

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES : MESURES ET
INNOVATIONS TECHNOLOGIQUES, SOCIO-ÉCONOMIQUES ET
INSTITUTIONNELLES RENFORÇANT LA RÉSILIENCE DU SYSTÈME
AGRICOLE AU QUÉBEC.

ÉSSAI
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR
WASSIM ROUKOS

AVRIL 2025

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. 12-2023). 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.»

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX.....	V
LISTE DES ANNEXES	VI
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES.....	VII
RÉSUMÉ.....	VIII
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1	4
MISE EN CONTEXTE, PROBLEMATIQUE ET QUESTION DE RECHERCHE.....	4
1.1 - L'agriculture au Québec : Entre responsabilité, vulnérabilité et solutions face aux	4
changements climatiques.....	4
1.2 - Question de l'essai	5
CHAPITRE 2	7
CADRE THÉORIQUE.....	7
2.1- Vulnérabilité.....	7
2.2 - Atténuation.....	9
2.3 - Adaptation.....	10
2.4 - Résilience.....	12
CHAPITRE 3	14
MÉTHODOLOGIE ET OBJECTIFS DE L'ESSAI.....	14
3.1- Objectif principal de l'essai	14
3.2- Objectifs spécifiques de l'essai.....	15
3.3 - Méthodologie.....	16
CHAPITRE 4	18
RÉSULTATS ET ANALYSE CRITIQUE.....	18
4.1 - Facteurs de vulnérabilité du système agricole en général.....	18
4.1.1- Vulnérabilité aux facteurs climatiques.....	19
4.1.2- Vulnérabilité aux facteurs socio-économiques :.....	20
4.1.2.1 - Agriculture industrielle intensive	20
4.1.2.2 - Incertitudes des modèles et scénarios climatiques	20
4.1.2.3 - Complexité des politiques et des stratégies nationaux et locaux.....	22
4.1.2.4 - La gouvernance	22

4.1.2.5 - Capacité d'adaptation	23
4.2 - Impacts des changements climatiques sur l'agriculture québécoise: opportunités et menaces	24
4.2.1 - Effets directs.....	24
4.2.1.1 – Températures.....	24
4.2.1.2 - Précipitation.....	25
4.2.1.3- Concentration élevée en CO ₂ atmosphérique.....	27
4.2.2 - Effets indirects	28
4.2.2.1 - Ravageurs.....	28
4.2.2.2 - Agents pathogènes et maladies	30
4.2.2.3 – Plantes adventices	31
4.2.3 - Impacts économiques : opportunités et menaces	33
4.3 - Atténuation et adaptation.....	35
4.3.1- Interdépendance des mesures d'atténuation et d'adaptation	35
4.3.2- Caractérisation des mesures d'adaptation	36
4.3.3 - Classifications des mesures d'adaptation par catégories.....	37
4.4- Adaptation et résilience : vers une agriculture durable.....	40
4.4.1 - Adaptation des techniques liées aux pratiques agricoles	41
4.4.1.1 - Pratiques de conservation des sols.....	41
4.4.1.2 - Pratiques agroécologiques par l'agroforesterie	49
4.4.1.3 - Gestion intégrée des ennemis des cultures	52
4.4.1.4 - Agriculture intelligente et technologies de précision.....	54
4.4.1.5 - Agriculture bio-intensive.....	58
4.4.1.6 - Gestion technique et politique de l'eau	60
4.4.1.7 - Gestion des cultures	64
4.5 - Mesures d'adaptation socio-économiques et institutionnelles.....	66
4.5.1 - Végétalisation des régimes alimentaires et demande élevée en produits biologiques ;	66
4.5.2- Agriculture urbaine et développement des communautés nourricières	68
4.5.3- Gestion intégrée des ressources en eau (GIRE)	70
4.5.4- Assurance agricole	71
4.5.5- Services climatologiques (information, alerte précoce, sensibilisation).....	73
4.5.6 - Éducation , sensibilisation et diffusion de l'information.....	74
4.5.7 - Planification et action publique	76
4.5.8 - Soutien financier et renforcement des capacités.....	78

