

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR L'AGRICULTURE AU QUÉBEC : QUELLES OPPORTUNITÉS  
POUR LES PRODUCTIONS VÉGÉTALES

ESSAI

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR

LAURENCE MARINIER

NOVEMBRE 2023

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce document diplômant se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév. 04-2020). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

## REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier Éric Pineault, mon tuteur à la maîtrise, qui m'a dirigé dans cet essai et tout au long de mon parcours. Je souhaite aussi souligner la contribution du corps professoral et des étudiants qui ont su alimenter mes réflexions et stimuler mon esprit critique au travers de nos échanges.

Un grand merci également au personnel de l'Institut des sciences de l'environnement (ISE), plus particulièrement à Catherine Chartré et à Annie Letendre, pour leur gentillesse et leur support, ainsi qu'aux intervenants des Services étudiants de l'UQAM qui m'ont apporté une aide indispensable durant mes études.

Je tiens évidemment à témoigner toute ma reconnaissance à mes parents, qui ont été présents dans les hauts et les bas, mais qui n'ont jamais cessé de m'encourager et de croire en moi. Aussi, un immense merci à mes ami(e)s ainsi qu'à mon copain, Raphaël, qui m'ont accompagné durant cette grande aventure qu'est la maîtrise. Votre écoute, votre présence et votre folie ont été une source de motivation inestimable.

Enfin, je souhaite faire une mention spéciale aux cafés du quartier Villeray, plus particulièrement le Oui mais non et le Perko, qui m'ont servi les meilleurs *cortado* à l'avoine et qui sont quasiment devenus ma deuxième maison durant la rédaction de cet essai.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ii
TABLE DES MATIÈRES.....	iii
LISTE DES FIGURES.....	v
LISTE DES TABLEAUX.....	vi
LISTE DES SIGLES, DES SYMBOLES ET DES UNITÉS.....	1
RÉSUMÉ.....	1
INTRODUCTION .....	2
CHAPITRE 1 MISE EN CONTEXTE.....	4
1.1 Géographie du territoire .....	4
1.2 Climat du Québec .....	6
1.3 Portrait de l'agriculture.....	8
1.3.1 Présentation du secteur .....	8
1.3.2 Principales tendances et caractéristiques.....	10
1.3.3 Productions agricoles.....	11
1.4 Influence du climat sur l'agriculture .....	14
CHAPITRE 2 CADRE DE L'ESSAI .....	16
2.1 Méthodologie .....	16
2.2 Incertitudes liées aux projections.....	18
CHAPITRE 3 LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES À PRÉVOIR AU QUÉBEC.....	21
3.1 Température.....	21
3.1.1 Températures moyennes, saisonnières et extrêmes.....	21
3.1.2 Indices thermiques.....	23
3.2 Précipitations.....	25
3.2.1 Précipitations moyennes, saisonnières et extrêmes .....	25
3.2.2 Phénomènes liés aux précipitations .....	28
3.3 La neige .....	29
3.3.1 Équivalent en eau de la neige.....	30
3.3.2 Durée de l'enneigement.....	31
CHAPITRE 4 OPPORTUNITÉS AGRICOLES EN CLIMAT MODIFIÉ.....	32
4.1 Amélioration du rendement de certaines cultures .....	32

4.2	Diminution des risques et dommages pour les arbres fruitiers .....	33
4.3	Expansion de la production agricole vers le nord.....	34
4.4	Introduction de nouvelles cultures et variétés.....	36
4.5	Position concurrentielle favorisée .....	37
CHAPITRE 5 DISCUSSION SUR LE POTENTIEL AGROCLIMATIQUE FUTUR .....		38
5.1	Autres impacts causés par les changements climatiques .....	38
5.2	Limites à l'expansion du territoire agricole.....	41
5.3	L'adaptation.....	41
5.4	Nouvelles réalités agricoles.....	42
CONCLUSION .....		44
RÉFÉRENCES .....		45

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Carte topographique du Québec (Ressources naturelles Canada, 2002).....	4
Figure 1.2 Températures et précipitations observées pour la période 1961-1990 au Québec et en périphérie (Berteaux, 2014b).....	6
Figure 1.3 Carte des différents climats du Québec selon la classification de Koppen-Geiger basée sur les normales de 1961-2010 (MELCC, 2022). ....	8
Figure 1.4 Carte de la zone agricole du Québec (CPTAQ, 2021).....	9
Figure 1.5 Distribution des recettes totales générées par les principales productions animales (données de 2019, tirées de MAPAQ,2020d).....	12
Figure 1.6 Distribution des recettes totales générées par les principales filières végétales (données de 2019, tirées de MAPAQ,2020d). ....	13
Figure 2.1 Carte des quatre zones de références utilisées dans ce document (Ouranos, 2015). ....	17
Figure 3.1 Températures moyennes annuelles (ANN) observées pour la période 1971-2000 et projetées pour l’horizon 2050 (2041-2070) avec un scénario d’émission élevé (RCP 8.5) (Ouranos, 2015). ....	22
Figure 3.2 Précipitations totales annuelles observées pour la période 1971-2000 et projetées pour l’horizon 2050 (2041-2070) à partir de RCP 8.5 (Ouranos, 2015).....	26
Figure 3.3 Maximum de l’équivalent en eau de la neige (EENmax) entre février et mai observé pour la période 1971-2000 et projeté pour l’horizon 2050 (2041-2070) à partir du RCP8.5. La moyenne observée est calculée à partir des données interpolées d’Hydro-Québec (Tapsoba et al., 2005). Les cartes futures présentent la médiane de l’ensemble ainsi que les 10e et 90e percentiles de 22 scénarios climatiques futurs. Les scénarios climatiques futurs ont été produits à partir de l’ensemble CMIP5 (RCP8.5) (Ouranos, 2015). ....	30
Figure 3.4 Durée de l’enneigement observée pour la période 1999-2010 et projetée pour l’horizon 2050 (2041-2070) à partir du RCP 8.5. La moyenne observée est calculée à partir des données IMS 24 (National Ice Center, 2008). Les cartes futures présentent la médiane de l’ensemble ainsi que les 10e et 90e percentiles de 19 scénarios climatiques futurs. Les scénarios climatiques futurs sont basés sur l’ensemble CMIP5 (RCP8.5) (Ouranos, 2015).....	31
Figure 4.1 Cartes des normales 1971-2000 du cumul des unités thermiques maïs (UTM) et scénarios de changement inférieur (10e percentile) et supérieur (90e percentile) pour l’horizon 2041-2070 vs 1971-2000 (Tiré de l’Atlas agroclimatique du Québec, 2012). ....	35

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Évolution de la structure des fermes québécoise, de 1986 à 2016 (compilation de Statistique Canada, 2017a, 2022a) .....	10
Tableau 2.1 Résumé des principales caractéristiques des scénarios RCP (Ouranos, 2015).....	18
Tableau 3.1 Sommaire des valeurs observées pour la période 1971-2000 (moyenne ( $\mu$ ) et écart-type ( $\sigma$ )) et changements relatifs projetés des températures moyennes pour les quatre régions d'intérêt à l'horizon 2050 (2041 à 2070) selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5. Le tableau présente les valeurs annuelles (ANN) et saisonnières : décembre, janvier, février (DJF); mars, avril, mai (MAM); juin, juillet, août (JJA); et septembre, octobre, novembre (SON). L'intervalle dans les résultats projetés indique les 10e et 90e percentiles des simulations climatiques (n = 33 RCP 4.5; n = 29 RCP 8.5 de CMIP5) (modifié de Ouranos, 2015). .....	23
Tableau 3.2 Résumé des changements projetés à l'horizon 2050 (période 2041-2070) des principaux indicateurs thermiques utilisés en agriculture (compilation d'après : <i>Atlas agroclimatique du Québec</i> , 2012 ; Lepage <i>et al.</i> , 2012 ; Logan <i>et al.</i> , 2011 ; Rapaic, 2012 ; Rochette <i>et al.</i> , 2004). .....	25
Tableau 3.3 Sommaire des valeurs observées pour la période 1971-2000 (moyenne ( $\mu$ ) et écart-type ( $\sigma$ )) et changements relatifs projetés des précipitations totales pour les quatre régions d'intérêt pour l'horizon 2050 (2041 à 2070). Les résultats sont présentés pour les saisons : annuel (ANN); décembre, janvier, février (DJF); mars, avril, mai (MAM); juin, juillet, août (JJA); et septembre, octobre, novembre (SON) L'intervalle dans les résultats projetés indique les 10e et 90e percentiles des simulations climatiques (n = 33 RCP 4.5; n = 29 RCP 8.5 de CMIP5) (tiré d'Ouranos, 2015). .....	27

## **LISTE DES SIGLES, DES SYMBOLES ET DES UNITÉS**

°C	Degré Celsius
CO <sub>2</sub>	Dioxyde de carbone
EEN	Équivalent en eau de la neige
EENmax	Enneigement maximum
GES	Gaz à effet de serre
Km	Kilomètres
mm	Millimètres
RCP	Representative Concentration Pathway
T	Température
UTM	Unités thermiques maïs

## RÉSUMÉ

En raison de son étroite relation avec le climat, l'agriculture sera l'un des secteurs les plus touchés par les changements attendus au cours des prochaines décennies. Les productions végétales seront particulièrement affectées compte tenu de leur forte vulnérabilité aux variations climatiques. Au Québec, les effets du réchauffement sont déjà perceptibles, et on projette que ces changements se maintiendront, voire s'intensifieront au cours du siècle. Parmi les impacts attendus, certains amèneront des défis, tandis que d'autres offriront des bénéfices au secteur. L'objectif de cet essai est de réaliser une synthèse critique des opportunités agricoles qui découleront des changements climatiques à venir au Québec, en se concentrant sur les productions végétales. Une revue de littérature a permis de saisir l'ampleur des modifications climatiques projetées à moyen terme l'échelle de la province, puis de cerner les effets sur les cultures et d'en faire ressortir les bénéfices potentiels. Le portrait des changements climatiques du Québec présenté dans ce travail se concentre sur les trajectoires à l'horizon 2050 (période 2041-2070) des différents indices de températures, de précipitations et de neige, ainsi que des principaux indicateurs agroclimatiques, pour les scénarios RCP4.5 (modéré) et RCP8.5 (élevé). Parmi les changements anticipés, le réchauffement des températures provoquera de nombreuses possibilités pour les agriculteurs. D'abord, l'allongement de la saison de croissance, combinée à une hausse des cumuls de chaleur sera favorable à la productivité de plusieurs cultures comme le maïs, le soya et certaines espèces fourragères telles que la fléole des prés et la luzerne. L'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique contribuera aussi à l'accroissement des rendements. Puis, des conditions globalement plus douces durant les saisons froides diminueront les risques de dommages aux arbres fruitiers. Des températures plus élevées permettront également d'étendre la production agricole vers le nord ainsi que d'introduire de nouvelles cultures et variétés. En somme, la position concurrentielle du Québec sera favorisée en regard des projections, notamment pour le secteur de la pomme et du maïs-grain. Bien que les projections semblent positives, le potentiel agroclimatique du Québec pourrait s'avérer différent en réalité. Il faut considérer qu'il existe une multitude d'autres facteurs pouvant influencer la capacité des agriculteurs à tirer profit des changements climatiques, tels que l'évolution réelle du climat, l'ampleur des impacts négatifs, les stratégies d'adaptation et le contexte socio-économique futur.

Mots-clés : Changements climatiques, climat, agriculture, impacts, opportunités, productions végétales, cultures, adaptation, Québec.

## INTRODUCTION

Des écrits scientifiques de plus en plus abondants fournissent des preuves que le réchauffement climatique se poursuivra au cours du siècle et gagnera même en importance. Dans l'un de ses derniers rapports, le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) conclut qu'à moins que des efforts majeurs soient rapidement mis en place pour réduire les émissions globales de gaz à effet de serre (GES), il sera impossible de limiter le réchauffement climatique en dessous de 2 degrés Celsius (°C), tel que visé par l'Accord de Paris (Allan *et al.*, 2021). Quel que soit le scénario d'émission de GES, la température globale augmentera d'au moins 1,5 °C au cours des vingt prochaines années.

Les changements climatiques touchent déjà toutes les régions du monde, mais de façons variées (Allan *et al.*, 2021). Au Québec, on observe depuis plusieurs années que les températures se réchauffent et que les précipitations sous forme de pluie augmentent, principalement dans le sud du Québec (Mekis et Vincent, 2011 ; Vincent *et al.*, 2012). Par ailleurs, la quantité de neige diminue de plus en plus pendant l'hiver et la durée de l'enneigement montre une régression de quelques jours voire même de quelques semaines dans le nord du Québec (Brown, 2010 ; Tapsoba *et al.*, 2005). On prévoit que ces modifications se poursuivront, et même, s'intensifieront dans le futur, d'autant plus qu'en raison de sa position nordique, le Québec sera davantage touché par le réchauffement du climat que d'autres régions du monde (Bush et Lemmen, 2019).

Ces bouleversements provoqueront de nombreux impacts, tant dans les écosystèmes physiques qu'humains (Pörtner *et al.*, 2022). L'agriculture sera l'un des secteurs économiques les plus touchés compte tenu de son étroite relation avec l'environnement et de sa sensibilité aux aléas climatiques (Ouranos, 2015). En effet, le climat est un des éléments les plus déterminants pour la production agricole et plus spécifiquement pour les cultures dont la survie et la productivité sont directement liées (Ouranos, 2015). Au Québec, on projette que certains de ces effets seront dommageables tandis que d'autres seront bénéfiques pour les productions végétales (Bélanger et Bootsma, 2002). Par conséquent, il est possible d'exploiter les avantages offerts par ce futur contexte climatique. Anticiper ces gains est un moyen d'augmenter la résilience du secteur face au dérèglement du climat (Ouranos, 2015). Ainsi, l'objectif de cet essai est de répondre à la question suivante : quelles opportunités agricoles seront offertes par les changements climatiques dans les décennies à venir au Québec?

Pour se faire, cinq chapitres divisent ce travail. Le premier sert de mise en contexte et survole les principales caractéristiques du territoire québécois, de son climat ainsi que de sa production agricole pour

ensuite présenter la problématique. Le deuxième chapitre détaille le cadre de l'essai, soit la méthodologie employée et les limites liées aux projections climatiques. Le chapitre suivant brosse un portrait des changements attendus au Québec à moyen terme, en se basant sur les trajectoires des variables climatiques les plus utilisées en agriculture, soit les températures, les précipitations et la neige. Le quatrième chapitre présente les principales opportunités agricoles qui se présenteront sous un climat modifié. Enfin, la dernière section met en perspective le potentiel réel de ce futur contexte agroclimatique en discutant des limites et conditions liées à l'atteinte de ces bénéfices et mentionne les nouvelles dynamiques qui émergeront au sein du secteur.

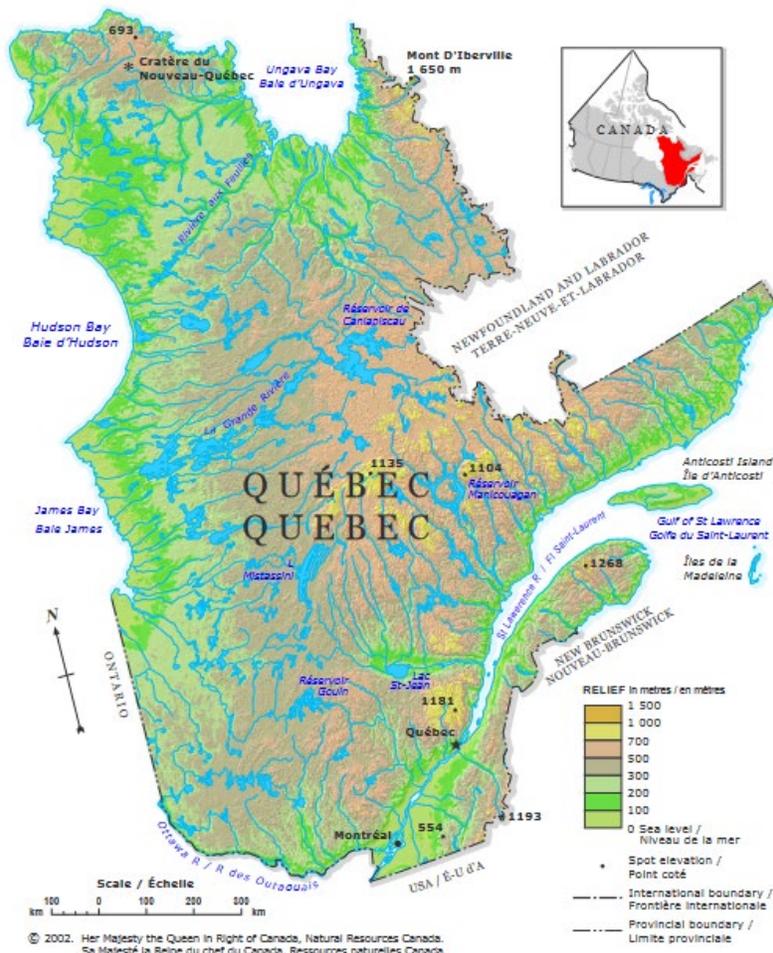
# CHAPITRE 1

## MISE EN CONTEXTE

### 1.1 Géographie du territoire

Situé à l'est du continent nord-américain, entre les 45 et 62 degrés de latitude nord, le Québec est reconnu pour l'immensité de son territoire (Gouvernement du Québec, 2022). Couvrant une superficie d'environ 1,5 million de kilomètres carrés (km<sup>2</sup>), il s'agit de la plus grande province canadienne (Couture, 2021). Le relief du territoire est globalement peu accentué, variant en moyenne entre 300 et 600 mètres d'altitude. D'une hauteur de 1 652 mètres, le mont d'Iberville est le plus haut sommet du Québec (Couture, 2021). Occupant une vaste péninsule continentale donnant sur l'océan Atlantique Nord, la province se démarque aussi par son importante façade maritime et son vaste réseau hydrographique (Gouvernement du Québec,

Figure 1.1 Carte topographique du Québec (Ressources naturelles Canada, 2002).



2022). Elle est délimitée au nord par le détroit d'Hudson et la baie d'Ungava, au nord-ouest par la baie d'Hudson et à l'est par le golfe du Saint-Laurent (voir Figure 1.1). Avec ses milliers de lacs et de rivières, sans compter l'important fleuve Saint-Laurent qui traverse son territoire sur plus de 1200 km, le Québec jouit d'une grande richesse en eau douce (Gouvernement du Québec, 2022). À lui seul, il détiendrait près de 3 % des réserves mondiales, dont près de 40 % se concentrent dans le bassin hydrographique du Saint-Laurent (MELCC, 2023).

