



**Changements
climatiques:
comprendre
pour mieux agir!**

IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR L'AGRICULTURE AU QUÉBEC

Gilles Bélanger, Ph. D.

Chercheur scientifique en agronomie et écophysologie
Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures
Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC), Sainte-Foy
belangergf@em.agr.ca

Co-auteur : **Andy Bootsma**, M. Sc.

Chercheur scientifique en agroclimatologie
Centre de recherche de l'Est sur les céréales et les oléagineux
AAC, Ottawa

Chercheur au Centre de recherche et de développement sur les sols et les grandes cultures à Agriculture et Agroalimentaire Canada, M. Gilles Bélanger travaille sur la modélisation de la croissance et de la qualité ainsi que sur l'évaluation des risques de dommage hivernal aux plantes pérennes en fonction des changements climatiques. Ses activités de recherche ont aussi porté sur la croissance et la qualité des plantes fourragères et la gestion des éléments nutritifs.



**Ordre
des agronomes
du Québec**

IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR L'AGRICULTURE AU QUÉBEC

INTRODUCTION

L'agriculture occupe une place importante dans l'économie québécoise et elle est largement influencée par les conditions climatiques. Ceci est d'autant plus vrai que plusieurs régions québécoises sont à la limite septentrionale de la production agricole. Les modèles météorologiques prédisent des changements climatiques au Québec au cours des cinq prochaines décennies, soit de 2 à 6°C au cours de l'hiver et de 1 à 4°C au cours de l'été (Étude pan-canadienne, Tome V, page 6). De plus, les changements climatiques seront plus importants dans le nord du Québec qu'au sud de la province. Ces changements climatiques projetés auront vraisemblablement des effets positifs aussi bien que négatifs sur l'agriculture des différentes régions du Québec.

Cette conférence a pour objet de présenter les répercussions possibles des changements climatiques sur l'agriculture du Québec. Pour ce faire, nous avons mis l'accent sur quelques-unes des cultures les plus importantes au Québec : maïs, soya, orge, plantes fourragères et arbres fruitiers, et nous avons utilisé une série d'indices agroclimatiques. Ces derniers intègrent nos connaissances de l'effet des conditions climatiques sur les cultures et ils sont calculés à partir de données de température et de précipitation. Outre les répercussions sur la saison de croissance, nous avons également considéré les risques de dommages hivernaux aux plantes agricoles pérennes.

DONNÉES CLIMATIQUES ET INDICES AGROCLIMATIQUES

Nous avons calculé les indices agroclimatiques de la période actuelle (1961-1990) et de deux périodes futures (2010-2039 et 2040-2069) pour 21 stations climatiques représentatives des régions agricoles du Québec (Tableau 1). Les scénarios climatiques pour les périodes futures se fondent sur les données de sortie du modèle de circulation générale (MCG) du Canada, qui comprennent les effets des aérosols (Boer et autres, 2000). Le MCG pose par hypothèse que le forçage des gaz à effet de serre pour ces périodes est équivalent à celui observé sur la période 1900-1996, puis augmente de 1 % annuellement pour les années subséquentes. Autrement dit, selon ce scénario, la concentration en gaz à effet de serre aura doublé d'ici 2050 par rapport

aux observations des années 1980 (Boer et autres, 2000). Les données climatiques de référence utilisées pour cette étude sont la moyenne mensuelle sur 30 ans des températures maximales et minimales quotidiennes moyennes et des précipitations totales pour la période 1961-1990 calculées pour 21 stations climatiques du Québec où les données nécessaires étaient disponibles (Environnement Canada, 1994).

L'information détaillée du calcul des indices agroclimatiques est disponible dans deux rapports de recherche financés par le Fonds d'action pour le changement climatique. Les indices agroclimatiques associés à la saison de croissance tels que les unités thermiques maïs (UTM), les degrés-jours de croissance (DJC) et le déficit hydrique sont décrits par Bootsma et autres (2001). Les indices agroclimatiques reliés à la survie hivernale des plantes agricoles pérennes sont décrits par Bélanger et autres (2001).

Tableau 1 : Stations météorologiques utilisées pour le calcul des indices agroclimatiques.

Régions agricoles	Stations météorologiques
Sud du Québec	Berthierville, Farnham, Lachute, Lennoxville, Sainte-Clothilde, Saint-Hyacinthe
Centre du Québec	Laurierville, Nicolet, Québec, Scott, Saint-Alban
Bas-Saint-Laurent/Gaspésie	Caplan, La Pocatière, Mont-Joli, Trois-Pistoles
Continental Nord	Amos, Normandin, Péribonka
Outaouais	Arnprior Grandon ¹ , Chenaux ¹ , Ottawa

¹ Stations non utilisées pour les indices associés à l'hiver.