DISCUSSION	80
CONCLUSION	84
RÉFÉRENCES	86
ANNEXES	109

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure 2.1	Types d'adaptation de l'agriculture en fonction des niveaux du changement climatique.....	17
Figure 4.1	Impact de l'augmentation du CO ₂ sur le taux photosynthétique des plantes C3	37
Figure 4.2	Les étapes du cycle de l'agriculture intelligente basée sur les données...	54
Tableau 4.1	Impacts positifs et négatifs de l'augmentation de la concentration du CO ₂ atmosphériques sur les insectes et les plantes hôtes	35
Tableau 4.2	Catégories des options d'adaptation aux changements climatiques en agriculture	45
Tableau 4.3	Mesures d'adaptation technologiques et approches politiques et institutionnelles de la gestion de l'eau en agriculture.....	60

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1

Prévisions des impacts des changements climatiques sur les insectes ravageurs au Canada et au Québec à partir de simulations climatiques.....	114
--	-----

Annexe 2

Stratégie de développement des services et de la recherche climatique adoptée par Ouranos et développée par le centre ESCER de l'UQAM.....	115
---	-----

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET ACRONYMES

AEI	Agriculture écologiquement intensive
ASREC	Assurance récolte
A.U.	Agriculture urbaine
Cc	Changements climatiques
CO ₂	Dioxyde de carbone
FADQ	Finance agricole du Québec
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GIRE	Gestion intégrée des ressources en eau
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
MELCCFP	Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs.
OGM	Organisme génétiquement modifié
PAU	Plan d'agriculture urbaine
PELI	Pôle d'excellence en lutte intégrée
PDCN	Plan de développement de communauté nourricière
PCP	Trajectoires de concentrations représentatives
RAP	Réseau d'avertissement phytosanitaire
UPA	Union des producteurs agricoles

RÉSUMÉ

L'agriculture, étant l'une des activités humaines les plus dépendantes des conditions climatiques, subit directement les impacts des changements climatiques. Ces impacts, bien que potentiellement positifs par l'augmentation des températures et du CO₂ dans certaines régions, sont principalement négatifs au Québec, notamment en raison des changements dans les régimes de température et de précipitations. L'agriculture québécoise, tout en étant un contributeur majeur aux émissions de gaz à effet de serre (GES), a également un rôle crucial à jouer dans la réduction de ces émissions afin de limiter l'ampleur du changement climatique. De plus, l'augmentation de la demande alimentaire mondiale exerce une pression supplémentaire sur les systèmes agricoles, qui doivent devenir plus productifs tout en réduisant leur empreinte environnementale.

Dans ce contexte, cette analyse a pour objectif d'identifier les menaces et les opportunités liées aux effets des changements climatiques sur la production agricole au Québec, en particulier sur les grandes cultures, les cultures maraîchères et fruitières. Elle explore aussi les facteurs de vulnérabilité socio-économiques et techniques face aux aléas climatiques, et propose des mesures d'adaptation et des innovations techniques, économiques, sociales et institutionnelles pour renforcer la résilience du secteur agricole face aux variations climatiques.

L'étude repose sur une revue de littérature scientifique narrative, permettant d'analyser de manière critique un ensemble de textes, articles et rapports concernant les impacts climatiques sur l'agriculture. Cette approche permet de dresser un portrait des risques identifiés pour la production agricole au Québec, ainsi que des stratégies d'adaptation existantes et des innovations susceptibles d'améliorer la résilience des exploitations agricoles face aux changements climatiques.

Les résultats de l'étude mettent en évidence que, malgré certaines opportunités offertes par les changements climatiques, telles que l'allongement de la saison de croissance, les risques liés à l'intensification des événements climatiques extrêmes (vagues de chaleur, sécheresses) et aux menaces croissantes des maladies et des ravageurs sont préoccupants pour le secteur agricole québécois. En réponse à ces défis, les stratégies d'adaptation comme l'adoption des pratiques agroécologiques et de conservation ont été identifiées comme essentielles pour renforcer la résilience du secteur. Cependant, la mise en œuvre de ces pratiques nécessite des investissements

importants et un soutien institutionnel adapté. Parallèlement, des actions d'atténuation, telles que la réduction des émissions de GES et l'amélioration de la séquestration du carbone dans les sols, sont également importantes. Une approche intégrée combinant adaptation et atténuation s'avère donc essentielle pour garantir la durabilité et la résilience de l'agriculture québécoise face aux défis climatiques.