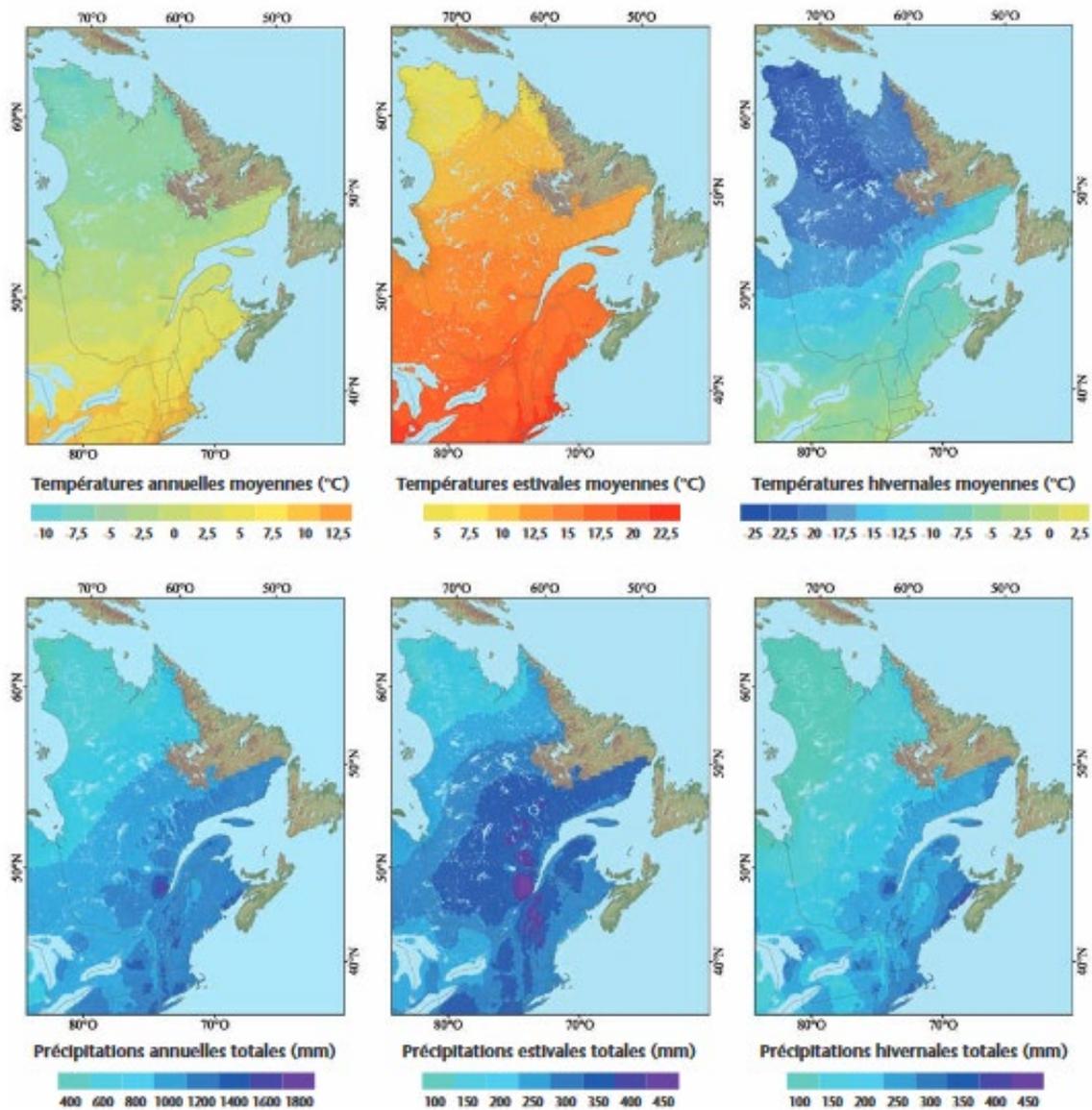
Le territoire du Québec se divise en trois grandes régions physiographiques. Le Bouclier canadien est la plus grande d'entre elles : elle couvre toute la portion septentrionale du St-Laurent et représente plus de 80% du Québec (Behiels, 2020). Le nord de cette région est caractérisé par des conditions rigoureuses qui laissent place à une végétation de taïga et de toundra où le sol est continuellement gelé. Le sud du bouclier est constitué de la chaîne de montagnes des Laurentides, de milliers de lacs et de rivières, et de la forêt boréale (Behiels, 2020). Reconnue pour ses ressources naturelles, cette région est toutefois peu propice à l'agriculture : on y retrouve que 5% des sols arables du Québec (Couture, 2021). Au sud du Bouclier se trouvent les Basses terres du Saint-Laurent. Avec ses plaines argileuses, il s'agit de la région la plus fertile et la plus développée de la province (Behiels, 2020). On y trouve également une forêt mixte et quelques-unes des collines montérégiennes. La troisième région, soit celle des Appalaches, est située au sud-est. Elle s'étend de la péninsule gaspésienne jusqu'à la frontière américaine et constitue le prolongement nord de la chaîne de montagnes des Appalaches (Behiels, 2020). Cette région comprend une succession de petits massifs montagneux (dont une partie des Montérégiennes), des forêts composées de conifères et de feuillus, de plateaux et de plaines propices à l'agriculture (Behiels, 2020 ; Couture, 2021).

Parmi les 8,5 millions de québécois (ISQ, 2022), la majorité habite le sud de la province. Les principales zones d'habitations sont concentrées le long du fleuve Saint-Laurent, plus spécifiquement entre les villes de Montréal et de Québec (Gouvernement du Québec, 2022 ; Joubert *et al.*, s. d.). Une forte proportion de la population habite en milieu urbain (80%), comparativement aux collectivités rurales (20%) (Behiels, 2020 ; Joubert *et al.*, s. d.). La majorité des activités économiques est également concentrée dans le sud. Cette région est caractérisée par une économie très diversifiée où les activités manufacturières et tertiaires occupent une place considérable, tandis que les autres régions dépendent directement des ressources naturelles (Behiels, 2020 ; Joubert *et al.*, s. d.). En effet, l'agriculture, la forêt, la production hydroélectrique, les mines et les industries de transformation fournissent une part importante des emplois dans le reste du Québec (Behiels, 2020 ; Joubert *et al.*, s. d.).

## 1.2 Climat du Québec

Le climat fait référence aux conditions météorologiques normalement attendues pour un territoire donné (Organisation Météorologique Mondiale, 2016). Plus spécifiquement, il correspond aux valeurs moyennes d'un ensemble des paramètres atmosphériques observés dans une région et sur une longue période, soit généralement de 30 ans selon l'Organisation Météorologique Mondiale (2016). Parmi ces nombreux éléments qui caractérisent le climat d'un territoire, on trouve par exemple, la température, les précipitations, la pression atmosphérique, l'ensoleillement et le vent. Ceux-ci peuvent être affectés autant

Figure 1.2 Températures et précipitations observées pour la période 1961-1990 au Québec et en périphérie (Berteaux, 2014b).

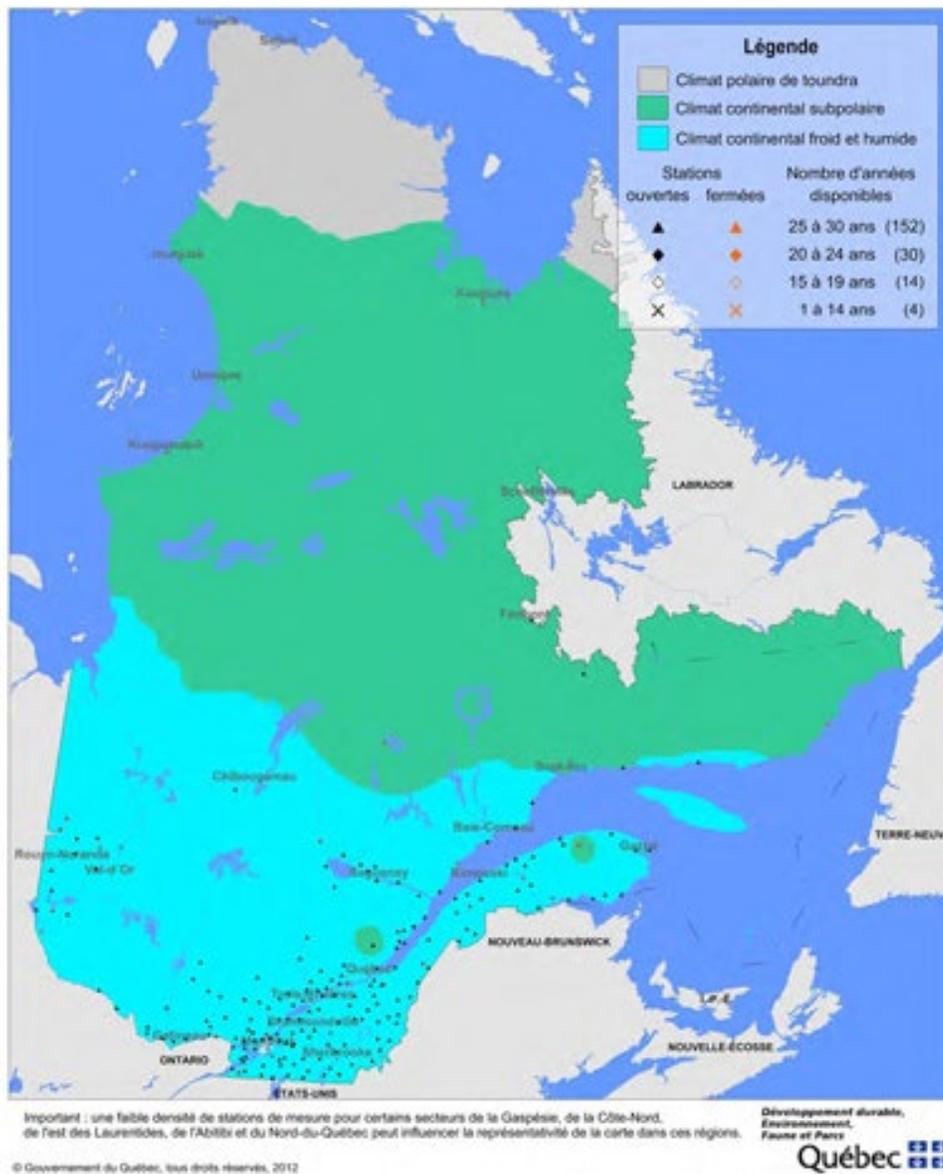


par des phénomènes cosmiques ou planétaires, comme le rayonnement solaire et l'effet de serre, que par des facteurs géographiques tels que la latitude, le relief, la continentalité ou l'influence maritime (Encyclopædia Universalis, s. d.).

Le Québec possède un climat froid et humide fortement influencé par sa position nordique et maritime. En effet, la majeure partie de la province reçoit des précipitations abondantes tout au long de l'année et la température moyenne y demeure annuellement près de  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  (MELCC, 2022). Toutefois, en raison de la grandeur du territoire, ces indices varient largement d'un endroit à l'autre. En effet, le climat du Québec est caractérisé par des écarts de températures importants entre les différentes latitudes : les températures moyennes annuelles varient d'environ  $-10$  à  $7,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  du nord au sud (Berteaux *et al.*, 2014b). Il existe aussi un écart marqué des précipitations entre les régions : elles sont considérables dans le sud-est et diminuent graduellement vers le nord-ouest. Par exemple, les précipitations de pluie et de neige totalisent plus de 1 000 millimètres (mm) annuellement dans les régions maritimes et atteignent à peine 500 mm dans le nord (Berteaux *et al.*, 2014b). À cela s'ajoutent d'importants contrastes entre les saisons, typiques d'un climat continental. Ainsi, pour une même région, on note un écart des températures moyennes de près de  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  entre l'hiver et l'été (voir figure 1.2) (Berteaux *et al.*, 2014b).

Ainsi, l'immensité du territoire québécois permet à plusieurs climats de coexister (voir figure 1.3). Selon la classification de Köppen-Geiger, au sud se trouve un climat continental humide, avec des saisons bien définies, des précipitations abondantes tout au long de l'année et des étés tempérés (MELCC, 2022). Dans cette zone climatique, la température moyenne annuelle est de  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ , environ  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$  en juillet et  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  en janvier. Notons qu'à l'est, la proximité du Saint-Laurent crée un climat plus maritime, ce qui adoucit les températures et augmente les précipitations, surtout dans les régions montagneuses. Au centre, le climat subpolaire présente des conditions assez similaires, mais avec des étés plus courts et plus frais ainsi que des précipitations moins importantes. Alors que la température moyenne annuelle dans cette région est de  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ , juillet et août sont les deux seuls mois au cours desquels la température moyenne dépasse les  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Enfin, le nord du Québec est propre au climat polaire, caractérisé par des conditions rigoureuses très froides et sèches et par une courte saison de dégel. La température moyenne annuelle dans cette région se situe autour de  $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$  et demeure sous le point de congélation huit mois par année, soit d'octobre à mai (MELCC, 2022).

Figure 1.3 Carte des différents climats du Québec selon la classification de Koppen-Geiger basée sur les normales de 1961-2010 (MELCC, 2022).



### 1.3 Portrait de l'agriculture

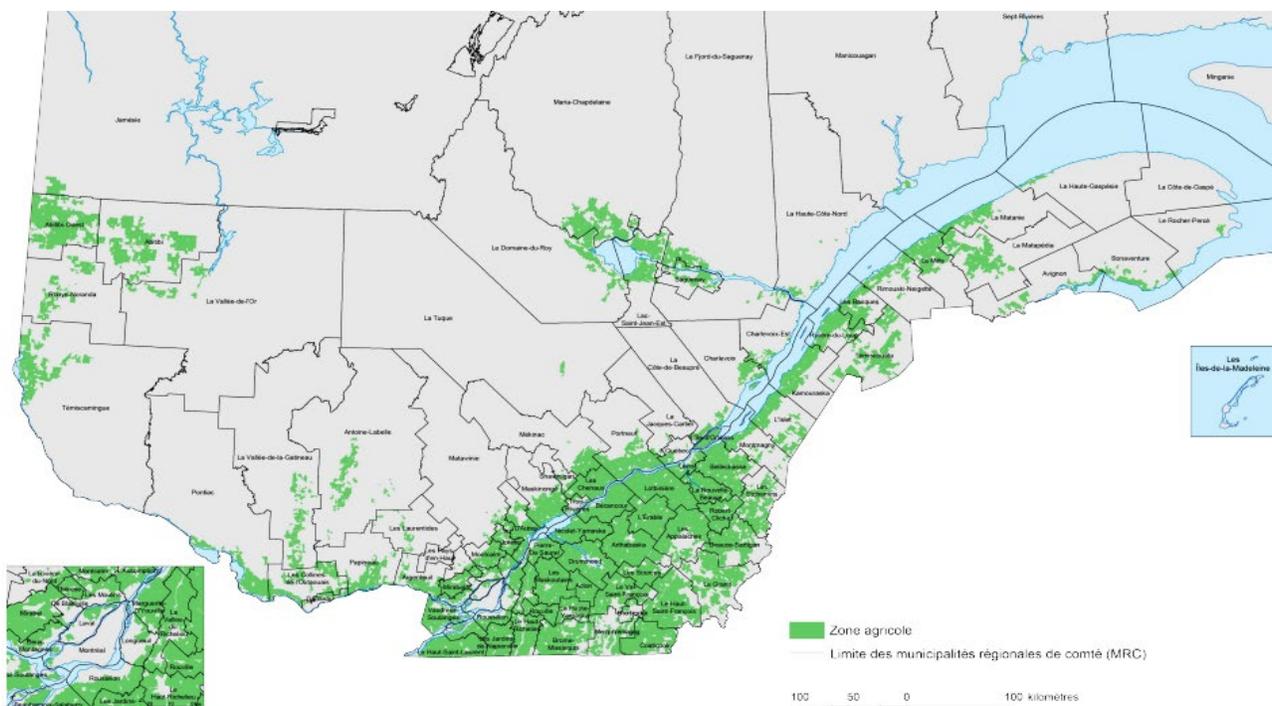
#### 1.3.1 Présentation du secteur

En plus de sa fonction nourricière, l'agriculture joue un rôle substantiel dans le développement économique et social du Québec, tout comme dans la valorisation de son territoire. Elle contribue à façonner l'identité québécoise et à faire rayonner la province sur les marchés étrangers (MAPAQ, 2013).

En 2019, avec plus de 27 300 entreprises agricoles, le secteur a généré quelque 55 400 emplois et 9,1 milliards de dollars de recettes en provenance du marché. Incluant les paiements de programmes gouvernementaux, les recettes monétaires agricoles ont atteint 9,7 milliards de dollars au total (MAPAQ, 2020c). Ainsi, ce secteur représente près de 1,2% du produit intérieur brut (PIB) du Québec (Institut de la statistique du Québec et MAPAQ, 2022).

L'écoumène agricole du Québec est assez limité, il représente environ 2% du territoire. En 2021, la superficie des terres utilisées pour l'agriculture était estimée à 3,1 millions d'hectares dont 1,8 million était en culture (Statistique Canada, 2022b). L'agriculture est surtout pratiquée dans le sud du Québec, là où les sols et le climat sont propices aux activités (Ouranos, 2015). On y distingue trois principales régions agricoles : les basses terres du Saint-Laurent, le Saguenay et l'Abitibi (voir figure 1.4). C'est toutefois dans la vallée sur Saint-Laurent que les activités sont les plus importantes. Cette partie du Québec jouit des meilleurs sols et d'un climat chaud favorable au développement de l'agriculture (CPTAQ, 2007).

Figure 1.4 Carte de la zone agricole du Québec (CPTAQ, 2021).



### 1.3.2 Principales tendances et caractéristiques

La dynamique du secteur agricole québécois a beaucoup changé au fil des dernières décennies. Comme dans la plupart des pays industrialisés, le Québec s’est progressivement orienté vers un modèle productif fortement orienté vers les marchés étrangers, provoquant de profondes transformations (Ruiz et Domont, 2005).

D’une part, les activités se sont largement concentrées. En effet, la superficie agricole totale a beaucoup régressé, se traduisant par le regroupement des activités dans les régions les plus productives à proximité des grands centres, créant ainsi des bassins de production intensifs et spécialisés (Ruiz et Domont, 2005). Conséquemment, l’essentiel de l’agriculture se situe aujourd’hui dans trois régions administratives : Montérégie, Chaudière-Appalaches et Centre-du-Québec. À elles seules, elles regroupent plus de la moitié des exploitations du Québec et produisent 61% des recettes en provenance du marché (MAPAQ, 2020c). Autre phénomène intéressant : le nombre de fermes diminue tandis que leur taille augmente (voir tableau 1.1) (Ruiz et Domont, 2005). Cette statistique représente bien le fait que les exploitations de plus grande taille, généralement regroupées en société ou en corporation à plus forte intensité de capital, prennent la place des plus petites, souvent à propriétaire unique (Zombre, 2019). Ainsi, plus du tiers (40,2%) des entreprises affichaient un chiffre d’affaires supérieur à 250 000 dollars par année, encaissant à elles seules presque l’entièreté des revenus agricoles totaux (Garneau, 2019). Notons que la valeur du capital agricole (terre, bâtiments, machineries et animaux) a aussi connu une hausse marquée au cours des dernières décennies (voir tableau 1.1) (Zombre, 2019). Une ferme québécoise vaut maintenant en moyenne plus de 3 millions de dollars, soit deux fois plus que depuis le début qu’en 2010 (Boudreau, 2019).

Tableau 1.1 Évolution de la structure des fermes québécoise, de 1986 à 2016 (compilation de Statistique Canada, 2017a, 2022a)

	1986	1991	1996	2001	2006	2011	2016	Évolution
Superficie totale des fermes (millions d’hectares)	3,6	3,4	3,5	3,4	3,5	3,3	3,3	
Nombre total de ferme	41 448	38 076	35 991	32 139	30 675	29 437	28 919	
Superficie moyenne par ferme déclarante (hectares)	88	90	96	106	113	113	113	
Capital agricole total (milliards de \$)	9,4	11,9	15,1	21,5	26,5	32,8	52,1	
Valeur des terrains et des bâtiments (milliards de \$)	6,0	7,8	10,4	15,7	20,4	25,8	43,1	

D'autre part, les fermes se sont aussi spécialisées. Les pratiques sont maintenant largement standardisées et la majorité des exploitations agricoles sont orientées vers des produits de grande consommation, soit généralement dans une ou deux productions intensives (CAAQ, 2008 ; Ruiz et Domont, 2005). Cette transition s'est traduite par la croissance considérable de la superficie des terres en cultures pour y développer des productions intensives de céréales et d'oléagineux, principalement de maïs-grain et de soya, au détriment des pâturages et des cultures fourragères (Ruiz et Domont, 2005).

Les pratiques se sont également intensifiées, notamment par l'intégration des technologies et des machineries lourdes, l'usage d'intrants chimiques (pesticides, fertilisants, antibiotiques, hormones, etc.), l'entrée de nouvelles variétés de cultures plus performantes et de semences transgéniques (OGM) et l'adoption de diverses techniques culturales permettant d'optimiser l'utilisation des terres (CAAQ, 2008 ; Ruiz et Domont, 2005). La production animale s'est aussi intensifiée avec le développement de l'élevage hors-sol, sans compter que pour la majorité des exploitations, le nombre moyen d'animaux par ferme ne cesse d'augmenter (Zombre, 2019). Si ces méthodes ont permis aux exploitations d'accroître leur productivité et leurs rendements, elles ne sont toutefois pas sans impact sur l'environnement (Ruiz et Domont, 2005).