SAISON DE CROISSANCE

Divers indices agroclimatiques ont servi dans le passé à évaluer le potentiel de production des cultures. Le déficit/excédent de précipitations ($\text{ÉP} - P$, où ÉP désigne l'évapotranspiration potentielle et P , les précipitations saisonnières) et les degrés-jours de croissance effectifs (DJCE) au-dessus de 5°C sont les principales variables climatologiques utilisées pour déterminer si des terres se prêtent bien à la culture de petites céréales de printemps (Agronomic Interpretation Working Group, 1995). Les DJCE sont une variante des DJC qui tient compte de la photopériode dans l'analyse de la culture des petites céréales, lesquelles sont

sensibles à ce facteur. Les UTM servent souvent à déterminer si des régions se prêtent bien à la culture du maïs et du soya.

Nous avons donc utilisé ces indices dans notre analyse parce qu'ils ont une influence notable sur le rendement des cultures et qu'ils sont reconnus depuis longtemps comme des indicateurs du potentiel de production des cultures. Nous avons étudié le rapport entre ces indicateurs et les données sur le rendement des cultures recueillies par des essais au champ ou tirées de recueils de statistiques agricoles. Une analyse de régression linéaire a permis de quantifier la relation entre les rendements et les indicateurs agroclimatiques (Bootsma et autres, 2001).

Unités thermiques maïs (UTM)

Sur l'ensemble du territoire agricole québécois, les UTM devraient passer de 2 390 sous les conditions actuelles à 3 088 en 2040-2069, soit une augmentation de 29 %. Les augmentations d'UTM seront cependant plus importantes dans les régions nordiques que dans le sud du Québec. Ainsi, les UTM augmenteront de 38 % dans la région du Continental Nord et de 25 % dans le sud du Québec (Tableau 2).

Tableau 2 : Effets des changements climatiques sur les unités thermiques maïs (UTM) et les rendements en maïs-grain et en soya dans cinq régions agricoles du Québec.

	1961-1990	2010-2039	2040-2069
Sud du Québec			
- UTM ¹	2 760	3 134	3 465
- Rendement maïs ² (t/ha)	8,4	10,8	12,9
- Rendement soya ² (t/ha)	3,1	3,7	4,3
Centre du Québec			
- UTM	2 432	2795	3 128
- Rendement maïs (t/ha)	6,3	8,6	10,7
- Rendement soya (t/ha)	2,6	3,2	3,7
Bas-Saint-Laurent/Gaspésie			
- UTM	2 011	2 366	2 701
- Rendement maïs (t/ha)	0 ³	0	8,0
- Rendement soya (t/ha)	0	0	3,0
Continental Nord			
- UTM	1 772	2 114	2 445
- Rendement maïs (t/ha)	0	0	6,4
- Rendement soya (t/ha)	0	0	2,6
Outaouais			
- UTM	2 707	3 081	3 423
- Rendement maïs (t/ha)	8,0	10,4	12,6
- Rendement soya (t/ha)	3,1	3,6	4,2

¹ Unités thermiques maïs moyennes pour la période de référence (1961-1990) et les deux périodes étudiées (2010-2039, 2040-2069).

² Rendements en maïs-grain et en soya estimés à partir de la relation entre les UTM et les rendements obtenus d'essais en parcelles.

³ Rendements en maïs-grain et en soya établis à zéro pour les sites ayant moins de 2 300 UTM.

Certaines régions agricoles du Québec (Saguenay/Lac-Saint-Jean, Abitibi, Bas-Saint-Laurent/Gaspésie) ont présentement une accumulation d'UTM trop faible pour envisager la production de maïs-grain et de soya (UTM < 2 300). Les conditions climatiques prédites devraient permettre d'envisager la culture du maïs-grain et du soya dans ces régions au cours de la période 2040-2069 et d'y obtenir des rendements de 6,4 à 8,0 t/ha en maïs-grain et de 2,6 à 3,0 t/ha en soya (Tableau 2). Pour les régions où la culture du maïs-grain est déjà possible, les rendements au cours des 50 prochaines années devraient augmenter de 54 % au sud du Québec, de 70 % au centre du Québec et de 57 % dans l'Outaouais. Quant au soya, les rendements devraient augmenter de 39 % dans le sud du Québec, de 42 % dans le centre du Québec et de 35 % dans l'Outaouais.

L'augmentation de rendement prédite est basée sur une relation empirique entre le rendement en maïs-grain ou en soya et les UTM. Cette relation a été établie à partir du rapport entre la valeur moyenne des rendements obtenus dans des essais d'hybrides de maïs-grain ou de soya et la valeur moyenne des UTM. Cette relation s'explique dans une large mesure par le fait qu'on peut cultiver des hybrides de maïs ou des cultivars de soya plus tardifs qui donnent des rendements plus élevés dans les régions où les UTM sont en plus grand nombre. Ainsi, les producteurs devraient être capables de cultiver désormais les hybrides et cultivars plus tardifs et donc plus productifs.

