vaches génèrent ainsi moins de salive. La réduction de la quantité de salive produite, du HCO₃⁻ salivaire ainsi que la diminution de la quantité de salive entrant dans le rumen rendent les vaches en stress thermique plus susceptibles aux acidoses cliniques et subcliniques.

Mesures potentielles d'atténuation des stress thermiques

Trois types de stratégies d'atténuation de l'impact du stress thermique chez la vache laitière ont été identifiés (Beede et Collier, 1986) : modifications physiques de l'environnement, sélection génétique de traits de tolérance au stress thermique (pas discuté dans le présent document) et stratégies nutritionnelles. Le premier type de stratégies d'atténuation est celui qui est le plus communément pratiqué dans les fermes du Québec.

LES MODIFICATIONS PHYSIQUES DE L'ENVIRONNEMENT. Les méthodes typiques de modification de l'environnement se classent en deux groupes selon l'effet escompté : 1) prévenir ou limiter le degré de stress thermique auquel la vache est exposée et 2) accroître l'échange de chaleur entre la vache et son environnement (Renaudeau et al., 2012). Dans le premier cas, on vise à minimiser l'impact de la radiation solaire grâce à l'installation de mesures d'ombrage pour les animaux au pâturage ou d'isolant dans le toit de l'étable. Un abri couvert pour les vaches ayant accès à l'extérieur permet de réduire la charge thermique reçue de 30 à 50 % (Bond et Kelly, 1955). L'isolation du toit de l'étable restreint le transfert de chaleur vers l'intérieur du bâtiment, ce qui entraîne une baisse de la température de 1 ou 2°C en été (Fuquay et al., 1979).

Les systèmes de refroidissement par évaporation, tels les brumisateurs/pulvérisateurs (buses sous pression dispersant dans l'air de fines gouttelettes d'eau) et les tapis humides (fibres tissées installées devant les entrées d'air et sur lesquelles circulent de l'eau) fonctionnent en utilisant l'énergie comprise dans l'air pour évaporer l'eau (Shearer et al., 1999). En fait, l'évaporation d'eau dans une masse d'air chaud provoque une diminution de la température de 2 à 6°C, mais aussi une augmentation de l'humidité relative de 10 à 25 % (Lin et al., 1998; Smith et al., 2006).

Accroître les échanges thermiques implique généralement de favoriser les mécanismes de perte de chaleur de l'animal (conduction, convection et évaporation). Les vaches peuvent évacuer de la chaleur lorsqu'elles sont en contact direct avec une surface froide. Ainsi, l'utilisation d'une litière de sable ou de fumier recyclé serait préférable à de la paille ou aux copeaux de bois (Radoń et al., 2014). L'emploi de matelas d'eau générerait aussi des bénéfices importants pour le confort des animaux (Perano et al., 2015). Aussi, augmenter la vitesse de l'air au niveau des vaches peut leur procurer un effet refroidissant en enlevant la couche d'air saturée à la surface de leur peau qui limite la perte de chaleur (Renaudeau et al., 2012). En effet, l'ajout de ventilateurs de recirculation à cadre ou de plafond ainsi que l'utilisation de la ventilation longitudinale dans les étables peut réduire la température rectale des vaches de 1°C (Frazzi et al., 2000; Chaiyabutr et al., 2008).

Le fait de mouiller complètement les animaux à l'aide de systèmes d'aspersion pour que l'eau puise l'énergie directement du corps des vaches pour s'évaporer, comme les autres systèmes de refroidissement par évaporation, diminue la température et augmente l'humidité relative (Lin et al., 1998). Au final, différents équipements et infrastructures permettent d'améliorer le statut physiologique des vaches par la réduction de leur température corporelle (-0,5°C) et de leur respiration (-15 souffles/min) et d'optimiser les performances du troupeau par la maximisation de l'ingestion de matière sèche (+1,3 kg/vache/jour) et la production de lait (+1,7 kg/vache/jour).