Néanmoins, depuis quelques années, on assiste à l'émergence de nouveaux modes de production (CAAQ, 2008). Ceux-ci visent entre autres la diversification de l'agriculture, la protection du territoire, le respect de l'environnement ou la valorisation des produits locaux. Bien que ces initiatives soient encore minoritaires, elles sont en forte croissance. À titre d'exemple, le nombre d'exploitations déclarant produire des produits biologiques a presque triplé en dix ans (Statistique Canada, 2017c, 2022c). Par ailleurs, de nouvelles cultures font leur apparition et gagnent en superficie. C'est le cas notamment de la groseille, de l'argousier, de la camerise, du chanvre et du houblon (Keable, 2019b). On remarque même un regain d'intérêt pour l'entrepreneuriat agricole, cette fois, pour une agriculture diversifiée et à petite échelle (Cameron, 2021).

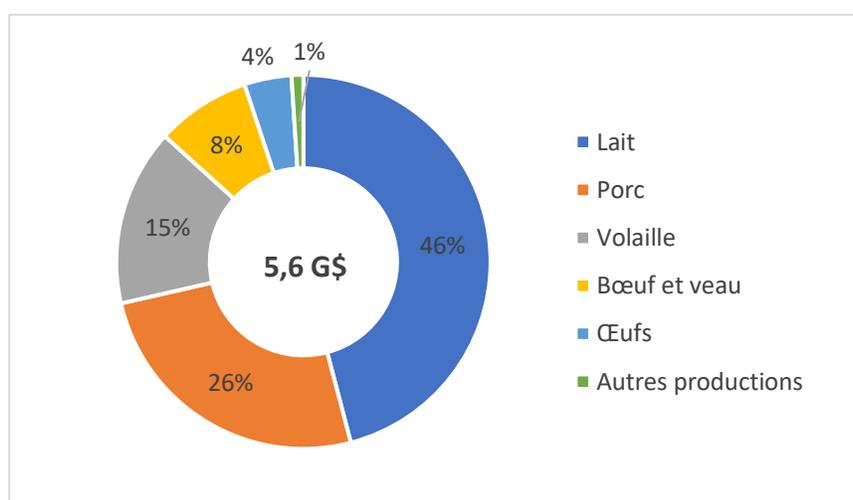
### **1.3.3 Productions agricoles**

En raison de sa position nordique, l'agriculture québécoise s'est surtout orientée vers l'élevage, tout en se diversifiant dans diverses productions végétales, majoritairement des céréales et oléagineux (CAAQ, 2008 ; Desjarlais *et al.*, 2010). En 2019, ces deux secteurs ont généré respectivement 61% et 39% de la valeur des

recettes agricoles issues du marché (MAPAQ, 2020a). Les trois principales productions québécoises sont le lait, le porc suivi par le maïs-grain (Gouvernement du Québec, 2021).

Parmi les productions animales, l'industrie laitière est de loin la plus importante, secondée par le porc, puis la volaille, le bœuf et le veau ainsi que les œufs de consommation (voir figure 1.5) (MAPAQ, 2020d). Notons que toutes les régions agricoles du Québec pratiquent l'élevage, particulièrement là où le climat est plus frais et limitant pour les cultures (Jobin *et al.*, 2004).

Figure 1.5 Distribution des recettes totales générées par les principales productions animales (données de 2019, tirées de MAPAQ,2020d).

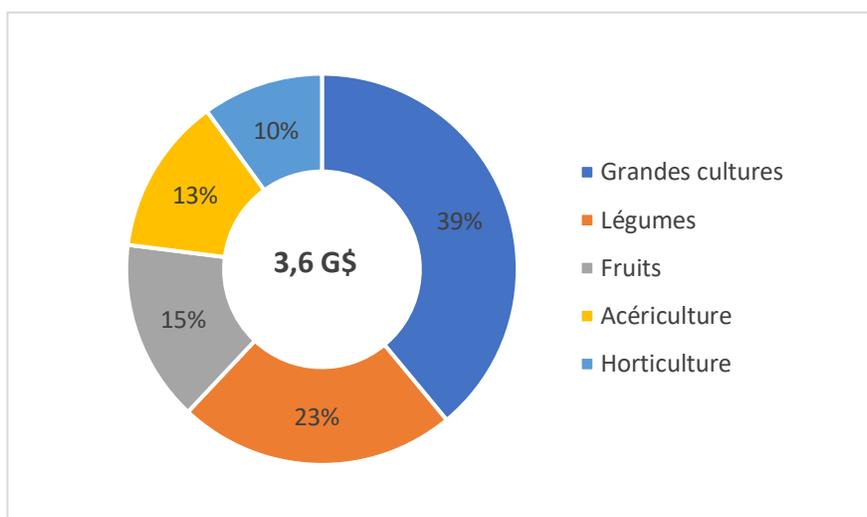


Parmi les différentes productions végétales, on distingue cinq filières (voir figure 1.6). La première est celle des grandes cultures (MAPAQ, 2020d). Elle englobe une importante variété de céréales, oléagineux et protéagineux qui occupent une part considérable des superficies totales cultivées (Statistique Canada, 2017b). Le maïs-grain et le soya dominant, suivis par les petites céréales comme le blé, l'orge et l'avoine, et le canola (MAPAQ, 2020b).

Notons que la production de plantes fourragères est aussi très populaire au Québec. Elle regroupe les cultures destinées à l'alimentation animale telles que le foin, le maïs d'ensilage ainsi que les pâturages (ensemencés et naturels) et est souvent considérée dans les grandes cultures. Le foin représente à lui seul plus de 35% des terres en cultures au Québec, ce qui en fait la principale production végétale en termes de superficie (Statistique Canada, 2017b).

En seconde place se trouvent les cultures maraichères (MAPAQ, 2020d). On compte une variété de plus de 70 espèces de légumes de champs telles que le maïs, les pois, les haricots, les laitues, la carotte, les choux, l'oignon et le brocoli (Gouvernement du Québec, 2021). La production est surtout située près des grands centres de consommation et dans les zones où les conditions pédoclimatiques sont les plus favorables à la culture, notamment sur les terres noires au sud de Montréal (MAPAQ, 2017, 2018, 2019 ; Statistique Canada, 2019). Dans une moindre mesure, le Québec produit aussi quelques légumes en serre, soit principalement la tomate, suivie par le concombre, la laitue et le poivron (Gouvernement du Québec, 2021).

Figure 1.6 Distribution des recettes totales générées par les principales filières végétales (données de 2019, tirées de MAPAQ,2020d).



Pour ce qui est des cultures fruitières, la pomme, le raisin ainsi que plusieurs petits fruits comme le bleuets, la fraise, la framboise et la canneberge sont les principales productions (Gouvernement du Québec, 2021). La majorité des exploitations sont situées en Montérégie et dans les régions entourant les grands centres. Préférant les climats frais, la culture du bleuets fait exception à la règle puisque l'essentiel de la production se trouve au Saguenay-Lac-Saint-Jean (Gouvernement du Québec, 2021).

Le Québec est aussi reconnu pour sa production acéricole. Premier producteur mondial, la province fournit en moyenne 71 % de toute la production de sirop d'érable (Gouvernement du Québec, 2021). Le sirop d'érable fait d'ailleurs partie de l'identité culturelle et gastronomique du Québec. On compte plus de 8 000

acériculteurs, principalement situés dans les régions au sud du fleuve Saint-Laurent (Gouvernement du Québec, 2021).

Une dernière filière importante est celle de l'horticulture ornementale. On distingue quatre spécialités, soit la culture en serre (fleurs annuelles, plants de légumes, fines herbes, plantes vertes et fleuries et plantes vivaces), les pépinières (arbres, arbustes, conifères, rosiers, plantes grimpantes et plantes vivaces), les gazonnières (gazon en plaques) et la culture des arbres de Noël. Les quelque 1 100 entreprises horticoles québécoises sont principalement situées en périphérie de Montréal (Gouvernement du Québec, 2021).

#### **1.4 Influence du climat sur l'agriculture**

L'agriculture est l'un des secteurs économiques les plus dépendants du climat. Ce dernier a des impacts sur l'élevage, notamment par le biais des ressources alimentaires et des événements de températures extrêmes, mais influence davantage les cultures qui sont directement affectées par les conditions environnementales et leurs variations (Ouranos, 2015). Leur développement, leur répartition et leur productivité sont directement impactés.

En effet, les plantes ont besoin d'un ensemble de conditions climatiques spécifiques (luminosité, température, précipitations, humidité, etc.) pour croître, sans quoi, elles ne peuvent se développer convenablement (Hatfield *et al.*, 2011). Par conséquent, la répartition des espèces est largement dépendante de ces conditions. Parmi tous les facteurs naturels, le climat est d'ailleurs celui qui affecte le plus la régionalisation des plantes, tant naturelles que cultivées (Berteaux *et al.*, 2014a). Ainsi, les producteurs choisiront les espèces et les variétés les mieux adaptées aux conditions climatiques de leur région, en se basant par exemple, sur différents indicateurs agroclimatiques tels que la saison de croissance et le degré-jour (Lepage *et al.*, 2012). Cela explique en grande partie pourquoi on trouve au Québec de grandes superficies de plantes fourragères et de petites céréales, qui sont plus adaptées à une période végétative courte et un climat frais, tandis que les cultures plus exigeantes en chaleur, telles que le maïs et le soya, sont concentrées dans les régions au sud (CAAQ, 2008 ; Desjarlais *et al.*, 2010).

La productivité des cultures est également très sensible à la variation naturelle du climat (Lobell et Gourdjji, 2012). Par exemple, une année caractérisée par des précipitations abondantes ou des températures plus élevées que la normale peut causer des baisses de rendements ou affecter la qualité des récoltes. Une

étude estime que globalement, les variations climatiques interannuelles sont responsables du tiers des fluctuations de rendements observés (Ray *et al.*, 2015). Les événements extrêmes comme des épisodes de verglas, les sécheresses et les tempêtes peuvent aussi être dévastateurs et occasionner de graves pertes aux agriculteurs (Ouranos, 2015). Un regard sur les indemnités versées par les assurances-récolte permet de bien saisir l'importance des dommages causés par les aléas climatiques à travers le temps (Desjarlais *et al.*, 2010). Pour toutes ces raisons, les conditions climatiques sont plus que déterminantes pour les cultures.

Au Québec, plusieurs changements ont d'ailleurs déjà été observés au cours des dernières décennies, comme l'allongement de la saison de croissance, l'augmentation des cumuls de chaleur et un devancement de la phénologie printanière (Qian *et al.*, 2010, 2012). En regard des modifications climatiques futures, il devient pertinent de s'intéresser à la façon dont sera affecté le secteur agricole, d'autant plus que ces changements sont amenés à s'intensifier (Bootsma *et al.*, 2005a). Selon les projections, on peut s'attendre à des effets tant positifs que négatifs (Bélanger et Bootsma, 2002). Orienter l'attention vers les bénéfices est une occasion de tirer profit des modifications climatiques et de soutenir la résilience du secteur face au dérèglement du climat global (Ouranos, 2015).

## CHAPITRE 2

### CADRE DE L'ESSAI

#### 2.1 Méthodologie

Cet essai constitue une synthèse critique des possibilités agricoles induites par les changements climatiques. Il cherche à répondre à la question suivante : parmi les impacts occasionnés par la modification du climat, quelles opportunités s'offriront aux cultivateurs du Québec au cours des prochaines décennies? La méthodologie adoptée pour accomplir cet objectif prend la forme d'une revue de littérature qui a permis de dresser un portrait des tendances climatiques futures pour le Québec, puis de cerner leurs effets sur l'agriculture et d'en faire ressortir les bénéfices potentiels.

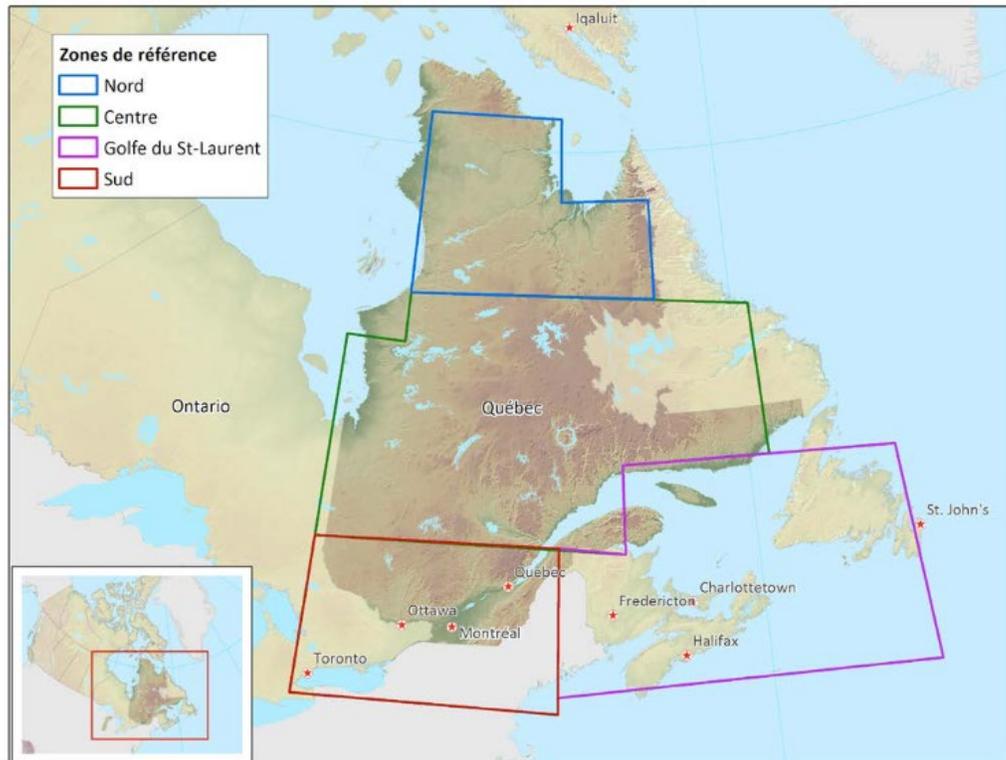
Quelques éléments méthodologiques ont cadré la rédaction de ce travail. D'abord, certaines productions végétales ont été exclues des cultures à l'étude. C'est le cas des productions en serre, puisqu'elles sont soumises à des conditions environnantes contrôlées et ne sont donc aucunement influencées par les modifications du climat dont il est question dans ce travail. C'est aussi le cas des cultures ornementales, dont la production est assez marginale. Enfin, l'acériculture a également été écartée des cultures à l'étude puisqu'elle appartient davantage aux écosystèmes forestiers qu'agricoles.

Ensuite, il importe de mentionner que les informations relatives à l'évolution climatique du Québec et des impacts sur la production agricole (chapitres 3, 4 et 5) sont en grande partie inspirées du dernier rapport d'Ouranos (2015), qui constitue une des synthèses les plus récentes et les plus exhaustives à ce sujet. L'organisme regroupe un ensemble de chercheurs, de praticiens, d'experts et de décideurs issus de différents milieux est considéré comme une référence importante en matière de changement climatique et d'adaptation régionale (Ouranos, 2022). Il faut toutefois mentionner que la recherche au Québec ne se limite pas qu'aux travaux d'Ouranos et c'est pourquoi d'autres sources sont également présentées dans ce travail.

Étant donné l'immensité du territoire québécois et la diversité de ses climats, l'information contenue dans cet essai sera divisée en quatre grandes régions : Nord, Centre, Golfe du Saint-Laurent et Sud. Il s'agit du même découpage que celui utilisé dans les travaux d'Ouranos (voir figure 2.1). Cette structure permet d'associer plus facilement les résultats d'impacts aux différents environnements climatiques du Québec (Ouranos, 2015). Mentionnons que l'écoumène agricole actuelle du Québec compose l'essentiel de la

région du Sud et du Golfe ainsi qu'une partie très limitée du Centre, soit la portion située le long du Fleuve Saint-Laurent.

Figure 2.1 Carte des quatre zones de références utilisées dans ce document (Ouranos, 2015).



Ce travail s'intéresse aux impacts occasionnés par les changements climatiques à moyen terme. Pour cette raison la période 2041-2070 (horizon 2050) a été priorisée. Ce choix repose principalement sur le fait que les simulations climatiques basées sur cet horizon sont largement répandues dans la littérature. Par ailleurs, il s'agit d'une période relativement proche du moment où nous vivons actuellement ce qui permet d'envisager plus facilement ces changements. Dans les cas où aucun résultat n'était disponible pour cette période, les données d'études s'appuyant sur d'autres horizons sont mises de l'avant.

Par ailleurs, les projections climatiques présentées dans cet essai sont basées sur les scénarios de la gamme RCP (*Representative Concentration Pathway*). Bien qu'il ne s'agisse pas de la mouture la plus récente, les résultats de simulations issues des trajectoires RCP, à la base du 5<sup>e</sup> cycle d'évaluation du GIEC (2014), sont plus abondants dans la littérature, notamment dans les études sur le Québec, que ceux basés

sur la nouvelle gamme de scénarios SSP (*Shared socio-economic pathways*), utilisée dans le 6<sup>e</sup> cycle d'évaluation (2023). Les RCP sont nommés selon leur forçage radiatif total prévu à la fin du siècle (en W/m<sup>2</sup> autour de l'an 2100) en fonction des trajectoires des quatre principaux facteurs d'influence, soit les émissions de GES, la concentration de GES, les émissions de polluants atmosphériques et l'utilisation des terres (van Vuuren *et al.*, 2011). Au total, quatre profils RCP ont été développés : 2.6, 4.5, 6.0 et 8.5. Le tableau 2.1 résume leur trajectoire, leur contenu en CO<sub>2</sub> et présente les températures projetées en 2100 ainsi que les scénarios SRES (ancienne mouture) qui leur correspondent le plus. Pour réaliser cet essai, les résultats issus des RCP4.5 et RCP8.5 ont été ciblés. Le RCP4.5, qualifié de scénario «modéré», anticipe que les concentrations de CO<sub>2</sub> se stabiliseront vers la fin du siècle si des mesures d'atténuation sont mises en place pour limiter le réchauffement climatique, tandis que le RCP8.5, considéré comme scénario «élevé», suppose une hausse constante des concentrations de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère vers 2100 ce qui conduira aux plus fortes augmentations de température (van Vuuren *et al.*, 2011). Ce choix repose, d'une part, sur la disponibilité de l'information relative à ces deux scénarios. D'autre part, puisqu'il n'existe encore aucune certitude sur la probabilité de ces trajectoires (Collins *et al.*, 2013), l'utilisation de deux scénarios divergents permet de tenir compte de cette plage d'incertitude.

Tableau 2.1 Résumé des principales caractéristiques des scénarios RCP (Ouranos, 2015).

Nom	Forçage radiatif vers 2100 (W/m <sup>2</sup> )	Évolution	Équivalent CO <sub>2</sub> (ppm)	Réchauffement moyen global vers 2100 p/r 1850 (°C)	Équivalent SRES approximatif (en termes de changement de température globale)
<b>RCP8.5</b>	8.5	Émissions fortes et continues	1370	4.9	<b>A1FI</b>
<b>RCP6.0</b>	6.0	Stabilisation sans dépassement	850	3.0	<b>B2</b>
<b>RCP4.5</b>	4.5	Stabilisation sans dépassement	650	2.4	<b>B1</b>
<b>RCP2.6</b>	2.6	Pic avant 2050 et réduction	490	1.5	<b>Aucun</b>

## 2.2 Incertitudes liées aux projections

Étant donné la nature du sujet, les informations contenues dans ce travail doivent être interprétées avec vigilance. En effet, lorsqu'il est question de projections climatiques, trois principales sources d'incertitudes sont à considérer (Collins *et al.*, 2013). La première, telle que mentionnée dans le paragraphe précédent, concerne l'évolution des émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Nous le savons maintenant, les

activités humaines contribuent de façon importante aux émissions de GES et définiront en grande partie l'ampleur des changements climatiques au cours du siècle (Allan *et al.*, 2021). L'évolution future des émissions anthropiques est toutefois particulièrement difficile à prévoir (Collins *et al.*, 2013). Elle dépendra largement de la manière dont progresseront les sociétés, notamment au niveau des changements technologiques, de la croissance démographique et du développement socioéconomique. Les politiques d'atténuation des émissions auront aussi un grand rôle à jouer dans la diminution des niveaux mondiaux d'émissions de GES. C'est pourquoi plusieurs trajectoires ont été élaborées : ils fournissent des visions alternatives de la façon dont l'avenir pourrait se dérouler. Or, aucune probabilité n'est attachée aux différents scénarios : ils sont tous considérés comme plausibles, ce qui laisse une forte incertitude (Collins *et al.*, 2013).