Cet accroissement potentiel du rendement est associé uniquement à la hausse des températures; il fait abstraction de l'effet direct de l'augmentation de la concentration de gaz carbonique (CO₂) sur le rendement et de toute augmentation du rendement qui pourrait être réalisée grâce à la sélection ou au perfectionnement des technologies. Comme le maïs est une plante de type C4, l'augmentation de la concentration de gaz carbonique ne devrait par avoir un effet direct sur la photosynthèse (Warrick, 1998); les plantes de type C4 utilisent le CO₂ de façon plus efficace que les plantes de type C3 telles que l'orge et la luzerne. Les prévisions d'accroissement ne tiennent pas compte non plus de la variation possible de l'effet des mauvaises herbes, des insectes et des maladies sur le rendement dans un climat transformé.

Degrés-jours de croissance (DJC)

Les DJC servent à représenter la période de croissance des plantes fourragères vivaces (Chapman et Brown, 1978) tandis que les degrés-jours de croissance effectifs (DJCE) servent plus spécifiquement à représenter la période de croissance des petites céréales du printemps

(Agronomic Interpretation Working Group, 1995). En moyenne sur le territoire québécois, les DJCE devraient passer de 1 565 à 1 821 en 2010-2039, puis à 2 053 en 2040-2069, soit une augmentation de 31 % par rapport aux conditions actuelles (Tableau 3). La relation entre le rendement et les DJCE n'est pas très bonne (Bootsma et autres, 2001), de telle sorte qu'il est fort peu probable que l'augmentation des DJCE ait un effet important sur les rendements de l'orge. Comme l'orge est une plante de type C3, l'augmentation des concentrations de CO₂ aura probablement pour effet d'accroître les rendements par l'intensification de la photosynthèse et la réduction de la photorespiration (Warrick, 1998).

Les DJC devraient augmenter de 26 à 31 % avec le changement climatique, soit des augmentations de 397 à 513 degrés-jours (Tableau 3). La période entre deux coupes de plantes fourragères est d'environ 450 à 500 degrés-jours. On peut donc prévoir qu'avec le changement climatique, une coupe additionnelle de plantes fourragères pourra être effectuée dans toutes les régions agricoles du Québec, ce qui pourrait se traduire par des augmentations de rendement annuel de 2 à 5 t/ha.

Déficit hydrique

Les variations de précipitations prévues sont généralement faibles, c'est-à-dire que le rapport entre le volume mensuel moyen des précipitations pour les périodes étudiées et la mesure correspondante pour la période de référence est souvent voisin de 1. Le déficit hydrique devrait augmenter légèrement dans toutes les régions. En moyenne au Québec, le déficit hydrique devrait passer de 79 mm sous les conditions actuelles à 106 mm en 2040-2069. Cette augmentation du déficit hydrique variera de 9 mm dans la région du Continental Nord à 41 mm dans l'Outaouais (Tableau 3). Bien que le stress hydrique puisse avoir, certaines années, une influence significative sur le rendement du maïs et d'autres cultures, ce facteur ne devrait pas avoir un effet notable sur les rendements moyens.

Tableau 3 : Effets des changements climatiques sur les degrés-jours de croissance effectifs (DJCE), les degrés-jours de croissance (DJC) et le déficit hydrique dans cinq régions agricoles du Québec.

	1961-1990	2010-2039	2040-2069
Sud du Québec			
- Degrés-jours de croissance effectifs ^{1,2}	1 806	2 088	2 332
- Degrés-jours de croissance ^{1,3}	1 912	2 172	2 415
- Déficit hydrique ^{1,4} (mm)	89	108	127
Centre du Québec			
- Degrés-jours de croissance effectifs	1 594	1 851	2 078
- Degrés-jours de croissance	1 700	1 936	2 155
- Déficit hydrique (mm)	18	22	47
Bas-Saint-Laurent/Gaspésie			
- Degrés-jours de croissance effectifs	1 304	1 538	1 754
- Degrés-jours de croissance	1 390	1 611	1 817
- Déficit hydrique (mm)	43	30	56
Continental Nord			
- Degrés-jours de croissance effectifs	1 179	1 380	1 602
- Degrés-jours de croissance	1 299	1 492	1 696
- Déficit hydrique (mm)	73	65	82
Outaouais			
- Degrés-jours de croissance effectifs	1 771	2 058	2 304
- Degrés-jours de croissance	1 905	2 166	2 411
- Déficit hydrique (mm)	216	231	257

¹ Valeurs moyennes pour la période de référence (1961-1990) et les deux périodes étudiées (2010-2039, 2040-2069).

² Somme des DJC pour la période débutant 10 jours après que $T_{moy} < 5\text{ °C}$ au printemps et se terminant la journée qui précède la date moyenne de premier gel à l'automne (°C).

³ Somme des DJC $> 5\text{ °C}$ pour la période allant de la date où $T_{moy} > 5\text{ °C}$ pour la première fois au printemps à la date où $T_{moy} > 5\text{ °C}$ la dernière fois à l'automne.