LES STRATÉGIES NUTRITIONNELLES. Plusieurs stratégies nutritionnelles permettent d'atténuer les effets du stress thermique. L'augmentation de la densité énergétique de la ration soit par l'ajout de concentrés ou de gras est à prioriser pour compenser la diminution de la quantité de matière sèche ingérée (West, 2003 ; Moallem et al., 2010) et l'augmentation des besoins d'entretien des animaux en période de stress thermique (Wheelock et al., 2010). Ces plus grands besoins sont entraînés par l'augmentation des dépenses énergétiques liées à la transpiration et au halètement (Fuquay, 1981). De plus, la production de protéines de choc thermique qui sont des protéines produites en période de stress thermique et qui ont pour rôle d'assurer la bonne structure des protéines, exige également une quantité considérable d'énergie (Tomanek, 2010). Aussi, les concentrations sanguines d'adrénaline augmentent pendant un stress thermique, ce qui stimule les pompes sodium-potassium qui requièrent à leur tour beaucoup

d'énergie (Gaffin, 1996). Ainsi, plusieurs auteurs s'accordent sur la nécessité d'augmenter les besoins en énergie des vaches en stress thermique (Fox, 1999; Baumgard et al., 2014).

De plus, des changements au niveau des minéraux sont à considérer. En effet, l'augmentation du taux de transpiration survenant en période de stress thermique augmente les besoins en potassium de 12 % puisque la sueur des vaches est riche en potassium et pauvre en sodium (Collier et al., 2006). Ceci est moins problématique lorsque des fourrages de bonne qualité sont inclus dans la ration.

La disponibilité de l'eau est également primordiale en conditions de stress thermique. La consommation d'eau est étroitement liée à la consommation de matière sèche et à la production laitière. Chez la vache laitière, la consommation quotidienne d'eau augmente à un taux de 1,2 à 1,52 kg par augmentation de 1°C de la température ambiante (Meyer et al., 2004; Collier et al., 2006). Indépendamment du taux d'augmentation, il va de soi que de l'eau de bonne qualité doit être disponible en tout temps aux vaches en périodes de stress thermique. De plus, des études ont démontré qu'offrir de l'eau refroidie (10 vs 30°C) aux vaches permet d'augmenter la quantité de lait produite, de diminuer le taux de respiration et la température rectale (Milam et al., 1986; Purwanto et al., 1996).

Ainsi, les stress thermiques augmenteront avec les changements climatiques et leurs répercussions se feront ressentir chez les animaux. Les pertes monétaires associées aux stress thermiques au Canada sont encore modestes, mais plusieurs mesures d'atténuation pour faire face à cette problématique croissante sont plus simples à mettre en place lorsque les bâtiments sont conçus de manière à favoriser leur utilisation.

OPPORTUNITÉS ET DÉFIS

Le potentiel agroclimatique du Québec sera modifié de façon significative par les changements climatiques. Ces modifications se feront à trois niveaux : les rendements, la distribution des cultures sur le territoire et les risques. Les cultures actuellement limitées dans leur croissance et leur développement par la température devraient donner des rendements plus élevés suite aux changements climatiques. L'augmentation de la longueur de la saison de croissance devrait permettre de choisir des cultivars ou des hybrides plus tardifs (souvent plus productifs) et de cultiver de nouvelles espèces dans des régions où il était impossible de le faire (p. ex. maïs et soya dans les régions plus nordiques). Ainsi, le maïs grain et le soya devraient profiter particulièrement des futures conditions climatiques et accroître leur présence aux dépens des céréales à paille et des cultures fourragères. Par contre, ces prédictions ne tiennent pas compte de l'impact des changements climatiques sur les mauvaises herbes et les ravageurs qui, à leur tour, peuvent affecter grandement le rendement des cultures.

Les projections d'augmentation de rendements de plusieurs espèces végétales typiquement cultivées sur les fermes laitières du Québec ainsi que le déplacement vers le nord de certaines cultures laissent présager de nouvelles opportunités et de nouveaux défis. Une première évaluation de l'impact potentiel des changements climatiques sur la durabilité technico-économique et agroenvironnementale des fermes laitières au Québec a été réalisée à l'aide du modèle d'optimisation N-CyCLES (*Nutrient Cycling: Crops, Livestock, Environment and Soil*), lequel permet de considérer les interactions importantes entre chaque composante de la ferme et d'optimiser les rotations des cultures sur la ferme. Les projections des répercussions potentielles des changements climatiques ont été analysées pour des fermes laitières moyennes de deux régions contrastées du Québec (Centre-du-Québec et Bas-St-Laurent) (Charbonneau et al., 2014).