Un deuxième facteur d'incertitude important provient de l'utilisation de modèles pour simuler l'évolution du climat (Collins *et al.*, 2013). Les modèles climatiques sont basés sur des équations mathématiques qui tentent de représenter les multiples composantes du système climatique et leurs interactions, tant dans le passé que dans le futur. Le système étant particulièrement complexe, il est impossible de reproduire parfaitement chaque point du système, soit parce que nous n'avons pas la capacité informatique, soit parce que la compréhension scientifique des mécanismes à l'origine de ces processus demeure incomplète. De plus, chaque modèle développé est unique. Ils diffèrent entre eux selon plusieurs facteurs : le choix du schéma numérique, le degré de simplification, la grille, le type d'échelle, etc. (Collins *et al.*, 2013). Par conséquent, ils génèrent tous des résultats différents. Ainsi, malgré le large éventail de modèles disponibles et l'avancement de la technologie, ils demeurent des outils imparfaits, tout comme les projections qu'ils fournissent (Collins *et al.*, 2013).

La dernière grande source d'incertitude à considérer est la variabilité naturelle du climat (Collins *et al.*, 2013). En effet, le système climatique est par sa nature chaotique : il fluctue largement dans le temps et d'une région à l'autre, tant à l'échelle globale que locale. Tandis qu'une partie de ces fluctuations se reproduisent de manière cyclique ou semicyclique, d'autres sont imprévisibles, comme les éruptions volcaniques ou les variations d'énergie solaire. Ainsi, la difficulté de prévoir l'évolution de certains phénomènes, combinée aux contributions humaines, rend particulièrement complexe le calcul du changement climatique futur (Collins *et al.*, 2013). C'est pour cette raison que l'Organisation météorologique mondiale (2016) recommande de couvrir une période suffisamment longue, soit plus exactement de 30 ans, pour éteindre le bruit de la variabilité interne du climat et faire émerger la

contribution des facteurs humains. Cependant, il est impossible de réduire à zéro l'incertitude relative aux fluctuations naturelles (Collins *et al.*, 2013).

Ce survol met en lumière le caractère intrinsèque de l'incertitude dans l'étude des projections climatiques. Cette notion est importante en regard des informations présentées dans ce travail. Il faut garder en tête que le portrait climatique projeté pour le Québec est incertain, tout comme les opportunités qui en découleront.

## CHAPITRE 3

### LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES À PRÉVOIR AU QUÉBEC

Pour mieux saisir quelles seront les conséquences du dérèglement climatique sur le secteur agricole et plus spécifiquement sur les productions végétales, il faut comprendre l'ampleur des changements attendus pour les prochaines décennies. Pour ce faire, ce chapitre détaille l'évolution prévue du climat québécois pour la période 2041-2070 (horizon 2050). Il présente les tendances projetées de la moyenne, de la saisonnalité et des extrêmes des principales variables qui affectent les cultures, soit la température, les précipitations et la neige ainsi que de leurs indicateurs agroclimatiques. Dans la mesure du possible, les données sont comparées en fonction des deux scénarios sélectionnés (RCP4.5 et RCP8.5) et selon les différentes régions climatiques du Québec, tel que discuté dans le chapitre précédent.

#### 3.1 Température

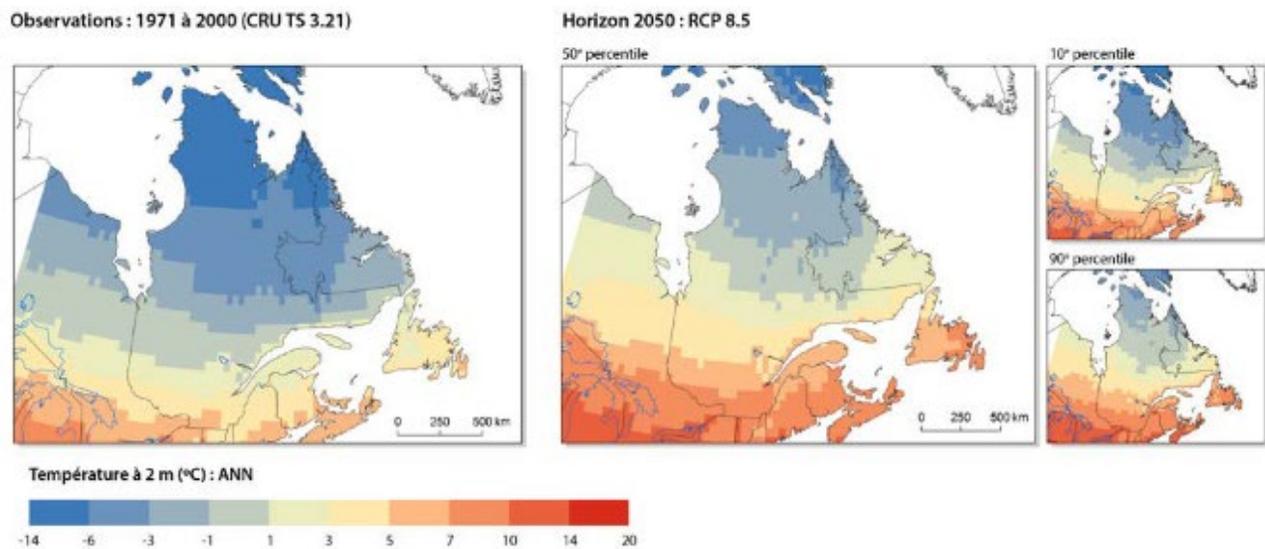
##### 3.1.1 Températures moyennes, saisonnières et extrêmes

La température est l'un des paramètres climatiques ayant le plus d'influence sur les cultures (Berteaux *et al.*, 2014a). Puisque la température contrôle le métabolisme des êtres vivants, elle a un impact direct sur la croissance et le développement des plantes. En effet, c'est seulement au sein d'une zone de températures bien définies selon chaque espèce que peuvent s'enclencher les réactions chimiques et les fonctions essentielles (Berteaux *et al.*, 2014a). De plus, la température régule la vitesse à laquelle les stades de développement sont accomplis, ce qui a une influence sur le rendement de cultures (Hatfield *et al.*, 2011 ; Lobell et Gourdjji, 2012). Par conséquent, il importe de saisir la façon dont évolueront les indices de températures au Québec pour comprendre ses impacts sur l'agriculture.

Selon les projections d'Ouranos (2015), les températures se réchaufferont partout au Québec au cours du siècle. Le tableau 3.1 présente en détail les changements relatifs projetés des températures moyennes (annuelles et saisonnières) à l'horizon 2050 (2041 à 2070) selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5. D'abord, les résultats supposent que peu importe la trajectoire, le climat se réchauffera. Cette augmentation variera toutefois selon les régions, avec des hausses plus importantes dans les hautes latitudes. Par exemple, dans le cas d'un scénario élevé, les températures annuelles moyennes augmenteront d'environ 2 à 4 °C dans les régions du Sud et du Golfe, et de 3 à 6 °C pour le Centre et le Nord du Québec. La figure 3.1 illustre bien la distribution spatiale des changements de températures projetés.

Ajoutons que ce réchauffement sera aussi perceptible dans les températures saisonnières. Selon les projections d'Ouranos (2015), la hausse la plus importante sera visible en hiver. Le nord du Québec sera davantage affecté par ces changements hivernaux, avec des températures moyennes pouvant atteindre 8 à 10 °C supplémentaires, selon le scénario d'émissions. Les modifications attendues dans les autres régions sont comparables, soit une hausse d'environ 1,5 à 6,5 °C pour l'ensemble des saisons.

Figure 3.1 Températures moyennes annuelles (ANN) observées pour la période 1971-2000 et projetées pour l'horizon 2050 (2041-2070) avec un scénario d'émission élevé (RCP 8.5) (Ouranos, 2015).



D'un point de vue temporel, les résultats d'évolution des températures moyennes simulées pour la période 1900-2100 par Ouranos (2015), projettent que le réchauffement des températures s'intensifiera avec le temps, mais sera plus grand supposant un scénario élevé. Dès la deuxième moitié du siècle, soit la période visée dans ce travail, on remarque un écart de plus en plus accentué entre les deux scénarios.

Concernant les extrêmes de températures, les températures minimales et maximales sont également appelées à se réchauffer à l'échelle du globe dans les années à venir (Collins *et al.*, 2013). Une étude de Sillmann *et al.* (2013), prévoit que les extrêmes chauds et froids devraient augmenter au cours du 21<sup>e</sup> siècle au Québec avec une hausse plus importante dans le cas des températures minimales. Selon les projections, la journée la plus chaude de l'année s'élèvera d'environ 3 à 5 °C pour le scénario modéré et de 4 à 7 °C pour le scénario élevé. Ce résultat est accompagné par des projections de vagues de chaleur de plus grande durée. Pour ce qui est des extrêmes froids, la journée la plus froide de l'année devrait

augmenter de 5 à 7 degrés pour le scénario RCP4.5 et d'au moins 10 degrés pour RCP8.5. L'étude suppose également une forte réduction dans le nombre annuel de jours de gel (température minimale sous 0 °C) et une légère diminution, soit de 1 à 2 jours, dans la durée des vagues de froid (Sillmann *et al.*, 2013).

Tableau 3.1 Sommaire des valeurs observées pour la période 1971-2000 (moyenne ( $\mu$ ) et écart-type ( $\sigma$ )) et changements relatifs projetés des températures moyennes pour les quatre régions d'intérêt à l'horizon 2050 (2041 à 2070) selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5. Le tableau présente les valeurs annuelles (ANN) et saisonnières : décembre, janvier, février (DJF); mars, avril, mai (MAM); juin, juillet, août (JJA); et septembre, octobre, novembre (SON). L'intervalle dans les résultats projetés indique les 10e et 90e percentiles des simulations climatiques (n = 33 RCP 4.5; n = 29 RCP 8.5 de CMIP5) (modifié de Ouranos, 2015).

Températures moyennes					
Région	Saison	Observations (°C) 1971-2000		Horizon 2050 (°C)	
		$\mu$	$\sigma$	RCP 4.5	RCP 8.5
Sud	ANN	4,6	0,8	+ 1,7 à + 3,7	+ 2,4 à + 4,6
	DJF	-9,5	1,6	+ 1,8 à + 4,3	+ 3,0 à + 5,5
	MAM	3,9	1,3	+ 1,4 à + 3,5	+ 2,2 à + 5,1
	JJA	17,6	0,8	+ 1,6 à + 3,3	+ 2,2 à + 4,5
	SON	6,4	0,9	+ 1,7 à + 3,4	+ 2,5 à + 4,2
Centre	ANN	-2,0	1,0	+ 1,7 à + 4,0	+ 2,6 à + 5,0
	DJF	-18,1	1,8	+ 2,2 à + 5,6	+ 3,7 à + 6,7
	MAM	-3,5	1,6	+ 1,1 à + 3,9	+ 2,1 à + 4,6
	JJA	12,7	0,9	+ 1,2 à + 3,3	+ 1,9 à + 4,5
	SON	1,0	1,1	+ 1,6 à + 3,3	+ 2,5 à + 4,4
Golfe	ANN	3,9	0,7	+ 1,3 à + 3,5	+ 2,0 à + 4,3
	DJF	-7,9	1,4	+ 1,4 à + 4,1	+ 2,3 à + 4,8
	MAM	2,0	1,1	+ 1,0 à + 3,6	+ 1,7 à + 4,4
	JJA	15,4	0,7	+ 1,1 à + 3,4	+ 1,8 à + 4,3
	SON	6,2	0,8	+ 1,3 à + 3,1	+ 1,9 à + 3,9
Nord	ANN	-6,7	1,2	+ 1,9 à + 4,7	+ 2,8 à + 5,8
	DJF	-22,5	2,4	+ 3,1 à + 7,8	+ 4,5 à + 9,5
	MAM	-10,2	1,9	+ 1,2 à + 4,7	+ 2,4 à + 6,2
	JJA	7,9	0,9	+ 0,9 à + 3,4	+ 1,5 à + 4,5
	SON	-2,0	1,3	+ 1,5 à + 3,5	+ 2,5 à + 4,4

### 3.1.2 Indices thermiques

Puisque les températures sont appelées à changer, elles exerceront inévitablement une influence sur les indicateurs thermiques, dont ceux spécifiquement développés le secteur agricole. Les indices agroclimatiques, de façon générale, sont des outils qui expriment la relation entre les éléments climatologiques, comme les précipitations ou la température, et agronomiques, tels que les stades

phénologiques d'une culture (Lepage *et al.*, 2012). Ces indices servent entre autres à évaluer le potentiel d'une culture dans une région donnée, à planifier les différentes étapes du cycle de vie des espèces et à éviter les risques de dommages (Lepage *et al.*, 2012). Puisque la température est l'un des facteurs ayant le plus d'influence sur les espèces végétales, la compréhension de l'évolution de ces indices est primordiale pour saisir l'impact des changements climatiques sur la production agricole (Lepage *et al.*, 2012). Cette section présente les modifications attendues à l'horizon 2050 pour les principaux indicateurs thermiques utilisés en agriculture (voir tableau 3.2).

D'abord, la saison de croissance, qui correspond à la période où les conditions climatiques d'une région sont favorables à la croissance et au développement des cultures, soit lorsque la température moyenne se maintient au-dessus de 5°C, devrait s'allonger dans le futur (Lepage *et al.*, 2012). Les projections montrent une augmentation de sa durée d'environ 10 à 30 jours partout au Québec, selon le scénario d'émission, avec un devancement au printemps et un retardement à l'automne à peu près équivalent (*Atlas agroclimatique du Québec*, 2012 ; Logan *et al.*, 2011 ; Rapaic, 2012).

En concordance avec l'augmentation prévue des températures durant la saison estivale, les degrés-jours et les unités thermiques maïs (UTM), deux indices qui font référence aux cumuls de chaleur, devraient aussi s'élever au cours des prochaines décennies. Selon les projections, à l'horizon 2050, le sud du Québec connaîtra une hausse marquée d'environ 600 degrés-jours (Logan *et al.*, 2011) et une augmentation variant de 400 à 900 UTM, d'après le scénario (*Atlas agroclimatique du Québec*, 2012).

En ce qui concerne les indices de températures extrêmes, l'occurrence des températures élevées durant la saison de croissance, c'est-à-dire, le nombre de jours où la température maximale quotidienne est supérieure à généralement 30 ou 35 °C, est appelé à augmenter d'environ 4 jours, selon le scénario, dans le sud du Québec (*Atlas agroclimatique du Québec*, 2012 ; Rapaic, 2012). La température minimale annuelle, un indice qui fait permet de prévoir la capacité de survie des espèces en hiver, sera plus élevée d'environ 6 °C dans le sud du Québec, selon les projections (*Atlas agroclimatique du Québec*, 2012). Aussi, l'occurrence des températures froides, soit lorsque la température se situe en dessous de -15 °C, sera moins fréquente sous les l'effet des changements climatiques (Rochette *et al.*, 2004).

Pour ce qui est de la saison de gel, qui fait référence à la période où la température minimale quotidienne est inférieure ou égale à la température gélive ( $T \leq 0^\circ\text{C}$ ), on peut s'attendre à une réduction de sa durée dans le futur (Rochette *et al.*, 2004). La date du premier gel automnale devrait être repoussée de 16 jours

tandis que le dernier gel printanier devrait être devancé de 15 jours en moyenne au Québec (Rochette *et al.*, 2004).

Finalement, l'occurrence des épisodes de gel-dégel devrait se maintenir dans le futur. Toutefois, la saison de gel-dégel, qui se produit actuellement davantage au printemps, devrait subir un déplacement avec une hausse du nombre d'événements durant l'hiver (Logan *et al.*, 2011 ; Rapaic, 2012). La plus forte augmentation des épisodes de gel-dégel pendant cette saison se produira dans le sud de la province avec une hausse attendue d'environ 5 à 14 jours (Rapaic, 2012).

Tableau 3.2 Résumé des changements projetés à l'horizon 2050 (période 2041-2070) des principaux indicateurs thermiques utilisés en agriculture (compilation d'après : *Atlas agroclimatique du Québec*, 2012 ; Lepage *et al.*, 2012 ; Logan *et al.*, 2011 ; Rapaic, 2012 ; Rochette *et al.*, 2004).

Indices thermiques		Changements projetés à l'horizon 2050
Saison de croissance	Longueur de la saison de croissance	↑ 10 à 30 jours, selon la région et le scénario
	Date de début et de fin	Devancement au printemps et retardement à l'automne à peu près équivalent
Températures extrêmes	Fréquence de températures > 30 °C	↑ ≈ 4 jours dans le Sud du Québec
	Température minimale annuelle	↑ ≈6 °C pour le Sud du Québec
	Fréquence des températures < -15 °C	↓ nombre de jours
Cumuls de chaleur	Degrés-jours	↑ ≈600 degrés-jours pour le Sud ↑ plus faible pour les autres régions
	Unités thermiques maïs (UTM)	↑ 400 à 900 UTM dans le Sud et le Golfe
Risques de gel	Longueur de la saison de gel	↓ 2 à 4 semaines pour les régions du Sud et du Golfe
	Épisodes de gel-dégel	↑ du nb d'épisodes de 5 à 14 jours durant l'hiver, surtout dans le Sud ↓ du nb d'épisodes au printemps et à l'automne

## 3.2 Précipitations

### 3.2.1 Précipitations moyennes, saisonnières et extrêmes

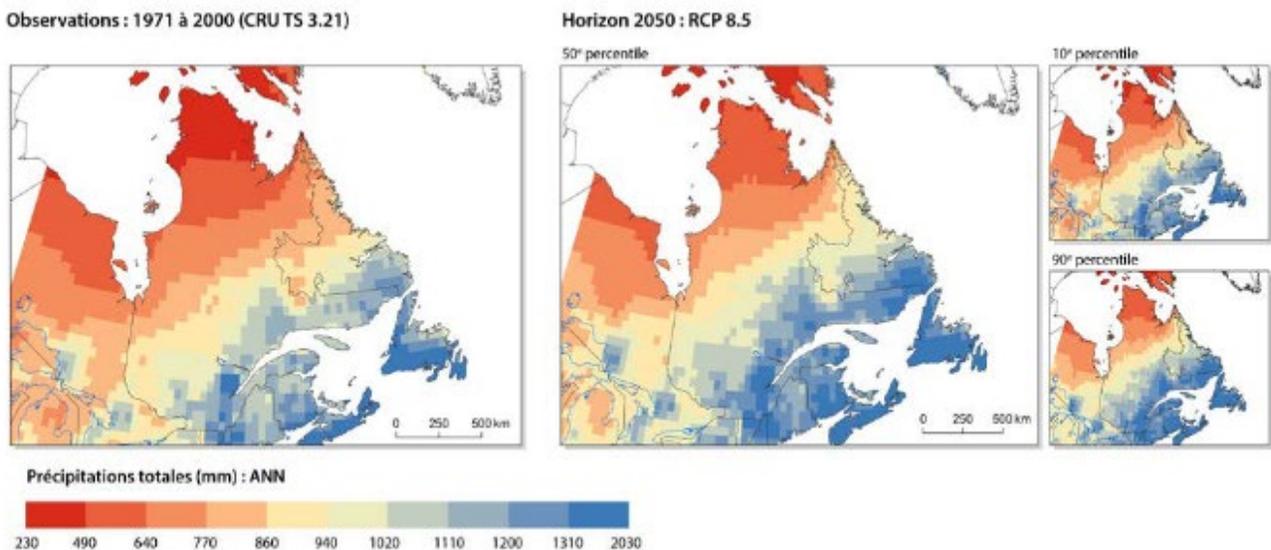
Les précipitations sont importantes pour les cultures puisqu'elles fournissent une part considérable de l'eau nécessaire au fonctionnement de leurs mécanismes vitaux (Berteaux *et al.*, 2014a). En cas de carence

ou de surplus d'eau, les végétaux peuvent subir des dommages non négligeables. Ainsi, les variations au niveau des régimes de précipitations ont un effet considérable sur le développement et la survie des végétaux, ce qui témoigne de l'importance de s'attarder à l'évolution de ces indices dans le futur.