⁴ Obtenu en soustrayant la précipitation quotidienne moyenne de l'évapotranspiration potentielle et en faisant la somme de ces différences pour la même période que celle utilisée dans le calcul des DJCE.

RISQUES DE MORTALITÉ HIVERNALE DES PLANTES AGRICOLES PÉRENNES

Les conditions climatiques hivernales sont une contrainte majeure pour les plantes agricoles pérennes, lesquelles représentent plus de un million d'hectares au Québec. L'augmentation prédite de 2 à 6 °C de la température hivernale moyenne de l'air dans l'est du Canada devrait affecter les facteurs climatiques responsables pour la survie à l'hiver des plantes pérennes.

Les plantes pérennes regroupent plusieurs espèces agricoles dont les plantes fourragères et les arbres fruitiers. La partie pérenne des plantes fourragères est située sous ou près de la surface du sol, alors que celle des arbres fruitiers, à l'exception du système racinaire, est située au-dessus du sol. La croissance des plantes fourragères s'arrête à l'automne avec la diminution de la température alors que celle des arbres fruitiers s'arrête avec la diminution de la photopériode. Les plantes fourragères et les arbres fruitiers diffèrent également par leurs mécanismes de tolérance au froid. Les plantes fourragères survivent aux basses températures en initiant et limitant la formation de glace aux espaces extracellulaires. Cette formation de glace dans les espaces extracellulaires engendre un gradient de pression de vapeur entre les compartiments intra et extracellulaires, ce qui a pour effet d'apporter l'eau vers l'extérieur de la cellule et ainsi de diminuer le point de congélation de l'intérieur de la cellule. L'amplitude et la durée de la congélation peuvent entraîner le dessèchement de la cellule (Sakai et Larcher, 1987). Les arbres fruitiers utilisent également ce processus de gel extracellulaire. Cependant, ils ont également la possibilité de surfusion dans certains de leurs tissus, ce qui leur permet de tolérer des températures beaucoup plus basses.

Tout comme pour la saison de croissance, des indices climatiques similaires à ceux développés par Rochette et Dubé (1993 a, b) ont été utilisés pour exprimer les risques de dommages hivernaux associés à différentes causes; ces indices ont été calculés pour les conditions actuelles (1961-1990) et pour les conditions prédites pour deux périodes (2010-2039 et 2040-2069). Les indices utilisés pour les plantes fourragères ont été développés en utilisant principalement la luzerne comme plante modèle alors que le pommier a servi de plante modèle pour les arbres fruitiers.

Plantes fourragères

Les indices automnaux expriment l'influence de la température et des précipitations sur l'endurcissement au froid. Les indices hivernaux évaluent i) l'effet net de la durée et de l'intensité du froid et du rôle protecteur de la couverture de neige, ii) la perte d'endurcissement au froid attribuable aux températures chaudes et iii) le dommage potentiel au système racinaire par le soulèvement et la glace.

Des automnes plus doux, un endurcissement moins favorable...

Les conditions favorables pour la croissance des plantes fourragères retardent le développement de l'endurcissement au froid. Ainsi, la somme des degrés-froid ($T < 5^{\circ}\text{C}$) au cours de la période d'endurcissement exprime le potentiel d'endurcissement des plantes fourragères. La somme des degrés-froid au cours de la période d'endurcissement devrait diminuer de 13 à 29 % selon les régions (Tableau 4). Les travaux de recherche réalisés au Québec ont démontré qu'une accumulation d'environ 100 degrés-froid constituait des conditions optimales pour l'endurcissement (Paquin, 1977). Le Bas-Saint-Laurent/Gaspésie est la région au Québec qui a la plus grande accumulation de degrés-froid au cours de la période d'endurcissement et qui aura toujours des conditions optimales d'endurcissement, même avec le changement climatique prévu. Toutes les autres régions québécoises subiront une diminution de l'accumulation des degrés-froid et s'éloigneront donc des conditions optimales d'endurcissement.

Les plantes pérennes s'endurcissent moins bien sous des conditions excessives d'humidité du sol (Paquin et Mehuys, 1980). Puisque l'évapotranspiration est faible à l'automne, l'humidité du sol est étroitement reliée aux précipitations sous forme de pluie. Les précipitations journalières durant la phase d'endurcissement ont été utilisées pour évaluer les conditions excessives d'humidité du sol au cours de la période d'endurcissement. Les pluies journalières au cours de la période d'endurcissement devraient diminuer de 7 à 29 % selon les régions agricoles, ce qui devrait favoriser un meilleur endurcissement (Tableau 4).

Tableau 4 : Effets des changements climatiques sur des indices agroclimatiques associés à l'endurcissement au froid des plantes agricoles pérennes dans cinq régions agricoles du Québec.