La ferme du Centre-du-Québec, dont les rendements des cultures sont supérieurs à ceux de la ferme moyenne du Bas-St-Laurent et où une partie des revenus de l'entreprise provient de la vente de récoltes (maïs, soya), pourrait bénéficier économiquement des changements climatiques. Le revenu provenant de la vente des récoltes compenserait les coûts supplémentaires engendrés par les changements climatiques. Pour sa part, la ferme du Bas-St-Laurent qui n'adapterait pas ses rotations risque de voir ses bénéfices légèrement diminuer dans un contexte de changements climatiques. Les projections laissent toutefois entrevoir une adaptation par l'inclusion de cultures comme le maïs-grain et le soya qui deviendraient alors possible dans cette région. Dans ce contexte, la ferme laitière de la région du Bas-St-Laurent deviendrait similaire à celle actuellement présente au Centre-du-Québec, non seulement pour ses rendements, mais également pour la vente de récoltes. Cette modification permettrait une augmentation du bénéfice net des entreprises. D'un point de vue environnemental, les changements climatiques pourraient détériorer les bilans azotés et augmenter la production de gaz à effet de serre. Notre évaluation de l'impact potentiel des changements climatiques sur les fermes laitières canadiennes et québécoises se continue. Nous utilisons le modèle « *Integrated Farm System Management (IFSM)* » qui permet de simuler la croissance et la valeur nutritive des espèces typiquement cultivées sur les fermes laitières du Canada, incluant les associations d'espèces fourragères et le maïs ensilage, en fonction des données climatiques journalières, des types de sol et des pratiques agricoles. Les résultats de ces simulations seront ensuite utilisés dans le modèle N-CyCLES pour sélectionner, entre autres, les rotations des cultures, les rations servies aux animaux, et l'allocation des fumiers et des fertilisants permettant d'optimiser le bénéfice net dans un contexte de changement climatique. En plus, les répercussions des stress thermiques et de la mise en place de stratégies d'atténuation seront aussi évaluées dans cette analyse.

BIBLIOGRAPHIE

- Baumgard, L.H. 2007. The effects of heat stress on nutritional and management decisions. Western Dairy Management Conference, Nevada, États-Unis.
- Baumgard, L.H. et R.P. Rhoads. 2013. Effects of heat stress on postabsorptive metabolism and energetics. *Annu. Rev. Anim. Biosci.* 1:311–337.
- Baumgard, L.H., M.K. Abuajamich, S.K. Stoakes, M.V. Sanz-Fernandez, J.S. Johnson et R.P. Rhoads. 2014. Feeding and managing cows to minimize heat stress. Tri-State Dairy Nutrition Conference. Fort Wayne, Indiana, États-Unis
- Beede, D.K. et R.J. Collier. 1986. Potential nutritional strategies for intensively managed cattle during thermal stress. *J. Anim. Sci.* 62:543:554.
- Bélanger, G., P. Rochette, Y. Castonguay, A. Bootsma, D. Mongrain et 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.
- 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.
- Bernabucci, U., L. Basiricò, P. Morera, D. Dipasquale, A. Vitali, F. Piccioli Cappelli et L. Calamari. 2015. Effect of summer season on milk protein fractions in Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 98:1815–1827.
- Bertrand, A., D. Prévost, F.J. Bigras et Y. Castonguay. 2007a. Elevated atmospheric CO₂ and strain of rhizobium alter freezing tolerance and cold-induced molecular changes in alfalfa (*Medicago sativa*). *Ann. Bot.* 99: 275–284.