À l'échelle du globe, on peut s'attendre à ce que le réchauffement climatique ait des effets sur les régimes de précipitations, notamment par le fait que l'air chaud peut contenir plus d'humidité (Held et Soden, 2006). On prévoit que la quantité de vapeur d'eau transportée des tropiques vers les latitudes plus élevées augmentera considérablement, ce qui contribuera à accroître les précipitations dans les régions comme le Québec.

Selon les projections d'Ouranos (2015), la répartition géographique des précipitations totales annuelles restera sensiblement la même en climat futur (voir figure 3.2). Elle sera toutefois atténuée par une augmentation plus importante dans le Nord du Québec, soit de 9 à 22 mm dans le cas d'un scénario élevé. Cette hausse variera entre 5 et 14 mm pour les régions du Golfe et du Sud et entre 9 et 17 mm pour le Centre (voir tableau 3.3). Aussi, de la même façon que les températures, les précipitations seront beaucoup plus importantes dans le cas d'un scénario élevé et s'intensifieront avec le temps (Ouranos, 2015).

Figure 3.2 Précipitations totales annuelles observées pour la période 1971-2000 et projetées pour l'horizon 2050 (2041-2070) à partir de RCP 8.5 (Ouranos, 2015).



Au niveau des changements saisonniers, les résultats varient. D’abord, toutes les régions peuvent s’attendre à des hausses de quantités de précipitations en hiver et au printemps (Ouranos, 2015). Plus modérément, ce sera aussi le cas en été et en automne pour le Nord et le Centre du Québec, mais pas nécessairement pour le Sud et le Golfe. En effet, les résultats pour ces deux régions varient d’un modèle à l’autre : certains présentent une légère augmentation tandis que d’autres projettent une faible diminution (voir tableau 3.3) (Ouranos, 2015).

Tableau 3.3 Sommaire des valeurs observées pour la période 1971-2000 (moyenne ( $\mu$ ) et écart-type ( $\sigma$ )) et changements relatifs projetés des précipitations totales pour les quatre régions d’intérêt pour l’horizon 2050 (2041 à 2070). Les résultats sont présentés pour les saisons : annuel (ANN); décembre, janvier, février (DJF); mars, avril, mai (MAM); juin, juillet, août (JJA); et septembre, octobre, novembre (SON) L’intervalle dans les résultats projetés indique les 10e et 90e percentiles des simulations climatiques (n = 33 RCP 4.5; n = 29 RCP 8.5 de CMIP5) (tiré d’Ouranos, 2015).

<b><math>\Delta</math> Précipitations totales</b>					
Région	Saison	Observations 1971-2000		Horizon 2050 (%)	
		$\mu$ (mm)	$\sigma$ (%)	RCP 4.5	RCP 8.5
Sud	ANN	<b>1054</b>	<b>8</b>	<b>+ 3 à + 11</b>	<b>+ 5 à + 14</b>
	DJF	228	16	+ 2 à + 22	+ 5 à + 27
	MAM	246	19	+ 3 à + 17	+ 7 à + 18
	JJA	296	12	- 1 à + 9	- 5 à + 10
	SON	284	16	- 2 à + 13	- 2 à + 14
Centre	ANN	<b>910</b>	<b>6</b>	<b>+ 6 à + 12</b>	<b>+ 9 à + 17</b>
	DJF	164	15	+ 7 à + 25	+ 13 à + 34
	MAM	180	15	+ 3 à + 16	+ 6 à + 23
	JJA	299	10	+ 1 à + 11	+ 0 à + 15
	SON	268	12	+ 5 à + 13	+ 6 à + 19
Golfe	ANN	<b>1254</b>	<b>8</b>	<b>+ 2 à + 12</b>	<b>+ 5 à + 13</b>
	DJF	323	13	+ 2 à + 17	+ 5 à + 20
	MAM	292	15	+ 2 à + 13	+ 5 à + 17
	JJA	300	13	- 1 à + 15	- 3 à + 16
	SON	339	14	- 2 à + 9	- 1 à + 11
Nord	ANN	<b>578</b>	<b>11</b>	<b>+ 6 à + 17</b>	<b>+ 9 à + 22</b>
	DJF	92	26	+ 4 à + 37	+ 13 à + 48
	MAM	97	21	+ 1 à + 23	+ 4 à + 30
	JJA	206	15	+ 1 à + 15	+ 4 à + 21
	SON	183	16	+ 6 à + 21	+ 5 à + 27

On prévoit également une hausse des événements de précipitations extrêmes au cours des prochaines années. L’étude de Sillmann *et al.* (2013) projette que les quantités de précipitations produites lors des

jours les plus pluvieux augmenteront de 40-70 % dans le Sud et le Centre du Québec, et de 70-100 % pour le Golfe et le Nord du Québec dans le cas d'un scénario élevé. Toutes les régions devraient également connaître une hausse dans le nombre de jours de précipitations abondantes (excédant de 10 mm) de même que dans l'intensité des épisodes de longues durées (Sillmann *et al.*, 2013).

### **3.2.2 Phénomènes liés aux précipitations**

#### **3.2.2.1 Orages, tornades, foudre et verglas**

Les événements extrêmes associés aux processus convectifs tels que les orages, les tornades ou la foudre ont le potentiel d'occasionner de forts dommages en agriculture, comme c'est le cas aussi pour les épisodes de verglas (Lepage *et al.*, 2012). C'est pourquoi les connaissances sur leur évolution doivent être considérées. D'après l'étude réalisée par Paquin *et al.* (2014), l'élévation prévue du gradient d'humidité dans l'atmosphère induira une hausse de l'énergie convective potentielle disponible partout au Québec. Il en résulte une tendance à l'accroissement de la fréquence des événements de précipitations convectives, c'est-à-dire des orages. Selon les auteurs, les quantités de précipitations produites par les phénomènes orageux seront de plus en plus importantes à mesure que l'on s'approchera de la fin du siècle. Concernant les tornades, la foudre et le verglas même si les connaissances à ce sujet se sont beaucoup améliorées au cours des dernières années, il est encore difficile de se prononcer sur leur évolution en climat futur (Ouranos, 2015).

#### **3.2.2.2 Sécheresse**

La sécheresse est un autre phénomène lié aux précipitations qui peut être gravement dommageable pour les cultures, surtout en pleine saison de croissance (Lepage *et al.*, 2012). En règle générale, elle fait référence à « une période prolongée de temps anormalement sec qui épuise les ressources en eau pour répondre aux besoins humains et environnementaux » (Bonsal *et al.*, 2011). Toutefois, puisque la sécheresse touche une multitude de secteurs, plusieurs définitions existent basées sur divers critères. En agriculture, on fait souvent référence à la sécheresse météorologique, provoquée par un déficit de précipitations, ou agricole, qui se concentre sur des déficits d'humidité du sol, intégrant à la fois des mesures de précipitations et d'évapotranspiration (P-ETP) (Bonsal *et al.*, 2011).

En termes d'indices de sécheresses météorologiques, Seneviratne *et al.* (2012) projettent pour le Québec, à l'horizon 2081-2100, un raccourcissement de la séquence maximale de jours consécutifs sans précipitations à l'échelle annuelle et hivernale, mais un allongement de ces épisodes en été pour la région

du Sud. Dirmeyer *et al.* (2013) montrent également un fort consensus pour des conditions futures estivales plus sèches dans le cas d'un scénario d'émission élevé. Les résultats de Collins *et al.* (2013), basés sur RCP 8.5, confirme aussi une réduction du nombre de jours consécutifs sans pluie à l'échelle annuelle de l'ordre de 0 à -5 jours, et ce, dans toutes les régions du Québec.

En ce qui concerne la sécheresse agricole, les projections d'anomalies d'humidité du sol montrent des conditions plus sèches annuellement dans le Sud et le Centre de la province et encore davantage pour la saison estivale (Seneviratne *et al.*, 2012). L'étude de Collins *et al.* (2013) projettent également des conditions d'humidité du sol plus sèches à l'échelle annuelle au Québec, avec des résultats particulièrement significatifs pour le Sud. Les projections de surplus d'eau, c'est-à-dire l'écart entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (P-ÉTP), de l'Atlas agroclimatique du Québec (2012), indiquent également que les conditions estivales seront plus sèches, avec une diminution de 24 à 62 mm pour le sud du Québec et de 5 à 23 mm dans l'est. Cependant, le scénario supérieur (90<sup>e</sup> percentile) prévoit plutôt des conditions plus humides, ce qui laisse un degré d'incertitude élevée. Somme toute, il semble y avoir un fort consensus dans la littérature que le Québec sera plus enclin à des conditions de sécheresse durant la saison estivale, et ce, particulièrement dans le Sud de la province.

### **3.3 La neige**

L'accumulation de la neige au sol est très importante en agriculture. L'épaisseur et la densité, tout comme la persistance de la neige, ont une influence majeure sur la survie hivernale de ces espèces pérennes puisqu'elle assure une protection contre les températures extrêmes (Bélangier *et al.*, 2006). De plus, elle affecte le début et la fin de la saison de croissance, ainsi que l'accès des plantes à l'humidité et aux nutriments (Rixen *et al.*, 2022).

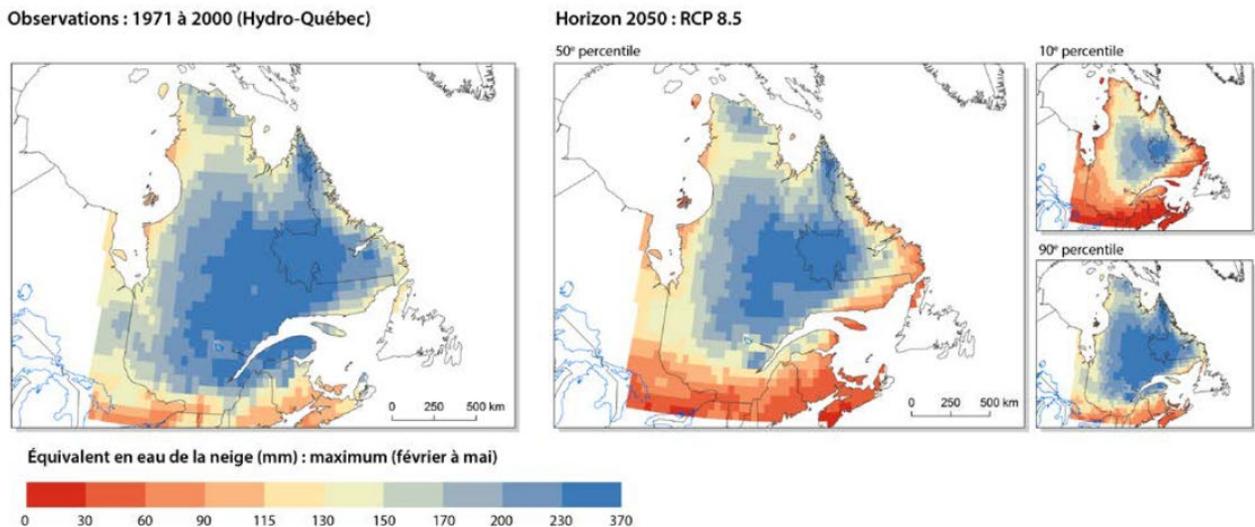
Les résultats présentés précédemment montrent qu'à l'horizon 2050, le Québec connaîtra une hausse des températures et des précipitations durant la saison hivernale. Puisque la neige dépend de ces deux facteurs, elle sera nécessairement affectée par ces changements (Rixen *et al.*, 2022). À son tour, la neige influencera elle aussi les régimes climatiques en raison de ses propriétés réfléchissantes et isolantes. L'équivalent en eau de la neige (EEN) et la durée de l'enneigement sont deux indices qui font référence à l'accumulation de la neige au sol, sans toutefois être affectés de la même façon par les températures et les précipitations (Ouranos, 2015). Par conséquent, l'évolution de ces indicateurs est utile dans la compréhension des changements de conditions nivales.

### 3.3.1 Équivalent en eau de la neige

L'ÉEN représente la quantité d'eau stockée sous forme de neige pendant l'hiver, laquelle est disponible pour les sols et les cours d'eau lors de la fonte au printemps (Ouranos, 2015). Au Québec, les précipitations de neige suivent un fort gradient spatial. Selon les données observées pour la période 1971-2000, la moyenne de l'enneigement maximum (EEmax) est au plus bas à 60 mm dans le sud et peut atteindre plus de 350 mm dans le nord (voir figure 3.3) (Ouranos, 2015). Les diverses régions du Québec atteignent leur enneigement maximum (EENmax) entre février et mai, soit plus précisément en avril pour la majeure partie du territoire et en mars pour l'extrême sud-ouest.

Les résultats projetés à l'horizon 2050 à partir de RCP8.5 par Ouranos (2015) montrent que tout le Québec peut s'attendre à une diminution de la neige au sol, mais avec des changements plus importants dans les régions du Sud et du Golfe (voir figure 3.3). Pour le sud, l'ÉEN devrait diminuer en mars et en avril. Ainsi, l'enneigement dans cette région atteindrait dorénavant son maximum en février. Pour ce qui est du Golfe, les projections montrent que le couvert de neige, qui persistait jusqu'en mai dans cette région, aura disparu dans les prochaines décennies. Dans cette région, l'ÉEN sera réduit d'environ 100 mm dès le mois de février (Ouranos, 2015). Pour le Centre, les changements prévus des conditions d'enneigement seront

Figure 3.3 Maximum de l'équivalent en eau de la neige (EENmax) entre février et mai observé pour la période 1971-2000 et projeté pour l'horizon 2050 (2041-2070) à partir du RCP8.5. La moyenne observée est calculée à partir des données interpolées d'Hydro-Québec (Tapsoba et al., 2005). Les cartes futures présentent la médiane de l'ensemble ainsi que les 10e et 90e percentiles de 22 scénarios climatiques futurs. Les scénarios climatiques futurs ont été produits à partir de l'ensemble CMIP5 (RCP8.5) (Ouranos, 2015).

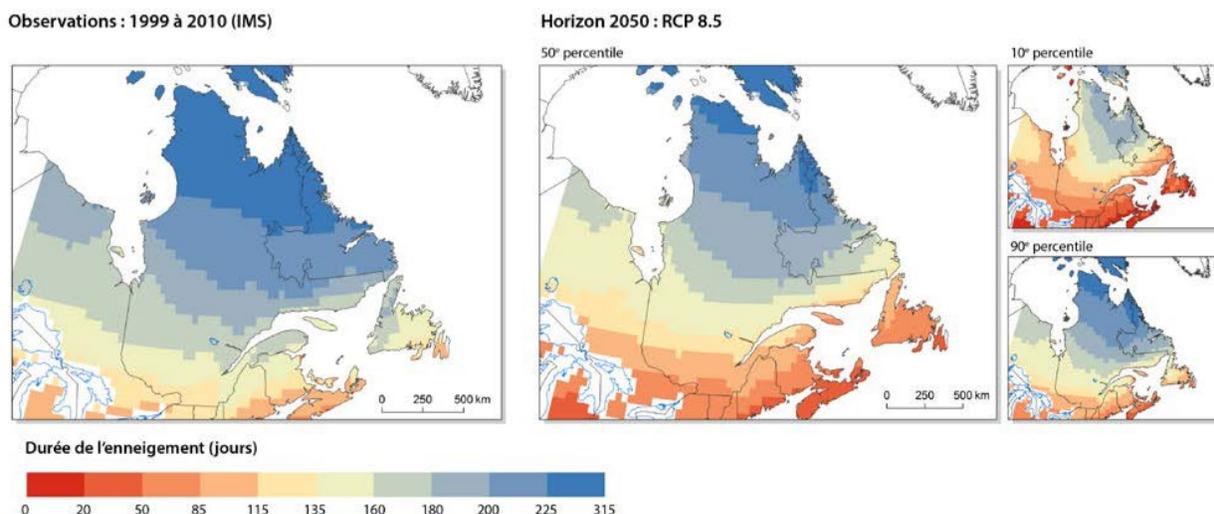


globalement plus modestes, avec des réductions pouvant aller jusqu'à une vingtaine de millimètres. Dans cette région, l'enneigement maximum sera atteint en mars plutôt qu'en avril. Enfin, les conditions de neige seront presque inchangées dans le Nord du Québec selon les projections (Ouranos, 2015).

### 3.3.2 Durée de l'enneigement

La durée de l'enneigement correspond au nombre de jours consécutifs où la neige au sol atteint un certain seuil, soit généralement 2 centimètres d'épaisseur (Ouranos, 2015). Cet indice est surtout influencé par les températures : plus elles sont basses et plus la période d'enneigement est longue. Par conséquent, la durée de l'enneigement est plus basse dans le sud du Québec et augmente graduellement plus on monte vers les hautes latitudes. Selon les résultats d'Ouranos (2015), la moyenne pour la période 1999-2010 débute à 115 jours dans le sud et peut s'étendre jusqu'à 315 jours dans le nord (voir figure 3.4). Les projections basées sur le scénario RCP8.5 suggèrent une baisse de la durée de l'enneigement pouvant atteindre jusqu'à 25 jours dans le Nord du Québec, 25 à 45 jours dans le Centre, 45 à 75 jours pour le golfe du Saint-Laurent et finalement, 45 à 65 jours pour le Sud du Québec (voir figure 3.4). Autrement dit, comme c'est le cas pour l'EEN, les changements au niveau de la durée de l'enneigement seront plus importants dans les régions du Golfe et du Sud.

Figure 3.4 Durée de l'enneigement observée pour la période 1999-2010 et projetée pour l'horizon 2050 (2041-2070) à partir du RCP 8.5. La moyenne observée est calculée à partir des données IMS 24 (National Ice Center, 2008). Les cartes futures présentent la médiane de l'ensemble ainsi que les 10e et 90e percentiles de 19 scénarios climatiques futurs. Les scénarios climatiques futurs sont basés sur l'ensemble CMIP5 (RCP8.5) (Ouranos, 2015).



## CHAPITRE 4

### OPPORTUNITÉS AGRICOLES EN CLIMAT MODIFIÉ

Les changements climatiques anticipés au niveau des températures, des précipitations et de la neige affecteront inévitablement la production agricole au Québec. Ces modifications occasionneront de multiples impacts sur les productions végétales. Parmi ceux-ci, certains seront bénéfiques pour les cultures, ce qui engendra de nouvelles possibilités aux producteurs. En se basant sur les projections décrites dans le chapitre précédent, cette section dresse les principales perspectives agricoles attendues au Québec au cours des prochaines années.

#### 4.1 Amélioration du rendement de certaines cultures

Tel que présenté dans le chapitre précédent, on prévoit qu'avec la hausse des températures, les conditions de croissance seront modifiées au Québec. Ces changements seront bénéfiques au développement de certaines cultures qui se trouvaient jusqu'à maintenant limitées par les températures (Bootsma *et al.*, 2005a). Étant deux espèces qui aiment la chaleur, le maïs-grain et le soya devraient profiter de ce réchauffement. Plus spécifiquement, la hausse prévue des unités thermiques maïs (UTM) combinée à l'allongement de la période végétative sera favorable à leur croissance. D'une part, ces nouvelles conditions offriront plus de temps à la plante pour accumuler de la matière sèche (Bootsma *et al.*, 2005a). D'autre part, des températures plus élevées, et par conséquent plus près de l'optimum de l'espèce, favoriseront une croissance plus rapide (Bootsma *et al.*, 2005b). Pour le maïs, on prévoit une augmentation considérable des rendements pouvant aller de 54% à 70% dans les régions où la production est déjà possible (Bélanger et Bootsma, 2002). Quant au soya, les rendements devraient s'élever d'environ 40% pour les mêmes régions (Bélanger et Bootsma, 2002). Ces gains sont essentiellement dus au fait que ces nouvelles conditions de croissance permettront des plantations plus hâtives et l'utilisation potentielle d'hybrides de maïs ou des cultivars de soya plus tardifs, dont les rendements seront plus élevés dans les régions où les UTM sont en plus grand nombre (Bélanger et Bootsma, 2002).