Mots clés :

Changements climatiques, vulnérabilité, adaptation, atténuation, pratiques agricoles, technologies, innovation sociale.

INTRODUCTION

Les changements climatiques, avec leurs variabilités croissantes, figurent parmi les problèmes environnementaux les plus pressants auxquels l'humanité est confrontée au 21^e siècle. Les impacts actuels et futurs de ces changements sur l'environnement peuvent affecter les systèmes sociaux et économiques, dont l'agriculture fait partie. Étant donné l'importance du climat comme ressource fondamentale pour l'évolution de l'agriculture, il est non seulement pertinent d'étudier les implications des changements climatiques probables sur l'agriculture—qu'elle soit globale ou locale—mais il est également crucial de déterminer les meilleures options d'adaptation.

Récemment, les mesures d'adaptation aux changements climatiques ont été de plus en plus intégrées dans l'élaboration de politiques plus larges (GIEC, 2014). Malgré les technologies adoptées et la modernisation de l'agriculture dans les pays industrialisés, qui dépendent de moins en moins des facteurs naturels, les bouleversements climatiques pourraient à l'avenir affecter la production agricole. En effet, cela se produit déjà. Les changements climatiques sont susceptibles d'aggraver des problèmes environnementaux préexistants, comme l'érosion des sols, la détérioration de la qualité des terres agricoles et la pollution de l'eau. Ce sont des impacts qui, bien qu'en partie liés aux pratiques agricoles intensives, sont aussi accentués par des phénomènes tels que la montée des températures, les périodes de sécheresse prolongées ou, au contraire, les événements climatiques extrêmes (inondations, tempêtes). Ces changements peuvent rendre certaines terres agricoles moins productives, voire inutilisables à long terme.

Des études de modélisation dans les rapports du GIEC ont évalué l'impact des changements climatiques sur l'agriculture. Une augmentation de la température moyenne mondiale (de 1.5 °C à 5.7 °C) d'ici 2100, conjuguée à des hausses de CO₂ et à des variations dans les précipitations, devrait être bénéfique pour les rendements des cultures dans les zones tempérées comme le Québec et d'autres régions nordiques (GIEC, 2023). Cependant, l'agriculture demeure sensible aux effets du réchauffement climatique, avec des phénomènes courants tels que les sécheresses, les précipitations excessives, les inondations et les maladies. Par conséquent, il est impératif que l'agriculture canadienne, y compris celle du Québec, s'adapte de manière appropriée aux défis posés par les changements climatiques et leur variabilité. En ce sens, de nombreuses études sur

l'agriculture canadienne ont souligné la nécessité et les opportunités d'adaptations planifiées (Bryant et al., 2000).

L'atténuation et la réduction des émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) par le biais de stratégies de capture et de stockage à long terme sont reconnues comme des mesures potentiellement importantes pour contrer les changements climatiques. Pourtant, il est également crucial de prendre en compte l'adaptation aux effets continus des changements climatiques et d'anticiper de nouveaux défis, notamment l'intensification de ces effets à l'avenir. L'importance de l'adaptation a été largement soulignée par de nombreux gouvernements et dans le cadre de négociations internationales (Smit et al., 2000). L'adaptation et l'atténuation doivent aller de pair. Les mesures de lutte contre les changements climatiques et la réduction des émissions par l'atténuation des GES et la réduction de leurs émissions doivent être complétées par des outils de protection contre les impacts négatifs de ces changements, en développant des mesures d'adaptation (OCDE, 2023a).

Sans adaptation, les changements climatiques posent généralement des problèmes pour la production agricole, les économies agricoles et les communautés. L'adaptation peut diminuer la vulnérabilité du système agricole et le préparer aux conditions climatiques changeantes, répondant de manière anticipative aux différents facteurs climatiques et non climatiques. Les facteurs non climatiques, tels que les conditions politiques, sociales, culturelles et économiques, peuvent amplifier et aggraver les risques climatiques, tout comme ils peuvent également les réduire ou les neutraliser (Kandlikar et Risbey, 2000).