- Bertrand, A., D. Prévost, F.J. Bigras, R. Lalande, G.F. Tremblay, Y. Castonguay et G. Bélanger. 2007b. Alfalfa response to elevated atmospheric CO₂ varies with the symbiotic rhizobial strain. *Plant Soil* 301:173–187.
- Bertrand, A., G.F. Tremblay, S. Pelletier, Y. Castonguay et G. Bélanger. 2008. Yield and nutritive value of timothy as affected by temperature, photoperiod and time of harvest. *Grass Forage Sci.* 63:421–432.
- Bertrand, A., G. Bélanger, Y. Castonguay et G.F. Tremblay. 2011. Temperature and CO₂ affect yield, root biomass, and nutritive value of Canadian tame and native forage species. *ASA-CSSA-SSSA International Annual Meetings*, 16-19 Oct. San Antonio, TX. Abstract 68182.
- Bond, T.E. et C.E. Kelly. 1955. The globe thermometer in agricultural research. *Agr. Eng.* 36:251–255.
- Bonesmo, H. et G. Bélanger. 2002a. Timothy yield and nutritive value by the CATIMO model: I. Growth and nitrogen. *Agron. J.* 94:337–345.
- Bonesmo, H. et G. Bélanger. 2002b. Timothy yield and nutritive value by the CATIMO model: II. Digestibility and fiber. *Agron. J.* 94:345–350.
- Bonesmo, H., G. Bélanger, E. Charmley, R. Drapeau, D.B. McKenzie, R. Michaud et G.F. Tremblay. 2005. Timothy yield and nutritive value by the CATIMO model: III. Validation for eastern Canada. *Agron. J.* 97:32–40.
- Chaiyabutr, N., S. Chanpongsang et S. Suadsong. 2008. Effects of evaporative cooling on the regulation of body water and milk production in crossbred Holstein cattle in a tropical environment. *Int. J. Biometeorol.* 52:575–585.
- Charbonneau, É., J.M. Moreno, G. Bélanger, H. Côté, D. Pellerin, V. Bélanger, G. Allard et D. Chaumont. 2014. Première évaluation de l'impact potentiel des changements climatiques sur la durabilité technico-économique et agroenvironnementale des fermes laitières au Québec. *Ouranos*.
- Collier, R.J., S.G. Doelger, H.H. Head, W. Thatcher et C.J. Wilcox. 1982. Effects of heat stress during pregnancy on maternal hormone concentrations, calf birth weight and postpartum milk yield of Holstein cows. *J. Anim. Sci.* 54:309–319.
- Collier, R.J., G.E. Dahl et M.J. VanBaale. 2006. Major advances associated with environmental effects on dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 89:1244–53.
- Fédération des producteurs de lait du Québec. 2010. Rapport annuel 2009. Disponible en ligne : <http://www.lait.org/fichiers/RapportAnnuel/?id=FPLQ-2009> (consulté le 9 septembre 2012).
- Frazzi, E., L. Calamari, F. Calegari et L. Stefanini. 2000. Behavior of dairy cows in response to different barn cooling systems. *TASAE.* 43:387–394.
- Fuquay, J.W., A.B. Zook, J.W. Daniel, W.H. Brown et W.E. Poe. 1979. Modifications in freestall housing for dairy cows during the summer. *J. Dairy Sci.* 62:577–583.
- Fuquay, J.W. 1981. Heat stress as it affects animal production. *J. Anim. Sci.* 52:164–174.
- Gaffin, S.L. et R. Hubbard. 1996. Experimental approaches to therapy and prophylaxis for heat stress and heatstroke. *Wilderness Environ. Med.* 7:312–334.
- Hammami, H., J. Bormann, N. M'hamdi, H.H. Montaldo et N. Gengler. 2013. Evaluation of heat stress effects on production traits and somatic cell score of Holsteins in a temperate environment. *J. Dairy Sci.* 96:1844–1855.
- IPCC. 2007. *Climate Change 2007: The physical science basis*. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2007.
- Jing, Q., G. Bélanger, V. Baron, H. Bonesmo, P. Virkajärvi et D. Young. 2012. Regrowth simulation of the perennial grass timothy. *Ecol. Modell.* 232:64–77.
- Jing, Q., G. Bélanger, V. Baron, H. Bonesmo et P. Virkajärvi, P. 2013a. Simulating the nutritive value of timothy summer regrowth. *Agron. J.* 105:563–572.
- Jing, Q., G. Bélanger, B. Qian et V. Baron. 2013b. Timothy yield and nutritive value under climate change in Canada. *Agron. J.* 105:1683–1694.
- Jing, Q., G. Bélanger, B. Qian et V. Baron. 2014. Timothy yield and nutritive value with a three-harvest system under the projected future climate in Canada. *Can. J. Plant Sci.* 94:213-222.