La productivité de certaines plantes fourragères sera également améliorée avec les changements climatiques. Ce sera le cas notamment pour la fléole des prés et le mélange fléole-luzerne, deux graminées largement cultivées au Québec (Jing *et al.*, 2013, 2014 ; Thivierge *et al.*, 2016, 2017). L'allongement prévu de la saison de croissance, combinée avec un accroissement du cumul de chaleur durant cette période, aurait pour effet d'accélérer le temps de maturation, ce qui permettrait une coupe supplémentaire

(Bootsma *et al.*, 2005a). En climat actuel, la fléole est généralement récoltée deux fois pendant la saison, car la période entre deux coupes est d'à peu près 700 degrés-jours (Jing *et al.*, 2013). L'augmentation projetée des degrés-jours serait suffisante pour permettre une troisième récolte, se traduisant par une hausse des rendements annuels d'environ 304 kilogrammes de matière sèche/hectare (Jing *et al.*, 2013). Au Québec, ces gains seront surtout perceptibles dans les régions aux climats plus froids, comme dans les maritimes (Thivierge *et al.*, 2016, 2017).

L'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique pourrait également avoir des effets positifs sur les rendements de certaines espèces. En règle générale, un taux plus élevé de CO<sub>2</sub> accélère la photosynthèse et améliore l'utilisation de l'azote et de l'eau par la plante (Lobell et Gourdjji, 2012). Une étude portant sur la production agricole globale a évalué qu'au cours des prochaines années, les trajectoires de CO<sub>2</sub> devraient augmenter les rendements d'environ 1,8% par décennie (Lobell et Gourdjji, 2012). Toutefois, cet effet varie selon plusieurs facteurs comme l'espèce, la température, les contraintes en eau et en nutriments, ainsi que le niveau de pollution en ozone troposphérique. Cela étant dit, la croissance du soya pourrait être positivement affectée par la hausse projetée de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. En effet, les espèces de type C3 comme le soya, le blé et l'orge, sont particulièrement sensibles à l'augmentation du dioxyde de carbone (Bootsma *et al.*, 2005b). En tenant compte seulement de l'impact du CO<sub>2</sub>, plusieurs auteurs s'entendent pour dire que les rendements seront considérablement améliorés. Par exemple, Bootsma *et al.* (2005b) estiment qu'une concentration deux fois plus élevée de CO<sub>2</sub> pourrait accroître les rendements de soya d'au moins 20% supplémentaires. Une autre étude réalisée par Brassard et Singh (2007) évaluent qu'une hausse du CO<sub>2</sub> augmentera les rendements du soya de 54,2%. Les bénéfices d'une haute teneur en CO<sub>2</sub> pourraient également être perceptibles chez certaines cultures fourragères, soit plus spécifiquement la luzerne, dont les rendements pourraient être améliorés grâce à ces nouvelles conditions (Thivierge *et al.*, 2016, 2017).

#### **4.2 Diminution des risques et dommages pour les arbres fruitiers**

Dans un climat comme celui du Québec, les cultures pérennes telles que les arbres fruitiers sont particulièrement susceptibles de subir des dommages en dehors de la saison de croissance. Par exemple, dans les zones de productions actuelles de la pomme, le risque de mortalité hivernale est d'environ une fois aux dix ans (Rochette *et al.*, 2004). Selon les projections, les changements à venir durant ces saisons seront globalement positifs pour certains arbres fruitiers comme les pommiers (Lease *et al.*, 2009 ; Rochette *et al.*, 2004). D'une part, l'arrivée plus tardive du premier gel automnale offrira de meilleures

conditions d'endurcissement ce qui réduira les risques de dommages aux cultures (Rochette *et al.*, 2004). D'autre part, les températures hivernales plus douces, perceptibles au travers d'une diminution de l'accumulation de degrés-froids ( $T < -15\text{ °C}$ ) et la hausse de la température minimale annuelle, auront pour effet de réduire les risques de dommages hivernaux (Rochette *et al.*, 2004). Aussi, les dangers d'endommagements des bourgeons, attribuables à une gelée tardive, devraient rester les mêmes dans le sud du Québec, mais diminuer dans les régions agricoles les plus nordiques comme le Saguenay-Lac-Saint-Jean, le Bas-Saint-Laurent et la Gaspésie (Bélanger et Bootsma, 2002 ; Rochette *et al.*, 2004).

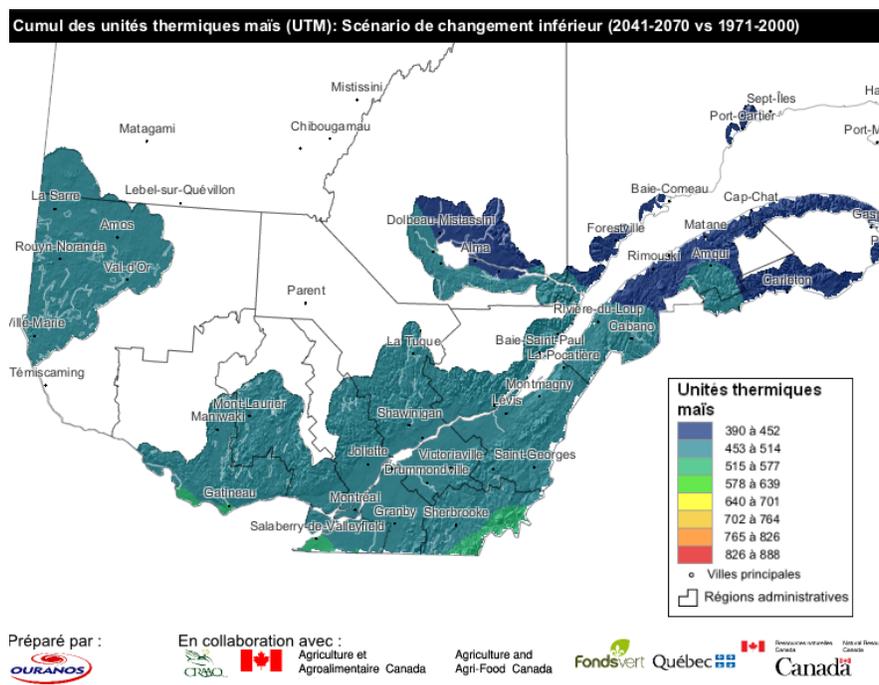
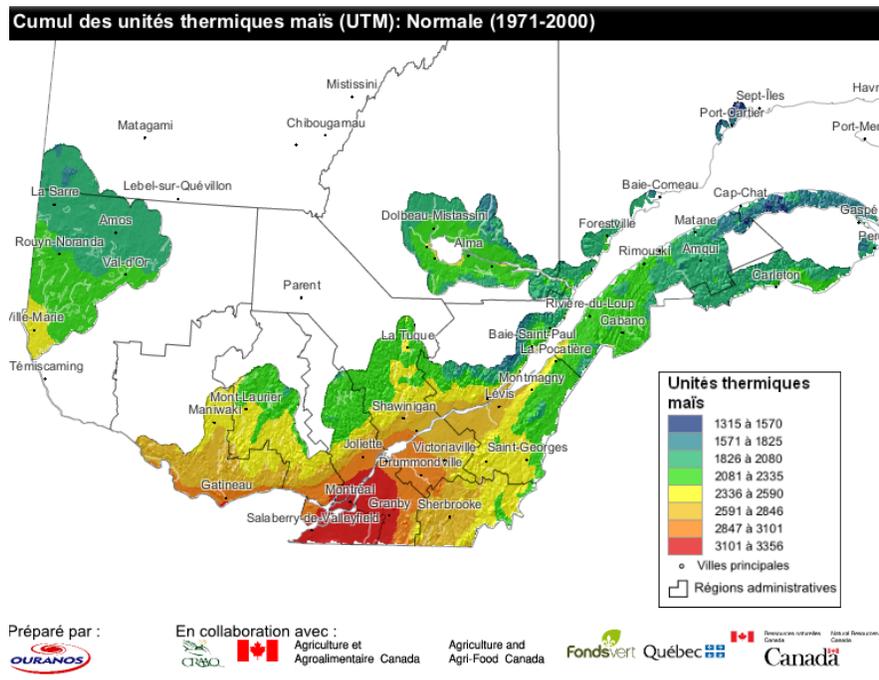
### **4.3 Expansion de la production agricole vers le nord**

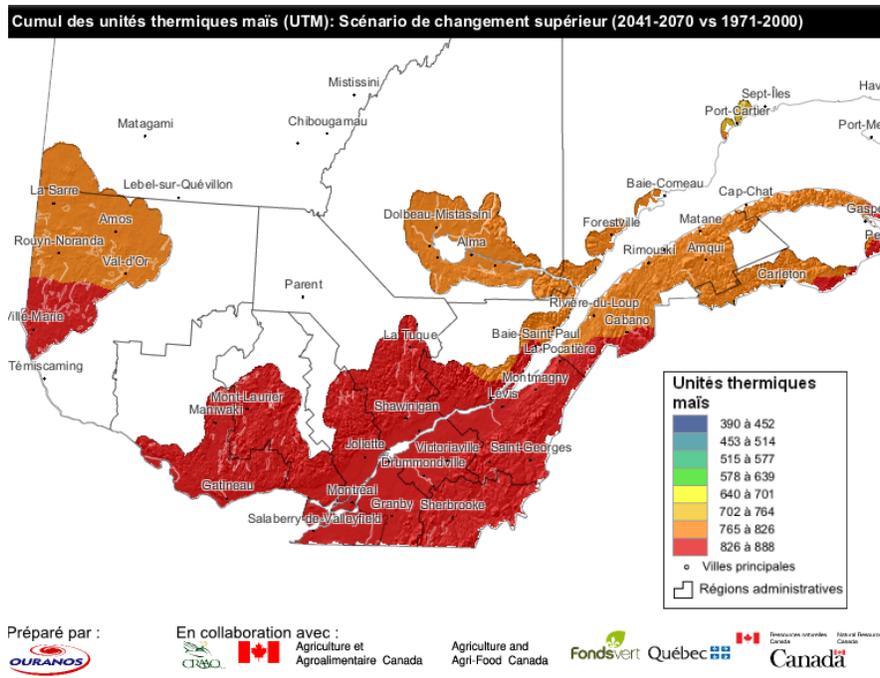
En raison de sa nordicité, la température est actuellement un facteur déterminant dans la répartition des cultures (Berteaux *et al.*, 2014a). Les hivers longs et rigoureux et les étés courts et frais qui caractérisent la majeure partie du territoire limitent grandement la répartition des espèces (Berteaux *et al.*, 2014a). Par conséquent, le réchauffement prévu au Québec aura un impact sur la présence des cultures sur le territoire. Concrètement, ce changement sera favorable à l'expansion de la production de certaines espèces dont l'aire de répartition était jusqu'à maintenant restreinte par les températures (Bélanger et Bootsma, 2002). Ainsi, à condition que les sols et la topographie le permettent, on peut anticiper un déplacement de la zone de production de quelques espèces vers le nord, telles que le maïs-grain, le soya et certains arbres fruitiers (Bélanger et Bootsma, 2002). On peut également considérer que les futures conditions de croissance pourraient permettre l'introduction de nouvelles cultures dans les régions nordiques où le climat est actuellement limitant (Bélanger et Bootsma, 2002).

Pour ce qui est du maïs-grain et du soya, la zone de production est présentement restreinte à l'extrême sud du Québec, soit plus précisément à la région entourant Montréal. Il faut au minimum 2300 UTM en moyenne pour envisager la culture de maïs-grain et de soya dans un même territoire (Bootsma *et al.*, 2005a). Ainsi, l'augmentation projetée des cumuls thermiques à l'horizon 2050 devrait permettre l'expansion de ces cultures dans les régions où il est présentement difficile de les produire. La figure 4.1 présente la répartition des cumuls moyens des UTM dans la zone agricole du Québec et les projections de changements basés sur le scénario inférieur (10e percentile) et supérieur (90e percentile). En ajoutant ces valeurs aux normales de 1971-2000, on obtient un aperçu du climat futur possible à l'horizon 2041-2070 (Atlas agroclimatique du Québec, 2012). Ainsi, la culture du maïs et du soya pourrait se développer au Saguenay-Lac-Saint-Jean, en Abitibi, dans le Bas-Saint-Laurent et peut-être même en Gaspésie,

dépendamment du scénario et il serait possible d'y obtenir des rendements comparables à ce qui se récolte aujourd'hui dans le sud du Québec (Bélangier et Bootsma, 2002)

Figure 4.1 Cartes des normales 1971-2000 du cumul des unités thermiques maïs (UTM) et scénarios de changement inférieur (10e percentile) et supérieur (90e percentile) pour l'horizon 2041-2070 vs 1971-2000 (Tiré de l'Atlas agroclimatique du Québec, 2012).





Quant aux arbres fruitiers, puisqu'il s'agit de cultures pérennes, leur distribution nordique est largement déterminée par leur capacité à tolérer le froid (Rochette *et al.*, 2004). Puisqu'on prévoit une augmentation des températures hivernales partout au Québec au cours des prochaines décennies, l'occurrence des températures froides ( $T < -15$  °C) est appelée à diminuer et la température annuelle la plus basse à se réchauffer (Rochette *et al.*, 2004). Ces indices sont de bons indicateurs du potentiel agricole d'une espèce pour une région donnée. Ainsi, avec le changement climatique, la production d'arbres fruitiers pourrait s'étendre plus vers les hautes latitudes (Bélanger et Bootsma, 2002 ; Rochette *et al.*, 2004 ; Roy *et al.*, 2017). Par exemple, la viticulture, qui est actuellement limitée à l'extrême sud du Québec, pourrait se développer dans de nouvelles régions comme l'Outaouais et la vallée du Saint-Laurent (Roy *et al.*, 2017). La production de pomme pourrait aussi s'étaler davantage vers le nord (Lease *et al.*, 2009).

#### 4.4 Introduction de nouvelles cultures et variétés

Ces modifications permettront l'introduction de nouvelles cultures et variétés d'espèces, tant dans les zones de production actuelles, que dans les régions où le climat est présentement limitant (Ouranos, 2015). En plus des cultivars de maïs-grain et de soya, plusieurs opportunités se présenteront pour la production d'arbres fruitiers. Une période de croissance plus longue, combinée à des conditions plus douces durant les autres saisons, offrira la possibilité d'utiliser de nouvelles variétés ou espèces adaptées à ces futures

circonstances. Par exemple, dans les zones de productions actuelles de pommiers, les cultures de la poire, de la prune ou de la vigne pourraient être davantage développées (Lease *et al.*, 2009). Pour ce qui est de la production de vin, présentement, la plupart des viticulteurs sélectionnent des cépages hybrides adaptés aux conditions fraîches du Québec. Or, les changements climatiques des dernières décennies ont poussé les producteurs à adopter de nouvelles variétés dont la croissance est plus précoce (ex. Pinot Noir, Gamay, Chardonnay) et qui ont plus de valeur sur le marché. Une étude de Roy *et al.* (2017) a démontré que le potentiel de production de ces cépages serait largement amplifié dans le contexte agroclimatique futur, principalement grâce au réchauffement des températures durant la saison de croissance.

#### **4.5 Position concurrentielle favorisée**

Enfin, en analysant l'incidence future des changements climatiques sur la compétitivité du secteur agricole, plusieurs études (Debailleul *et al.*, 2013 ; Tamini *et al.*, 2015) soulèvent que la position concurrentielle du Québec devrait être avantagée dans la production de certaines cultures comme le maïs-grain et la pomme. Pour le maïs-grain, ce gain serait surtout dû au fait que l'Iowa et l'Illinois, deux compétiteurs majeurs, seront désavantagés par des conditions climatiques plus difficiles, particulièrement reliées à des stress hydriques, plaçant le Québec dans une meilleure position concurrentielle. Étant donné le volume de production important des états américains, ces gains ne seront toutefois pas assez significatifs pour que la province canadienne devance ses compétiteurs (Debailleul *et al.*, 2013 ; Tamini *et al.*, 2015). La production de la pomme, quant à elle, connaîtra la plus grande progression en termes de position concurrentielle principalement grâce à l'augmentation de la densité des vergers et la hausse prévue des rendements. Ainsi, en 2050, le Québec devrait rattraper l'Ontario, ce qui lui offrira un positionnement intéressant sur le marché de la pomme. Il resterait cependant toujours moins compétitif que la Colombie-Britannique et l'État de Washington (Debailleul *et al.*, 2013).

## CHAPITRE 5

### DISCUSSION SUR LE POTENTIEL AGROCLIMATIQUE FUTUR

En résumé, les possibilités agricoles qui se présenteront au Québec seront principalement dues à deux phénomènes : le réchauffement des températures et l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique. D'une part, une saison de croissance prolongée et plus chaude, ainsi que des conditions plus douces le reste de l'année, engendreront des rendements accrus pour certaines cultures, la diminution des risques et dommages aux espèces pérennes en dehors de la saison de croissance, l'expansion de la production agricole vers le nord, l'introduction de nouvelles cultures et variétés ainsi qu'une meilleure position concurrentielle pour certaines filières. Ce constat n'est pas surprenant puisque la température est considérée comme le facteur climatique le plus limitant actuellement au Québec. D'autre part, la hausse du CO<sub>2</sub> atmosphérique suppose des résultats globalement positifs en ce qui concerne la productivité de plusieurs espèces, notamment de celles de type C3, telle que le blé, l'orge, le soya, ainsi que la luzerne.

En réalité, l'atteinte de ces opportunités agricoles sera toutefois plus complexe. Premièrement, rappelons que ces bénéfices sont hypothétiques. Pour parvenir à ces gains, le climat devra évoluer de la même façon que les projections. Il faut donc garder en tête cette incertitude. Deuxièmement, la méthodologie employée pour faire émerger ces opportunités dans les études d'impacts ne tient compte que de certains paramètres spécifiques. Or, en pratique, ces effets ne sont pas isolés. Ils s'inscrivent dans un système agroclimatique complexe où interviennent une multitude de facteurs, qu'ils soient de nature économique, sociale, climatique ou biologique. Par conséquent, le bilan final dépendra de l'évolution et de l'interaction de l'ensemble de ces éléments, ce qui est particulièrement difficile à prévoir. Ainsi, dans le but de brosser un portrait plus complet et réaliste du potentiel agroclimatique futur du Québec, cette section discute des limites liées à l'atteinte de ces bénéfices.

#### **5.1 Autres impacts causés par les changements climatiques**

Premièrement, si certains avantages émergeront des changements climatiques, des impacts négatifs sont aussi à considérer. Ultimement, ces conséquences exerceront une influence sur les opportunités offertes en climat futur. En effet, selon l'ampleur de ces événements, les agriculteurs pourraient avoir de la difficulté à tirer profit de ces bénéfices en raison de l'action combinée des différents phénomènes

climatiques. Qu'ils soient causés par les variations de températures, de précipitations, de neige ou de CO<sub>2</sub>, ces effets doivent être pris en compte.