	1961-1990	2010-2039	2040-2069
Sud du Québec			
- Degrés-froid ^{1,2}	75,6	60,4	53,3
- Pluie (mm/jour) ³	3,04	2,95	2,70
- Photopériode ⁴	11,9	11,5	11,1
Centre du Québec			
- Degrés-froid	81,3	69,5	66,0
- Pluie (mm/jour)	2,88	2,84	2,61
- Photopériode	12,2	11,6	11,2
Bas-Saint-Laurent/Gaspésie			
- Degrés-froid	117,7	107,3	102,0
- Pluie (mm/jour)	2,62	2,52	2,43
- Photopériode	11,7	11,2	10,9
Continental Nord			
- Degrés-froid	82,6	70,4	61,3
- Pluie (mm/jour)	2,45	2,34	2,20
- Photopériode	12,6	12,5	12,0
Outaouais			
- Degrés-froid	93,0	82,3	67,6
- Pluie (mm/jour)	2,71	2,56	1,98
- Photopériode	11,7	11,1	10,7

¹ Valeurs moyennes pour la période de référence (1961-1990) et les deux périodes étudiées (2010-2039, 2040-2069).

² Somme des degrés-froid < 5 °C durant la période d'endurcissement.

³ Taux d'accumulation de pluie durant le période d'endurcissement.

⁴ Photopériode au jour de la première gelée (°C).

Des hivers plus doux, moins de neige, perte d'endurcissement et plus de glace...

Les plantes fourragères pérennes, même si elles ont développé une tolérance maximale au froid, peuvent être affectées si les températures descendent sous leur limite de tolérance. Les recherches effectuées sur la luzerne ont démontré qu'elle pouvait tolérer des températures jusqu'à -15 °C pour plusieurs jours (Paquin, 1984). Toutefois, la température de l'air peut descendre jusqu'à -44 °C. La survie à l'hiver des plantes fourragères dépend donc de la protection des racines et du collet par une couverture de neige adéquate. Le risque associé à la présence de températures létales (< -15 °C) en absence d'une couverture de neige a été évalué par la différence entre le nombre de jours avec une couverture de neige d'au moins 10 cm et la longueur de la période froide (période entre le premier et le dernier événement d'une température < -15 °C). Le nombre de jours d'exposition à des températures létales sans couverture de neige devrait augmenter dans toutes les régions du Québec, augmentant ainsi le risque de dommages (Tableau 5).

Tableau 5 : Effets des changements climatiques sur des indices agroclimatiques associés à l'hiver dans cinq régions agricoles du Québec.

	1961-1990	2010-2039	2040-2069
Sud du Québec			
- Différence neige-froid ^{1,2} (jour)	-11,2	-30,0	-37,7
- Pertes d'endurcissement ³	0,28	0,54	0,74
- Pluie (mm/jour) ⁴	0,83	0,99	1,08
- Degrés-froid ⁵	83,6	45,3	32,1
- Température minimale ⁶ (°C)	-33,1	-29,8	-28,2
Centre du Québec			
- Différence neige-froid (jour)	3,2	-16,5	-25,1
- Pertes d'endurcissement	0,16	0,33	0,51
- Pluie (mm/jour)	0,67	0,83	0,91
- Degrés-froid	114,9	63,3	44,6
- Température minimale (°C)	-33,5	-30,3	-28,7
Bas-Saint-Laurent/Gaspésie			
- Différence neige-froid (jour)	12,2	-0,5	-4,3
- Pertes d'endurcissement	0,09	0,19	0,31
- Pluie (mm/jour)	0,35	0,44	0,53
- Degrés-froid	65,7	31,5	19,5
- Température minimale (°C)	-27,9	-24,8	-23,2
Continental Nord			
- Différence neige-froid (jour)	-4,5	-18,2	-28,9
- Pertes d'endurcissement	0,14	0,23	0,33
- Pluie (mm/jour)	0,30	0,40	0,47
- Degrés-froid	360,0	245,7	181,9
- Température minimale (°C)	-41,1	-37,9	-35,6
Outaouais			
- Différence neige-froid (jour)	-9,9	-31,3	-31,6
- Pertes d'endurcissement	0,18	0,45	0,1
- Pluie (mm/jour)	0,60	0,76	0,4
- Degrés-froid	74,2	34,1	21,4
- Température minimale (°C)	-29,9	-26,3	-24,7

¹ Valeurs moyennes pour la période de référence (1961-1990) et les deux périodes étudiées (2010-2039, 2040-2069)

² Différences entre le nombre de jours avec une couverture de neige d'au moins 10 cm et la longueur de la période de froid (T < -15 °C).

³ Taux d'accumulation de degrés-jours > 0 °C au cours de la période froide (T < -15 °C).

⁴ Taux d'accumulation de la pluie au cours de la période froide (T < -15 °C).

⁵ Somme des degrés-froid < -15 °C.

⁶ Température minimale annuelle.