- Jordan, E.R. 2003. Effects of heat stress on reproduction. *J. Dairy Sci.* 86:(E. Suppl.):E104–E114.
- 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 status affects the circadian body temperature rhythm of dairy cows. *Livest. Sci.* 125: 155–160.
- Lin, J.C., B.R. Moss, J.L. Koon, C.A. Flood, R.C. Smith III, K.A. Cummins et D.A. Coleman. 1998. Comparison of various fan, sprinkler, and mister systems in reducing heat stress in dairy cows. *Appl. Eng. Agric.* 14:177–182.
- Meyer, U., M. Everinghoff, D. Gadenken et G. Flachowsky. 2004. Investigations on the water intake of lactating dairy cows. *Livest. Prod. Sci.* 90: 117–121.
- Messerli, J, A. Bertrand, J. Bourassa, G. Bélanger, Y. Castonguay, G.F. Tremblay, V. Baron et P. Seguin. 2015. Performance of low-cost open-top chambers to study long-term effect of carbon dioxide and climate under future conditions. *Agron. J.* 107:916-920.
- Milam, K.Z., C.E. Coppock, J.W. West, J.K. Lanham, D.H. Nave, J.M. LaBore, R.A. Stermer et C.F. Brasington. 1986. Effects of drinking water temperature on production responses in lactating Holstein cows in summer. *J. Dairy Sci.* 69:1013–1019.
- Moallem, U., G. Altmark, H. Lehrer et A. Arieli. 2010. Performance of high-yielding dairy cows supplemented with fat or concentrate under hot and humid climates. *J. Dairy Sci.* 93:3192–3202.
- Morton, J.M., W.P. Tranter, D.G. Mayer et N.N. Jonsson. 2007. Effects of environmental heat on conception rates in lactating dairy cows: critical periods of exposure. *J. Dairy Sci.* 90:2271–2278.
- 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.
- Perano, K.M., J.G. Usack, L.T. Angenent et K.G. Gebremedhin. 2015. Production and physiological responses of heat-stressed lactating dairy cattle to conductive cooling. *J. Dairy Sci.* 98:5252–5261.
- Piva, A. 2012 Effects of elevated carbon dioxide concentration and temperature under contrasted nitrogen fertilization on timothy. Master of Science Thesis, McGill University, 103 p.
- Piva, A., A. Bertrand, G. Bélanger, Y. Castonguay et P. Seguin. 2013. Growth and physiological response of timothy to elevated CO₂ and temperature under contrasted nitrogen fertilization. *Crop Sci.* 53:1–12.
- Purwanto, B.P., M. Harada et S. Yamamoto. 1996. Effect of drinking-water temperature on heat balance and thermoregulatory responses in dairy heifers. *Australian J. of Agric. Research* 47 : 505–512.
- Radoń, J., W. Bieda, J. Lendelová, J. et Š. Pogran. 2014. Computational model of heat exchange between dairy cow and bedding. *Computers and Electronics in Agriculture.* 107:29–37.
- Ravagnolo, O. et I. Misztal. 2000. Genetic Component of heat stress in dairy cattle, parameter estimation. *J. Dairy Sci.* 83:2126–2130.
- Renaudeau, D., A. Collin, S. Yahav, V. de Babilio, J.L. Gourdine et R.J Collier. 2012. Adaptation to hot climate and strategies to alleviate heat stress in livestock production. *Animal.* 6 (Special Issue 05): 707–728.
- Schüller, L.K., O. Burfeind et 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.
- Shearer, J.K., R.A. Bray et R.A. Bucklin. 1999. The management of heat stress in dairy cattle: what we have learned in Florida. *Proceedings of the feed and nutritional management cow college* (pp. 1-13): Virginia Tech.
- Shwartz, G., M.L. Rhoads, M.J. VanBaale, R.P. Rhoads et L.H. Baumgard. 2009. Effects of a supplemental yeast culture on heat stressed lactating Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 92:935–942.

- Smith, T.R., A. Chapa, S. Willard, C. Herndon Jr, R.J. Williams, J. Crouch, . . . et D. Pogue. 2006. Evaporative tunnel cooling of dairy cows in the Southeast. I: Effect on body temperature and respiration rate. *J. Dairy Sci.* 89:3904–3914.
- 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.
- Tomanek, L. 2010. Variation in the heat shock response and its implication for predicting the effect of global climate change on species' biogeographical distribution ranges and metabolic costs. *J. Exp. Biol.* 213:971–79.
- 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 et L.H. Baumgard. 2010. Effects of heat stress on energetic metabolism in lactating Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 93:644–655.
- Wilson, S.J., R.S. Marion, J.N. Spain, D.E. Spiers, D.H. Keisler et M.C. Lucy. 1998. Effects of controlled heat stress on ovarian function of dairy cattle. 1. Lactating cows *J. Dairy Sci.* 81:2124–2131.
- Wolfenson, D., Z. Roth et R. Meidan. 2000. Impaired reproduction in heatstressed cattle: basic and applied aspects. *Anim. Repr. Sci.* 61:535–547.
- Zimbelman, R.B., R.P. Rhoads, M.L. Rhoads, G.C. Duff, L.H. Baumgard et R.J. Collier. 2009. A re-evaluation of the impact of temperature humidity index (THI) and black globe humidity index (BGHI) on milk production in high producing dairy cows. Pages 158–169 in *Proceedings of the Southwest Nutrition Conference*. R. J. Collier, ed.