D'abord, des températures trop élevées pendant la saison de croissance pourraient augmenter le risque aux épisodes de stress thermique et limiter les rendements de certaines cultures, principalement celles qui se trouvent actuellement près de leur optimum (Bootsma *et al.*, 2004). Les cultures de maïs-grain et du soya sont justement menacées de vivre cette situation. En effet, au-delà de 3 500 UTM, le rendement pourrait plafonner voire même diminuer alors que le stress hydrique et thermique risquerait d'augmenter (Bootsma *et al.*, 2004). Puisqu'il fait déjà plus chaud qu'ailleurs, l'extrême sud du Québec est particulièrement visé par cette situation advenant que le scénario le plus élevé se produise (*Atlas agroclimatique du Québec*, 2012). En même temps, les espèces adaptées au climat frais, comme l'orge, le blé ainsi que certaines graminées fourragères telles que la fléole des prés et la luzerne, seront pénalisées par des conditions de croissance plus chaudes (Bootsma *et al.*, 2005b ; Thivierge *et al.*, 2016). Leur productivité risque d'être réduite dans les régions qui présenteront ces caractéristiques.

Par ailleurs, les conditions plus clémentes en dehors de la saison de croissance n'avantageront pas toutes les cultures pérennes. Pour plusieurs espèces fourragères, on s'attend à ce que les températures plus élevées à l'automne soient moins favorables à l'endurcissement au froid des plantes et que les conditions plus chaudes en hiver, accompagnées de redoux et d'épisodes de pluie plus fréquents, entraîneront une perte d'endurcissement et possiblement des dommages au système racinaire (Bélanger et Bootsma, 2002). De plus, la diminution de la couverture neigeuse exposera davantage les cultures à des températures létales, ce qui augmentera les risques de dommages pour ces espèces (Bélanger et Bootsma, 2002).

Du côté des précipitations, alors que les projections ne prévoient pas de changement significatif durant l'été, l'évapotranspiration pourrait toutefois augmenter avec le réchauffement des températures (Houle *et al.*, 2014). La probabilité de stress hydrique devrait s'accroître, et plus particulièrement dans le sud du Québec, considérant que les projections anticipent des conditions plus sèches pour cette région (Houle *et al.*, 2014). De plus, dans la mesure où les changements climatiques augmenteraient la fréquence et l'intensité des événements de pluie extrêmes, les excès d'eau pourraient causer de graves dommages (Mailhot *et al.*, 2007). Ils peuvent avoir des impacts directs sur les cultures, mais aussi sur le ruissellement de surface et sur l'érosion des sols qui favorisent le transfert d'éléments nutritifs et de pesticides vers les eaux de surfaces (Michaud *et al.*, 2012). Considérant que l'augmentation des précipitations au printemps

se produira en même temps que la fonte des neiges, la perte des éléments nutritifs et la contamination des eaux de surfaces pourraient devenir un problème (Michaud *et al.*, 2012).

Les modifications du climat affecteront aussi la qualité nutritionnelle de certaines cultures dans le futur. Par exemple, pour quelques espèces, l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> a un impact négatif sur la valeur nutritive, en ce qui concerne la teneur en fer, en zinc et en protéines (Lobell et Gourdjji, 2012 ; Myers *et al.*, 2014). Aussi, dans le cas des plantes fourragères, puisque l'augmentation des températures affecte leur digestibilité, la qualité nutritionnelle pourrait être réduite (Jing *et al.*, 2013, 2014). La luzerne et la fléole des prés sont menacées de vivre cette situation.

Il faut également ajouter les effets des phénomènes météorologiques extrêmes (inondations, pluies, sécheresse, verglas, etc.). Advenant qu'ils se réalisent davantage dans les prochaines années, les risques de dommages et de pertes au niveau de la production agricole pourraient augmenter. Bien qu'il existe encore peu de certitude sur l'évolution de la fréquence, de la durée et de l'intensité de ces événements (Ouranos, 2015), si les projections s'avèrent vraies, ces phénomènes engendreront des dommages suffisamment importants pour affecter la capacité des agriculteurs à tirer profit des changements climatiques.

Une dernière conséquence majeure à prendre en compte concerne les ennemis des cultures. En effet, les modifications climatiques auront aussi des répercussions sur le développement et la répartition des insectes ravageurs, des maladies et des mauvaises herbes (Gagnon *et al.*, 2013). Dans le cas des insectes, le réchauffement des températures permettra aux adultes d'arriver plus tôt en saison, de se développer plus rapidement et de compléter un plus grand nombre de générations par été ou même par année, augmentant ainsi la pression qu'ils exercent sur les cultures (Gagnon *et al.*, 2013). On envisage déjà ces changements chez le kyste de soya ou la pyrale du maïs sucré (Gagnon *et al.*, 2013 ; Moiroux *et al.*, 2014). De plus, les variations des régimes de températures et de précipitations, ainsi que l'accroissement de la concentration de CO<sub>2</sub>, en raison de son effet fertilisant, pourraient favoriser la compétitivité des mauvaises herbes par rapport aux cultures (Hatfield *et al.*, 2011). La survie et la dissémination des agents pathogènes responsables des maladies chez les plantes seront aussi avantagées par les modifications climatiques (Chakraborty, 2013). Par ailleurs, avec le réchauffement des températures, on anticipe l'expansion vers le nord de certains ennemis des cultures déjà présents au Québec et l'établissement de nouvelles espèces envahissantes (Brodeur *et al.*, 2013 ; Gagnon *et al.*, 2013 ; Moiroux *et al.*, 2014). Enfin, les modifications

du climat pourraient aussi affecter le synchronisme entre le cycle biologique de certains insectes et celui de leurs ennemis naturels qui contrôle les populations d'espèces ravageuses, augmentant les risques phytosanitaires (Brodeur *et al.*, 2013).

## **5.2 Limites à l'expansion du territoire agricole**

D'autres facteurs non agroclimatiques affecteront aussi la façon dont ces opportunités seront exploitées, et plus particulièrement en ce qui a trait à l'expansion territoriale de la production. Un premier élément important à prendre en compte est la capacité des sols à soutenir les cultures. En effet, même si certains aspects du climat futur sont encourageants, la structure et la fertilité des sols demeurent des facteurs fondamentaux à considérer pour la production agricole (Dubé, 2002). Or, il faut savoir que l'évolution pédologique ne se fait pas au même rythme que la transition climatique (Dubé, 2002). Ainsi, supposant que le climat change assez rapidement pour permettre de développer des cultures dans des secteurs où leur production était auparavant impossible, cela ne veut pas dire que les terres seront aptes à produire. Un second élément à tenir compte concerne plus largement le contexte socio-économique des régions plus nordiques. La gestion et la planification territoriale posera défi étant donné que d'autres activités économiques se pratiquent actuellement dans ces régions, sans compter qu'une importante partie sont des terres publiques (Pierre, 2015). L'éloignement des grands centres reste également une limite majeure, notamment en niveau des coûts de production et de transport, sans compter les problèmes liés au manque de relève (Pierre, 2015).

## **5.3 L'adaptation**

Afin d'exploiter le plein potentiel des changements climatiques, le secteur agricole devra nécessairement s'adapter à ce nouveau contexte. Il existe un grand nombre de stratégies d'adaptations potentielles, certaines permettant de réduire les conséquences négatives des modifications climatiques, et d'autres d'en accroître les bénéfiques (Ouranos, 2015). Afin de tirer profit des occasions engendrées par le nouveau climat, il sera nécessaire de puiser sur la synergie de ces deux approches.

À l'échelle de la ferme, une multitude de mesures peuvent être déployées (Alberti-Dufort *et al.*, 2022 ; Field et Barros, 2014 ; Ouranos, 2015). Pour bénéficier de meilleurs rendements, les agriculteurs peuvent, par exemple, modifier les dates des semis et des récoltes selon l'évolution de la saison de croissance. Ceux-ci pourront aussi choisir les espèces et les cultivars les mieux adaptés aux nouvelles conditions climatiques. Il sera possible de s'inspirer des variétés qui sont cultivées dans des régions aux conditions similaires. Ou

encore, en fonction de la disponibilité, il serait judicieux de choisir des cultivars plus tolérants à certaines maladies, aux extrêmes de température, aux conditions hivernales plus douces (dans le cas des cultures fourragères) ou au manque d'eau, pour ce qui est des régions plus à risque. Même si la tendance observée est plutôt à la spécialisation, la diversification des cultures constitue également un outil efficace de gestion des risques vis-à-vis des aléas climatiques, sans compter qu'il s'agit d'une approche utile pour la lutte intégrée contre les ennemis des cultures. Pour atténuer les effets négatifs causés par les excès de pluie ou les périodes de sécheresse, certaines pratiques de conservation des sols et d'irrigation sont également possibles. Enfin, sans vouloir trop s'y attarder, différentes avancées technologiques, telles que la modification génétique ou les outils d'agriculture de précision, sont aussi considérées comme des solutions pour faire face aux changements climatiques futurs (Pépin, 2020 ; Pörtner *et al.*, 2022).

Si ultimement, la décision de s'adapter revient aux producteurs, les institutions auront également un rôle primordial à jouer pour renforcer la capacité d'adaptation du secteur agricole (Field et Barros, 2014 ; Ouranos, 2015). Par exemple, en appuyant des activités de recherche et de développement, au niveau des programmes de soutien ou par rapport aux lois et règlements. Bref, la réalisation du plein potentiel des changements climatiques dépendra de l'ensemble des mesures qui seront déployées par les différents intervenants du milieu.

#### **5.4 Nouvelles réalités agricoles**

Au regard de l'ensemble des effets qui seront potentiellement occasionnés par les changements climatiques et des mesures d'adaptations qui seront déployées, il est certain que de nouvelles réalités émergeront au sein du secteur. D'une part, sous un climat modifié, des changements seront perceptibles au niveau du choix des cultures. En effet, les agriculteurs risquent de sélectionner les espèces et les variétés les plus performantes, laissant présager que les cultures les moins productives seront délaissées. Par exemple, compte tenu des projections, le développement du soya et du maïs-grain pourrait se faire au détriment de l'orge et du blé. Pareillement, on s'attendre à l'essor de la production de la pomme et probablement aussi de celle du vin, une culture qui connaît d'ailleurs un engouement grandissant depuis quelques années (Keable, 2019a). Il y a fort à parier que certains agriculteurs profiteront des changements climatiques pour exploiter des espèces jusqu'à maintenant peu ou pas cultivées au Québec. Par le fait même, la nécessité de renforcer la résilience du secteur face aux aléas climatiques favorisera peut-être la diversification des espèces exploitées.

En climat futur, les résultats démontrent que les régions plus au nord bénéficieront davantage des changements climatiques que le reste du Québec. Pour cette raison, ces premières gagneront à développer d'autres cultures que celles qui s'y trouvent présentement et peut-être même exploiter de nouvelles terres si les sols le permettent. En même temps, les régions plus au sud devront adapter leurs productions pour éviter les risques de stress thermique et hydrique. En réponse à ces changements, la répartition des aires de productions pourrait être transformée. On pourrait voir un déplacement général des cultures vers les régions plus fraîches. Néanmoins, le climat futur ne sera pas suffisamment modifié pour considérer une expansion majeure vers le nord du Québec, mais il y a là un potentiel intéressant étant donné que l'écoumène agricole actuel est assez limité.

Plus largement, les futures conditions climatiques viendront certainement bouleverser les dynamiques de marché. Compte tenu des nombreuses occasions qui se présenteront, la position du secteur québécois face à ces compétiteurs risque de changer favorablement, du moins, pour certaines cultures. Toutefois, cette opportunité dépendra de la façon dont les deux parties seront affectées par le climat futur, c'est-à-dire de l'ampleur des changements climatiques et de la capacité d'adaptation des producteurs agricoles, sans compter tous les autres facteurs socio-économiques et politiques qui entrent en jeu.

## CONCLUSION

En regard des changements climatiques futurs, l'agriculture et plus spécifiquement les productions végétales, sont particulièrement à risque d'en subir les effets. Au Québec, on anticipe que certains de ces impacts seront positifs tandis que d'autres seront bénéfiques pour le secteur. Cet essai avait pour objectif de mettre en lumière les principales opportunités qui seront engendrées par le dérèglement climatique au Québec au cours des prochaines décennies. D'abord, des conditions de croissance plus longues et plus chaudes, combinées à l'accroissement des concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub>, seront favorables au rendement de plusieurs cultures comme le maïs-grain, le soya ainsi que certaines espèces fourragères telles que la luzerne et la fléole des prés. Ensuite, les arbres fruitiers, comme les pommiers et les vignes, bénéficieront de conditions plus douces tout au long de l'année. À condition que les sols le permettent, le futur contexte climatique permettra aussi d'étendre la production vers le nord et d'introduire de nouvelles cultures et variétés dans des régions où le climat est présentement limitant. Enfin, la position concurrentielle du secteur agricole québécois devrait tirer avantage des changements climatiques, notamment sur le marché de la pomme et du maïs. Ces conclusions doivent toutefois être considérées dans un contexte plus large. Compte tenu du nombre et de la complexité inhérente des interactions au sein des écosystèmes agricoles, il est difficile de savoir si le bilan final sera positif ou négatif. En effet, l'impact des changements climatiques sur d'autres facteurs de risques pourrait restreindre le potentiel de ces gains, ce qui vient renforcer l'importance de poursuivre les efforts d'atténuation d'émissions de gaz à effet de serre en vue de limiter le réchauffement global. Le contexte socio-économique du Québec et de ses différentes régions aura également une grande influence dans la capacité des cultivateurs à maximiser les bénéfices. L'évolution des marchés domestiques et internationaux, le développement technologique, la relève agricole, l'accès au financement et la réglementation en matière d'environnement sont tous des facteurs pouvant influencer le potentiel agroclimatique futur. De nouvelles mesures d'adaptation s'avéreront nécessaires pour limiter les conséquences et mettre en valeur les bénéfices, tant à l'échelle de la ferme que des institutions. En somme, il est évident que ces changements engendreront de nouvelles dynamiques agricoles. Le défi sera de bien s'adapter tout en minimisant les impacts sur l'environnement, mais surtout, de développer la résilience du secteur face aux risques climatiques et socio-environnementaux.

## RÉFÉRENCES

- Alberti-Dufort, A., Ing, M., Crouhen, V. B., Demers-Bouffard, D., Hennigs, R., Legault, S. et Cunningham, J. (2022). Chapitre 2 : Québec. Dans *Le Canada dans un climat en changement: rapport sur les perspectives régionales* (Gouvernement du Canada, p. 127).  
[https://changingclimate.ca/site/assets/uploads/sites/4/2020/11/QC\\_CHAPITRE\\_FR\\_v7.pdf](https://changingclimate.ca/site/assets/uploads/sites/4/2020/11/QC_CHAPITRE_FR_v7.pdf)
- Allan, R. P., Cassou, C., Chen, D., Cherchi, A., Connors, L., Doblus-Reyes, F. J., Douville, H., Driouech, F., Edwards, T. L., Fischer, E., Flato, G. M., Forster, P., AchutaRao, K. M., Adhikary, B., Aldrian, E. et Armour, K. (2021). Summary for Policymakers. Dans IPCC (dir.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, p. 32). Cambridge University Press.  
[https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf)
- Atlas agroclimatique du Québec*. (2012). <https://www.agrometeo.org/atlas/>
- Behiels, M. D. (2020, 15 mai). Quebec. Dans *Encyclopedia Britannica*. Récupéré le 30 juillet 2021 de <https://www.britannica.com/place/Quebec-province>
- Bélanger, G. et Bootsma, A. (2002). Impacts des changements climatiques sur l'agriculture au Québec. 65e Congrès de l'Ordre des agronomes du Québec.  
[https://www.agrireseau.net/documents/Document\\_96147.pdf](https://www.agrireseau.net/documents/Document_96147.pdf)
- Bélanger, G., Castonguay, Y., Bertrand, A., Dhont, C., Rochette, P., Couture, L., Drapeau, R., Mongrain, D., Chalifour, F.-P. et Michaud, R. (2006). Winter damage to perennial forage crops in eastern Canada: Causes, mitigation, and prediction. *Canadian Journal of Plant Science*, 86(1), 33-47.  
<https://doi.org/10.4141/P04-171>
- Berteaux, D., Casajus, N. et De Blois, S. (2014a). Chapitre 3 : L'importance biologique des changements climatiques. Dans *Changements climatiques et biodiversité du Québec : Vers un nouveau patrimoine naturel*. Les Presses de l'Université du Québec.
- Berteaux, D., Casajus, N., de Blois, S. et Logan, T. (2014b). Chapitre 2 : Les climats du Québec. Dans *Changements climatiques et biodiversité du Québec: Vers un nouveau patrimoine naturel*. Les Presses de l'Université du Québec.  
<http://ebookcentral.proquest.com/lib/uqam/detail.action?docID=4796990>
- Bonsal, B. R., Wheaton, E. E., Chipanshi, A. C., Lin, C., Sauchyn, D. J. et Wen, L. (2011). Drought Research in Canada: A Review. *Atmosphere-Ocean*, 49(4), 303-319.  
<https://doi.org/10.1080/07055900.2011.555103>
- Bootsma, A., Anderson, D. et Gameda, S. (2004). *Impacts potentiels du changement climatique sur les indices agroclimatiques dans les régions du sud de l'Ontario et du Québec* (Contribution du CRECO no 03-284) [Bulletin technique]. Centre de recherches de l'Est sur les céréales et oléagineux (CRECO).  
[https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/bootsma\\_on\\_qc\\_ind.pdf](https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/bootsma_on_qc_ind.pdf)

- Bootsma, A., Gameda, S. et McKenney, D. W. (2005a). Impacts of potential climate change on selected agroclimatic indices in Atlantic Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, 85(2), 329-343. <https://doi.org/10.4141/S04-019>
- Bootsma, A., Gameda, S. et McKenney, D. W. (2005b). Potential impacts of climate change on corn, soybeans and barley yields in Atlantic Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, 85(2), 345-357. <https://doi.org/10.4141/S04-025>
- Boudreau, Y. (2019). Une ferme vaut en moyenne 2,8 M\$ au Québec. *BioClips*, 27(7). [https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/BioClips2019/Volume27\\_no7.pdf](https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/BioClips2019/Volume27_no7.pdf)
- Brassard, J. et Singh, B. (2007). Effects of climate change and CO2 increase on potential agricultural production in Southern Québec, Canada. *Climate Research*, 34, 105-117. <https://doi.org/10.3354/cr034105>
- Brodeur, J., Boivin, G., Bourgeois, G., Cloutier, C., Doyon, J., Grenier, P. et Gagnon, A.-È. (2013). *Impact des changements climatiques sur le synchronisme entre les ravageurs et leurs ennemis naturels : conséquences sur la lutte biologique en milieu agricole au Québec*. Ouranos.
- Brown, R. D. (2010). Analysis of snow cover variability and change in Québec, 1948–2005. *Hydrological Processes*, 24(14), 1929-1954. <https://doi.org/10.1002/hyp.7565>
- Bush, E. et Lemmen, D. S. (2019). *Rapport sur le climat changeant du Canada*. Environnement et changement climatique Canada. [http://publications.gc.ca/collections/collection\\_2019/eccc/En4-368-2019-fra.pdf](http://publications.gc.ca/collections/collection_2019/eccc/En4-368-2019-fra.pdf)
- CAAQ. (2008). *Agriculture et agroalimentaire : assurer et bâtir l'avenir - Propositions pour une agriculture durable et en santé*. Commission sur l'avenir de l'agriculture et de l'agroalimentaire québécois. [http://www.caaq.gouv.qc.ca/userfiles/File/Dossiers%2012%20fevrier/RapportFr\\_basse.pdf](http://www.caaq.gouv.qc.ca/userfiles/File/Dossiers%2012%20fevrier/RapportFr_basse.pdf)
- Cameron, D. (2021, 15 février). Les petites fermes poussent. *La Presse*, Actualités. <https://www.lapresse.ca/actualites/2021-02-15/les-petites-fermes-poussent.php>
- Chakraborty, S. (2013). Migrate or evolve: options for plant pathogens under climate change. *Global Change Biology*, 19(7), 1985-2000. <https://doi.org/10.1111/gcb.12205>
- Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichet, T., Gao, X., Jr, W. J. G., Johns, T., Krinner, G., Shongwe, M., Weaver, A. J., Wehner, M., Allen, M. R., Andrews, T., Beyerle, U., Bitz, C. M., Bony, S., Booth, B. B. B., Brooks, H. E., ... Tett, S. (2013). Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. Dans *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_Chapter12\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter12_FINAL.pdf)
- Couture, C. (2021). Québec. Dans *Encyclopédie Canadienne*. Récupéré le 27 septembre 2023 de <https://www.thecanadianencyclopedia.ca/fr/article/quebec>
- CPTAQ. (2007). *Historique*. <http://www.cptaq.gouv.qc.ca/index.php?id=28&MP=74-147>