L'augmentation du nombre de jours à risque variera entre 16 dans le Bas-Saint-Laurent/Gaspésie et 28 dans le centre du Québec. En moyenne au Québec, la longueur de la période froide passera de 111 jours dans les conditions actuelles à 94 jours en 2040-2069, alors que le nombre de jours avec une couverture de neige d'au moins 10 cm diminuera de 109 jours dans les conditions actuelles à 68 jours en 2040-2069. Ainsi, l'augmentation du nombre de jours à risque est le résultat d'une diminution plus importante du nombre de jours avec une couverture de neige de 10 cm que la réduction de la longueur de la période froide. La diminution du nombre de jours avec une couverture de neige d'au moins 10 cm est le résultat d'une diminution importante des chutes de neige et de plus grandes périodes de dégel reliées aux températures hivernales plus douces (Tableau 6).

L'exposition à des températures au-dessus de 0°C au cours de l'hiver entraîne une perte graduelle de l'endurcissement et augmente la susceptibilité des plantes aux températures froides subséquentes (Sakai et Larcher, 1987). L'accumulation journalière de degrés-jours ($T > 0^\circ\text{C}$) au cours de la période froide a été utilisée pour exprimer la perte potentielle d'endurcissement. Cette accumulation de degrés-jours devrait être presque trois fois plus importante avec le changement climatique (Tableau 5). Ainsi, on s'attend qu'avec le changement climatique, les risques associés à la perte d'endurcissement au cours de l'hiver vont augmenter, d'autant plus que la couverture de neige va également diminuer et ne sera plus suffisante pour isoler les plantes fourragères des cycles de gel-dégel.

Les températures plus douces prévues pour les périodes futures devraient également causer une augmentation importante des pluies hivernales (Tableau 5). Les pluies hivernales peuvent causer la formation de couches de glace en surface, lesquelles peuvent entraîner l'anoxie et des dommages physiques au système racinaire. De plus, la glace peut occasionner une plus grande pénétration du gel. Les risques de dommage associés à la présence de glace devraient donc augmenter avec le changement climatique.

Tableau 6 : Effets des changements climatiques sur la température hivernale, les précipitations de neige et les premiers et derniers gels dans cinq régions agricoles du Québec.

	1961-1990	2010-2039	2040-2069
Sud du Québec			
- Température moyenne hivernale (°C) ^{1,2}	-3,9	-2,1	-0,8
- Neige (cm)	221	174	153
- Premier gel automnal (jour/mois) ³	28/09	06/10	13/10
- Dernier gel printanier (jour/mois) ³	14/05	05/05	27/04
Centre du Québec			
- Température moyenne hivernale (°C)	-5,5	-3,7	-2,6
- Neige (cm)	258	215	196
- Premier gel automnal (jour/mois)	23/09	03/10	10/10
- Dernier gel printanier (jour/mois)	18/05	10/05	03/05
Bas-Saint-Laurent/Gaspésie			
- Température moyenne hivernale (°C)	-5,3	-3,7	-2,5
- Neige (cm)	295	249	230
- Premier gel automnal (jour/mois)	01/10	10/10	16/10
- Dernier gel printanier (jour/mois)	18/05	05/05	28/04
Continental Nord			
- Température moyenne hivernale (°C)	-9,6	-7,9	-6,6
- Neige (cm)	234	212	193
- Premier gel automnal (jour/mois)	09/09	18/09	27/09
- Dernier gel printanier (jour/mois)	05/06	24/05	17/05
Outaouais			
- Température moyenne hivernale (°C) ¹	-3,8	-1,7	-0,2
- Neige (cm)	197	128	109
- Premier gel automnal (jour/mois)	02/10	13/10	22/10
- Dernier gel printanier (jour/mois)	04/05	23/04	13/04

¹ Valeurs moyennes pour la période de référence (1961-1990) et les deux périodes étudiées (2010-2039, 2040-2069).

² Température hivernale moyenne du 1^{er} novembre au 30 avril.

³ Premier gel automnal et dernier gel printanier à 0 °C.

Arbres fruitiers

Première gelée plus tard, meilleures conditions d'endurcissement...

La diminution de la photopériode au cours de l'automne induit l'endurcissement des arbres fruitiers; la diminution de la température permet de compléter ce processus (Larcher, 1980). L'endurcissement peut être inadéquat si une première gelée mortelle intervient trop rapidement après la cessation de la croissance (Sakai et Larcher, 1987). La photopériode au jour de la première gelée automnale est utilisée pour décrire la sévérité des conditions; une photopériode

courte au jour du premier gel indique une longue période entre la cessation de croissance et le premier gel, et donc des conditions favorables d'endurcissement. Dans toutes les régions agricoles du Québec, la photopériode au jour de la première gelée devrait diminuer (Tableau 4). Cette diminution ira de 0,6 heure dans la région du Continental Nord à 1,0 heure au centre du Québec. Les conditions d'endurcissement pour les arbres fruitiers seront donc plus favorables avec le changement climatique.

Moins de froid intense, meilleure survie...

L'accumulation de degrés-froid ($T < -15\text{ °C}$) est utilisée pour exprimer la menace associée à l'intensité et à la durée de températures létales; cette accumulation réfère au processus de tolérance au froid par gel extracellulaire présent chez les plantes fourragères et les arbres fruitiers. Cette accumulation de degrés-froid devrait diminuer dans toutes les régions du Québec et cette diminution sera principalement marquée dans la région du Continental Nord (Tableau 5).

La distribution nordique des arbres fruitiers est limitée par la température minimale annuelle; cette température minimale est un indice de la capacité de la plante à tolérer le froid par surfusion profonde. Cette température minimale annuelle devrait augmenter au cours des cinq prochaines décennies (Tableau 5). Ainsi, dans la région du Continental Nord, la température minimale annuelle devrait augmenter de $-41,1$ à $-35,6\text{ °C}$. On peut donc croire que la production d'arbres fruitiers devrait s'étendre plus au nord avec le changement climatique.

La possibilité de perte d'endurcissement au cours de l'hiver existe également chez les arbres fruitiers. Comme pour les plantes fourragères, nous avons calculé un indice décrivant ce phénomène. Pour les arbres fruitiers, ce risque de perte d'endurcissement a été calculé en cumulant les degrés-jours ($T > 0\text{ °C}$) du 1^{er} janvier au dernier événement de -15 °C . Pour l'ensemble du Québec, ce cumul de degrés-jours devrait passer de 13 dans les conditions actuelles à 39 en 2040-2069. Ainsi, les risques de dommages attribuables à la perte d'endurcissement au froid devraient augmenter avec le changement climatique.

Dernier gel printanier plus tôt et dommages aux bourgeons...

Le développement des bourgeons au printemps est associé à une vulnérabilité croissante aux gelées tardives (Simons et Doll, 1976). Pour exprimer le risque de dommages aux bourgeons par une gelée tardive, un indice du cumul des degrés-jours ($T > 0\text{ °C}$) du 1^{er} janvier au dernier événement d'une température inférieure à 0 °C a été calculé. Les risques de dommages aux

bourgeons par une gelée tardive diminuent avec une diminution du cumul de degré-jours. Ce cumul de degrés-jours devrait diminuer au Saguenay/Lac-Saint-Jean (415 à 308) et dans le Bas-Saint-Laurent/Gaspésie (232 à 195) mais restera relativement inchangé dans les autres régions. Les risques de dommages aux bourgeons attribuables à une gelée tardive devraient donc diminuer dans les régions agricoles les plus nordiques du Québec.

POTENTIEL AGROCLIMATIQUE AU QUÉBEC SOUS UN CLIMAT MODIFIÉ

Le potentiel agroclimatique au Québec devrait être modifié de façon significative avec le changement climatique. Ces modifications se feront à trois niveaux : les rendements, la distribution des cultures et les risques.

Rendements

Le changement climatique prédit au cours des prochaines cinq décennies devrait occasionner des augmentations de rendement de maïs, de soya et de plantes fourragères. Par contre, aucune augmentation des rendements en orge n'est prévue avec le changement climatique. Les résultats disponibles ne permettent pas de conclure sur les rendements d'autres espèces telles que les cultures maraîchères et horticoles. De façon générale, on peut prévoir que toutes les espèces qui sont limitées dans leur croissance et leur développement par la température devraient donner des rendements plus élevés avec le changement climatique. Il ne faut toutefois pas oublier que ces prédictions ne prennent pas en compte l'impact de l'augmentation de la concentration en CO₂ sur les rendements des cultures et l'impact des changements climatiques sur les ravageurs. De plus, la réalisation de ce potentiel agroclimatique dépendra de la capacité de production des sols.

Distribution des cultures

La longueur de la saison de croissance sera modifiée de façon importante avec le changement climatique. Ainsi, les dates du dernier gel printanier seront de 12 à 20 jours plus tôt alors que les dates du premier gel automnal seront de 15 à 18 jours plus tard (Tableau 6). Cette modification de la longueur de la saison de croissance permettra de choisir des cultivars ou des hybrides plus tardifs et permettra de cultiver des espèces nouvelles.

Le changement climatique au cours de l'hiver aura également un impact sur la distribution des espèces agricoles au Québec. On peut déjà prévoir un déplacement vers le nord de certaines

espèces d'arbres fruitiers. De plus, le choix d'espèces et de cultivars sera également affecté par des conditions hivernales plus douces.

Risques

Le risque accru pour des espèces fourragères sensibles à l'hiver (par exemple la luzerne) pourrait avoir un impact sur le choix des espèces cultivées. Le risque de mortalité hivernale est présentement plus élevé dans le sud du Québec que dans les autres régions du Québec. Avec le changement climatique, la plupart des régions agricoles du Québec auront un niveau de risque comparable à ce que nous avons aujourd'hui dans le sud du Québec.