- Debailleul, G., Tamini, L. D., Doyon, M., Clerson-Guicherd, F., Jacques, L.-S., Hernandez, M., Olar, M., Louvel, J. et Consultants, E. (2013). *Analyse prospective de la position concurrentielle du Québec en matière de production agricole dans un contexte de changements climatiques*, 193.
- Desjarlais, C., Blondlot, A., Allard, M., Chaumont, D., Gosselin, P., Houle, D. et Larrivée, C. (2010). *Savoir s'adapter aux changements climatiques*. <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/2052216>
- Dirmeyer, P. A., Jin, Y., Singh, B. et Yan, X. (2013). Evolving land–atmosphere interactions over North America from CMIP5 simulations. *Journal of Climate*, 26(19), 7313–7327. [https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/26/19/jcli-d-12-00454.1.xml?tab\\_body=abstract-display](https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/26/19/jcli-d-12-00454.1.xml?tab_body=abstract-display)
- Dubé, P.-A. (2002). Évaluation du zonage agroclimatique québécois au cours du prochain siècle. 65e Congrès de l'Ordre des agronomes du Québec. <https://www.agrireseau.net/agroclimatologie/documents/62434/evaluation-du-zonage-agroclimatique-quebecois-au-cours-du-prochain-siecle>
- Encyclopædia Universalis. (s. d.). CLIMATS (notions de base). Dans *Encyclopædia Universalis*. Encyclopædia Universalis. Récupéré le 8 février 2023 de <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/climats-notions-de-base/>
- Field, C. B. et Barros, V. R. (2014). *Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability Working Group II contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental panel on climate change*. Cambridge university press.
- Gagnon, A.-È., Roy, M. et Roy, A. (2013). *Impacts directs et indirects des changements climatiques sur les ennemis des cultures* [Document synthèse]. Ouranos. [https://agriclimat.ca/wp-content/uploads/2018/10/2.-Impacts-directs-et-indirects-des-CC-sur-les-ennemis-des-cultures\\_Gagnon-et-al.pdf](https://agriclimat.ca/wp-content/uploads/2018/10/2.-Impacts-directs-et-indirects-des-CC-sur-les-ennemis-des-cultures_Gagnon-et-al.pdf)
- Garneau, J. (2019). Revenus d'exploitation des entreprises agricoles de petite taille. *BioClips*, 27(35), 2. [https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/BioClips2019/Volume\\_27\\_no\\_35.pdf](https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/BioClips2019/Volume_27_no_35.pdf)
- Gouvernement du Québec. (2021). *Industrie agricole au Québec*. <https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/agriculture/industrie-agricole-au-quebec>
- Gouvernement du Québec. (2022). *Géographie du territoire québécois*. <https://www.quebec.ca/gouvernement/portrait-quebec/geographie-territoire>
- Hatfield, J. L., Boote, K. J., Kimball, B. A., Ziska, L. H., Izaurralde, R. C., Ort, D., Thomson, A. M. et Wolfe, D. (2011). Climate Impacts on Agriculture: Implications for Crop Production. *Agronomy Journal*, 103(2), 351-370. <https://doi.org/10.2134/agronj2010.0303>
- Held, I. M. et Soden, B. J. (2006). Robust Responses of the Hydrological Cycle to Global Warming. *Journal of Climate*, 19(21), 5686-5699. <https://doi.org/10.1175/JCLI3990.1>
- Houle, D., Harvey, R., Logan, T. et Duchesne, L. (2014). *Développement d'indicateurs hydro-climatiques : projection des changements de température et d'humidité des sols forestiers et de leurs impacts*

*potentiels sur la fertilité des sols*. Ouranos. <https://www.ouranos.ca/fr/projets-publications/indicateurs-hydroclimatiques-sols-forestiers>

Institut de la statistique du Québec et MAPAQ. (2022). *Profil sectoriel de l'industrie bioalimentaire au Québec - Édition 2021*, 135.

ISQ. Le Québec chiffres en main 2022. Gouvernement du Québec. <https://statistique.quebec.ca/fr/fichier/le-quebec-chiffres-en-main-edition-2022.pdf> 2022.

Jing, Q., Bélanger, G., Qian, B. et Baron, V. (2013). Timothy Yield and Nutritive Value under Climate Change in Canada. *Agronomy Journal*, 105(6), 1683-1694. <https://doi.org/10.2134/agronj2013.0195>

Jing, Q., Bélanger, G., Qian, B. et Baron, V. (2014). Timothy yield and nutritive value with a three-harvest system under the projected future climate in Canada. *Canadian Journal of Plant Science*, 94(2), 213-222. <https://doi.org/10.4141/cjps2013-279>

Jobin, B., Beaulieu, J., Grenier, M., Bélanger, L. et Maisonneuve, C. (2004). Les paysages agricoles du Québec méridional. *Le naturiste canadien*, 128(2), 8. <https://www.researchgate.net/publication/237835442>

Joubert, J.-L., Rougier, H. et Soron, A. (s. d.). QUÉBEC. Dans *Encyclopædia Universalis*. Encyclopædia Universalis. Récupéré le 12 septembre 2022 de <http://www.universalis.edu.com/encyclopedie/quebec/>

Keable, S. (2019a). Les vins du Québec : Les consommateurs en redemandent! *BioClips*, 27(3). [https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/BioClips2019/Volume\\_27\\_no\\_3.pdf](https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/BioClips2019/Volume_27_no_3.pdf)

Keable, S. (2019b). Quinoa, chou vert frisé et camerise : des cultures émergentes qui occupent de plus en plus de superficie au pays. *BioClips*, 27(2). [https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/BioClips2019/Volume\\_27\\_no\\_2.pdf](https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/BioClips2019/Volume_27_no_2.pdf)

Lease, N., Pichette, A. et Chaumont, D. Projet d'étude sur l'adaptation aux changements climatiques du secteur de la pomme au Québec. Direction de l'agroenvironnement et du développement durable. [https://agriclimat.ca/wp-content/uploads/2018/10/1.-Rapport\\_Adaptation\\_Pomme\\_2009.pdf](https://agriclimat.ca/wp-content/uploads/2018/10/1.-Rapport_Adaptation_Pomme_2009.pdf) 2009.

Lepage, M.-P., Bélanger, G., Bourgeois, G., Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) et Commission agrométéorologie. Indices agrométéorologiques pour l'aide à la décision dans un contexte de climat variable et en évolution. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. [http://epe.lac-bac.gc.ca/100/200/300/craaq/indices\\_agrometeorologiques/indices\\_agrometeo103.pdf](http://epe.lac-bac.gc.ca/100/200/300/craaq/indices_agrometeorologiques/indices_agrometeo103.pdf) 2012.

Lobell, D. B. et Gourdjji, S. M. (2012). The Influence of Climate Change on Global Crop Productivity. *Plant Physiology*, 160(4), 1686-1697. <https://doi.org/10.1104/pp.112.208298>

- Logan, T., Charron, I., Chaumont, D. et Houle, D. Atlas de scénarios climatiques pour la forêt québécoise. Ouranos et MRNF. <https://agriclimat.ca/wp-content/uploads/2018/10/1.-Atlas-climatique-for%C3%AAt.pdf> 2011.
- Mailhot, A., Duchesne, S., Caya, D. et Talbot, G. (2007). Assessment of future change in intensity–duration–frequency (IDF) curves for Southern Quebec using the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of Hydrology*, 347(1-2), 197-210. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.09.019>
- MAPAQ. (2013). *Politique de souveraineté alimentaire*. [https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Politique\\_Souverainete\\_Alimentaire.pdf](https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Politique_Souverainete_Alimentaire.pdf)
- MAPAQ. (2017). *Portrait diagnostique sectoriel des légumes frais au Québec*. <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Portraitsectoriellegumesfrais.pdf>
- MAPAQ. (2018). *Portrait-diagnostic sectoriel de l'industrie des légumes de serre*. [https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Portaitdiagnosticdeslegumesdeserre\\_final.pdf](https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Portaitdiagnosticdeslegumesdeserre_final.pdf)
- MAPAQ. (2019). *Portrait-diagnostic sectoriel de l'industrie de la pomme de terre au Québec*.
- MAPAQ. (2020a). *Agriculture*. MAPAQ. <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/md/statistiques/Pages/production.aspx>
- MAPAQ. (2020b). *Portrait-diagnostic sectoriel de l'industrie des grains au Québec*.
- MAPAQ. (2020c). *Profil régional de l'industrie bioalimentaire au Québec : Estimations pour 2019*. Gouvernement du Québec.
- MAPAQ. Recettes monétaires agricoles au Québec, de 2010 à 2019. <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/md/statistiques/Pages/production.aspx> 2020.
- Mekis, É. et Vincent, L. A. (2011). An Overview of the Second Generation Adjusted Daily Precipitation Dataset for Trend Analysis in Canada. *Atmosphere-Ocean*, 49(2), 163-177. <https://doi.org/10.1080/07055900.2011.583910>
- MELCC. (2022). *Normales climatiques 1981-2010 - Climat du Québec*. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatique. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/climat/normales/climat-qc.htm>
- MELCC. (2023). *L'eau au Québec : une ressource à protéger*. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/inter.htm>
- Michaud, A., Gombault, C., Cyr, J.-F. et Côté, H. Implications des scénarios climatiques futurs sur la gestion des sols et de l'eau à la ferme.pdf. CRAAQ. 2012.
- Moiroux, J., Bourgeois, G., Brodeur, J., Gagnon, A.-È., Gendron St-Marseille, A.-F. et Mimee, B. (2014). *Quels enjeux représentent les changements climatiques en lien avec les espèces exotiques envahissantes pour la culture du soya au Québec ?* [Fiche technique Ouranos]. Ouranos.

- Myers, S. S., Zanobetti, A., Kloog, I., Huybers, P., Leakey, A. D. B., Bloom, A. J., Carlisle, E., Dietterich, L. H., Fitzgerald, G., Hasegawa, T., Holbrook, N. M., Nelson, R. L., Ottman, M. J., Raboy, V., Sakai, H., Sartor, K. A., Schwartz, J., Seneweera, S., Tausz, M. et Usui, Y. (2014). Increasing CO2 threatens human nutrition. *Nature*, 510(7503), 139-142. <https://doi.org/10.1038/nature13179>
- Organisation Météorologique Mondiale. (2016, 27 mai). *FAQs - Climate*. <https://public.wmo.int/en/about-us/frequently-asked-questions/climate>
- Ouranos (dir.). (2015). *Vers l'adaptation: synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec* (2015<sup>e</sup> éd.). Ouranos. <https://www.ouranos.ca/synthese-2015/>
- Ouranos. (2022). *À propos d'Ouranos*. Ouranos. <https://www.ouranos.ca/ouranos/>
- Paquin, D., De Elia, R. et Frigon, A. (2014). Change in North American Atmospheric Conditions Associated with Deep Convection and Severe Weather using CRCM4 Climate Projections. *Atmosphere-Ocean*, 52(3), 175-190. <https://doi.org/10.1080/07055900.2013.877868>
- Pépin, P. (2020). *L'adaptation aux changements climatiques en agriculture : Identification des pratiques et des technologies permettant d'augmenter la résilience des productions végétales du Québec* [Mémoire, Sherbrooke]. [https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/17652/Pepin\\_Pascal\\_MEnv\\_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/17652/Pepin_Pascal_MEnv_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Pierre, G. (2015). *Portrait de l'agriculture nordique au Québec dans un contexte de changements climatiques* [Essai, Université de Sherbrooke]. [https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/8016/Pierre\\_Gaetan\\_MEnv\\_2015.pdf](https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/8016/Pierre_Gaetan_MEnv_2015.pdf)
- Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Poloczanska, E. S., Mintenbec, K., Tignor, M., Alegria, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., Möller, V. et Okem, A. (2022). Summary For Policy makers. Dans IPCC, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Cambridge University Press. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGII\\_SummaryForPolicymakers.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf)
- Qian, B., Gameda, S., Zhang, X. et De Jong, R. (2012). Changing growing season observed in Canada. *Climatic Change*, 112(2), 339-353. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0220-8>
- Qian, B., Zhang, X., Chen, K., Feng, Y. et O'Brien, T. (2010). Observed Long-Term Trends for Agroclimatic Conditions in Canada. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(4), 604-618. <https://doi.org/10.1175/2009JAMC2275.1>
- Rapaic, M. (2012). *Atlas de la Biodiversité du Québec nordique : Analyses et scénarios climatiques*. Ouranos. <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1130102.pdf>
- Ray, D. K., Gerber, J. S., MacDonald, G. K. et West, P. C. (2015). Climate variation explains a third of global crop yield variability. *Nature Communications*, 6(1), 5989. <https://doi.org/10.1038/ncomms6989>

- Rixen, C., Høye, T. T., Macek, P., Aerts, R., Alatalo, J. M., Anderson, J. T., Arnold, P. A., Barrio, I. C., Bjerke, J. W., Björkman, M. P., Blok, D., Blume-Werry, G., Boike, J., Bokhorst, S., Carbognani, M., Christiansen, C. T., Convey, P., Cooper, E. J., Cornelissen, J. H. C., ... Zong, S. (2022). Winters are changing: snow effects on Arctic and alpine tundra ecosystems. *Arctic Science*, 8(3), 572-608. <https://doi.org/10.1139/as-2020-0058>
- Rochette, P., Bélanger, G., Castonguay, Y., Bootsma, A. et Mongrain, D. (2004). Climate change and winter damage to fruit trees in eastern Canada. *Canadian Journal of Plant Science*, 84(4), 1113-1125. <https://doi.org/10.4141/P03-177>
- Roy, P., Grenier, P., Barriault, E., Logan, T., Blondlot, A., Bourgeois, G. et Chaumont, D. (2017). Probabilistic climate change scenarios for viticultural potential in Québec. *Climatic Change*, 143(1-2), 43-58. <https://doi.org/10.1007/s10584-017-1960-x>
- Ruiz, J. et Domont, G. (2005). Les paysages de l'agriculture en mutation. *Paysages et Perspectives*, 47-97. [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/36794191/ruiz\\_domon1-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1648839655&Signature=TNKs0noDVwUdCQrxTqn0X06943zBWEEPR0h8wan04Mlv0vNRe-TredGeY54O2qpzSYIqUkixOb95eMPsGBvdEYbltZcdKgCGmSi1ZmYnVDbtwrvddm8sA4s4K24CXF4bUSG9gsPOebVPSZcbzg80AiJaGxhB9~C-F4qG2rYhE80oQuNfTzIpcRDgnSk1N3SdK3Q7jPxea7Lgszj5CAPX3ypxoSDwKgPqSwe-Jj8q4L1IRUqjtJZCq1H8NfvQJURHPZR1Zgnlk3~QxuJ8M8tabqEN6Yg5JM53wugclUbEn~Cl1uzJ6fitX-Ej2nmsTDJ8MbJvn7khYmRXskFib4AviA\\_\\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/36794191/ruiz_domon1-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1648839655&Signature=TNKs0noDVwUdCQrxTqn0X06943zBWEEPR0h8wan04Mlv0vNRe-TredGeY54O2qpzSYIqUkixOb95eMPsGBvdEYbltZcdKgCGmSi1ZmYnVDbtwrvddm8sA4s4K24CXF4bUSG9gsPOebVPSZcbzg80AiJaGxhB9~C-F4qG2rYhE80oQuNfTzIpcRDgnSk1N3SdK3Q7jPxea7Lgszj5CAPX3ypxoSDwKgPqSwe-Jj8q4L1IRUqjtJZCq1H8NfvQJURHPZR1Zgnlk3~QxuJ8M8tabqEN6Yg5JM53wugclUbEn~Cl1uzJ6fitX-Ej2nmsTDJ8MbJvn7khYmRXskFib4AviA__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA)
- Seneviratne, S. I., Nicholls, N., Easterling, D., Goodess, C. M., Kanae, S., Kossin, J., Luo, Y., Marengo, J., McInnes, K., Rahimi, M., Reichstein, M., Sorteberg, A., Vera, C., Zhang, X., Rusticucci, M., Semenov, V., Alexander, L. V., Allen, S., Benito, G., ... Zwiers, F. W. (2012). Changes in Climate Extremes and their Impacts on the Natural Physical Environment. Dans C. B. Field, V. Barros, T. F. Stocker et Q. Dahe (dir.), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* (p. 109-230). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.006>
- Sillmann, J., Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X. et Bronaugh, D. (2013). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(6), 2473-2493. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50188>
- Statistique Canada. (2017a). *Tableau 32-10-0164-01 Capital agricole, revenus d'exploitation et dépenses d'exploitation, données chronologiques du Recensement de l'agriculture*. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=3210016401>
- Statistique Canada. (2017b, 10 mai). *Données sur les exploitations et les exploitants agricoles*. Statistique Canada. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/95-640-x/2016001/article/14804-fra.htm>
- Statistique Canada. (2017c, 10 mai). *Tableau 32-10-0414-01 Produits biologiques, Recensement de l'agriculture, 2011 et 2016, inactif*. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=3210041401>

- Statistique Canada. (2019, 4 juin). *Québec – Type de ferme dominant par revenus agricoles bruts, division de recensement (DR), 2016*. Récupéré le 6 avril 2022 de <https://www150.statcan.gc.ca/n1/pub/95-634-x/2017001/article/54907/catm-ctra-005-fra.htm>
- Statistique Canada. (2022a). *Tableau 32-10-0152-01 Nombre et superficie des fermes et mode d'occupation des terres agricoles, données chronologiques du Recensement de l'agriculture, 1921 à 2016*. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=3210015201>
- Statistique Canada. (2022b, 11 mai). *Tableau 32-10-0249-01 Utilisation des terres, Recensement de l'agriculture, 2021*. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=3210024901>
- Statistique Canada. (2022c, 11 mai). *Tableau 32-10-0363-01 Produits biologiques, Recensement de l'agriculture, 2021*. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/tv.action?pid=3210036301>
- Tamini, L. D., Clerson, F., Doyon, M. et Debailleul, G. (2015). The impact of climate change on the competitiveness of some crops in Quebec. *Cahiers Agricoles*, 24(5), 261-268. <https://doi.org/10.1684/agr.2015.0766>
- Tapsoba, D., Fortin, V., Anctil, F. et Haché, M. (2005). Apport de la technique du krigeage avec dérive externe pour une cartographie raisonnée de l'équivalent en eau de la neige : Application aux bassins de la rivière Gatineau. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(1), 289-297. <https://doi.org/10.1139/I04-110>
- Thivierge, M.-N., Jégo, G., Bélanger, G., Bertrand, A., Tremblay, G. F., Rotz, C. A. et Qian, B. (2016). Predicted Yield and Nutritive Value of an Alfalfa–Timothy Mixture under Climate Change and Elevated Atmospheric Carbon Dioxide. *Agronomy Journal*, 108(2), 585-603. <https://doi.org/10.2134/agronj2015.0484>
- Thivierge, M.-N., Jégo, G., Bélanger, G., Chantigny, M. H., Rotz, C. A., Charbonneau, É., Baron, V. S. et Qian, B. (2017). Projected impact of future climate conditions on the agronomic and environmental performance of Canadian dairy farms. *Agricultural Systems*, 157, 241-257. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.07.003>
- van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.-F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S. J. et Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1), 5. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Vincent, L. A., Wang, X. L., Milewska, E. J., Wan, H., Yang, F. et Swail, V. (2012). A second generation of homogenized Canadian monthly surface air temperature for climate trend analysis. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D18). <https://doi.org/10.1029/2012JD017859>
- Zombre, U. (2019). Le secteur agricole au Québec : Quelques grandes tendances à la lumière des quatre derniers recensements de l'agriculture. *BioClips*, 27(28). [https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/BioClips2019/Volume\\_27\\_no\\_28.pdf](https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/BioClips2019/Volume_27_no_28.pdf)