Les données climatiques prédites pour les prochaines années et utilisées pour nos recherches ne prennent pas en compte l'augmentation de la variabilité climatique et les événements climatiques extrêmes comme les sécheresses, les vagues de froid intense et le verglas. Il existe peu d'indications sur la fréquence, la durée et l'intensité prévues d'événements climatiques extrêmes avec le changement climatique anticipé (Étude pan-canadienne, Tome V, page 9). Toutefois, quelques travaux de recherche suggèrent que les phénomènes climatiques extrêmes pourraient augmenter dans les prochaines années, augmentant ainsi les risques climatiques pour la production agricole. Ces phénomènes climatiques extrêmes pourraient, entre autres, avoir un impact négatif sur la possibilité de production d'espèces à long cycle d'établissement telles que les arbres fruitiers.

CONCLUSION

Les changements climatiques prévus pour les cinq prochaines décennies devraient avoir un effet important sur l'agriculture québécoise. Les augmentations de rendement de plusieurs cultures importantes et le développement de nouvelles cultures dans plusieurs régions du Québec constituent des opportunités intéressantes. Par ailleurs, les risques accrus associés à la production agricole représentent un défi pour le monde agricole.

RÉFÉRENCES

AGRONOMIC INTERPRETATION WORKING GROUP. 1995. *Systèmes de classification des terres selon leurs aptitudes pour les cultures : 1. La production des céréales de printemps*. W.W. Pettapiece (dir.), Bulletin technique 1995-6F. Centre de recherche sur les terres et les ressources biologiques, Agriculture et Agroalimentaire Canada. 90 pages.

BÉLANGER, G. et autres. 2001. *Impact des changements climatiques sur les risques de dommages hivernaux aux plantes agricoles pérennes*. Rapport final - Projet A084. Fonds d'action pour le changement climatique. 65 pages.

BOER, G.J., G. FLATO. et D.A. RAMSDEN. 2000. *Transient climate change simulation with greenhouse gas and aerosol forcing : projected climate to the twenty-first century*. Climate Dynamics. 16 (6) : 427-450.

BOOTSMA, A., S. GAMEDA et D.W. MCKENNEY. 2001. *Adaptation de la production agricole au changement climatique dans le Canada Atlantique*. Rapport final – Projet A214. Fonds d'action pour le changement climatique. 35 pages. <http://res2.agr.ca/ecorc/staff/bootsma/frreport.pdf>.

CHAPMAN, L.J. et D.M. BROWN. 1978. *Les climats du Canada et l'agriculture*. Rapport n° 3, révisé 1978. Environnement Canada, Direction générale des terres, Ottawa. 24-99 + cartes.

ENVIRONNEMENT CANADA. 1994. *Données climatiques mensuelles canadiennes et normales 1961-1990 sur CD-Rom, Version 3.0F*. Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique, Downsview, ON.

ÉTUDE PAN-CANADIENNE. 1999. *Impacts et adaptation à la variabilité et au changement du climat au Québec*. Tome V. http://www.ec.gc.ca/climate/ccs/que_resume.htm.

LARCHER, W. 1980. *Physiological plant ecology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 303 pages.

PAQUIN, R. 1977. *Effets des basses températures sur la résistance au gel de la luzerne (Medicago media Pers.) et son contenu en proline libre*. *Physiol. Vég.* 15 : 657-665.

PAQUIN, R. 1984. *Influence of the environment on cold hardening and winter survival of forage plants and cereals : proline as a metabolic marker of hardening*. Pages 137-154 dans N.S. Margaris, M. Arianoustou-Faraggitaki et W.C. Oechel (Eds.). *Being alive on land*. Dr. W. Junk, Pub. Kluwer Academic Publishers Group, Boston.

PAQUIN, R. et G.R. MEHUYS. 1980. *Influence of soil moisture on cold tolerance of alfalfa*. *Can. J. Plant Sci.* 60 : 1351-1366.

ROCHETTE, P. et P.-A. DUBÉ. 1993a. *Zonage du risque agroclimatique durant la saison froide au Québec méridional : I- Froid hivernal*. Clim. Bull. 27(2) : 45-62.

ROCHETTE, P. et P.-A. DUBÉ. 1993b. *Zonage du risque agroclimatique durant la saison froide au Québec méridional : II- Endurcissement, déchaussement et prise des racines dans la glace*. Clim. Bull. 27(3) : 96-116.

SAKAI, A. et W. LARCHER. 1987. *Frost survival of plants*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg and New York. 321 pages.

SIMONS, R.K. et C.C. DOLL. 1976. *Morphological and anatomical response of apples to a late spring frost in relation to stage of fruit development*. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 101 : 315-320.

WARRICK, R.A. 1998. *Carbon dioxide, climate change and agriculture*. The Geographical Journal. 154 : 221-233.