Face à cette réalité, cet essai vise à identifier et examiner les opportunités opérationnelles et technologiques qui favorisent l'adaptation aux changements climatiques du secteur de la production agricole et plus précisément la production végétale au Québec. Structuré en quatre chapitres principaux, cet essai commence par une mise en contexte de l'agriculture québécoise, soulignant ses enjeux et définissant la problématique ainsi que les questions de recherche. Le deuxième chapitre établit le cadre théorique de l'étude en définissant les concepts clés. Le troisième chapitre expose la méthodologie utilisée et les objectifs de la recherche. Enfin, le quatrième chapitre présente les analyses et les résultats, décomposés en cinq sous-chapitres qui examinent les prévisions climatiques pour le Québec, la vulnérabilité de l'agriculture aux changements

climatiques, les impacts sur les productions agricoles, , ainsi que les opportunités et les menaces pour le secteur agricole. Cette section explore également les concepts d'atténuation et d'adaptation spécifiques à l'agriculture, mettant en lumière les mesures possibles à travers les technologies et les pratiques agricoles, ainsi que les innovations socio-économiques et institutionnelles qui pourraient renforcer la résilience du système agricole.

CHAPITRE 1

MISE EN CONTEXTE, PROBLEMATIQUE ET QUESTION DE RECHERCHE

1.1 - L'agriculture au Québec : Entre responsabilité, vulnérabilité et solutions face aux changements climatiques

L'agriculture est l'une des activités humaines les plus sensibles aux conditions climatiques. Les changements climatiques influencent les régimes de températures et de précipitations, ils auront nécessairement des impacts sur les productions agricoles, particulièrement sur les cultures végétales (Ouranos, 2015). En effet, Ray et ses collaborateurs estiment que le climat est responsable d'environ un tiers de la variabilité des rendements mondiaux des cultures, principalement en raison des fluctuations de température et de précipitations (Ray et al., 2015). D'un côté, l'agriculture est extrêmement vulnérable aux effets des changements climatiques, menaçant ainsi la sécurité alimentaire de millions de personnes à travers le monde (FAO, 2015).

D'un autre côté, le secteur agricole est l'un des principaux contributeurs aux changements climatiques à l'échelle mondiale dont le Canada est parmi les douze premiers pays émetteurs de GES par le secteur d'agriculture dans le monde (Global Carbon Atlas, 2023). Par conséquent, l'agriculture a un rôle crucial à jouer dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre pour atténuer l'ampleur du problème. Toutefois, l'augmentation attendue de la demande alimentaire mondiale pose une pression importante sur le système agricole en termes d'augmentation de la production associée à la réduction de l'empreinte écologique des activités agricoles. Cette situation engendre des défis technologiques, sociaux et économiques majeurs, qui s'ajoutent aux effets des changements climatiques sur la productivité agricole (Shafer et al., 2011), augmentant ainsi la vulnérabilité du système agricole. Au Québec, Les émissions GES sont en hausse continue, où 10.4 % des émissions de la province sont imputables à l'agriculture avec une augmentation d'un point par rapport à 1990, selon le dernier inventaire québécois des émissions GES pour l'année 2021 (MELCCFP, 2023). Ces émissions sont issues de la production agricole tout au long de la chaîne de valeur, mais proviennent principalement de la gestion des sols agricoles et du fumier, qui génèrent d'importantes quantités de méthane (CH₄) et de protoxyde d'azote (N₂O), des gaz

ayant un pouvoir de réchauffement bien supérieur à celui du dioxyde de carbone (CO₂). Pour le Canada et le Québec, l'agriculture constitue un secteur économique important en termes d'emplois directs et de contribution au panier alimentaire national. Le secteur agricole est essentiel au bien-être économique de nombreuses régions et communautés où les activités liées à ces secteurs constituent la base de la vie économique. En 2023, le secteur agricole et agroalimentaire canadien a contribué à hauteur de 7 % au produit intérieur brut (PIB) national, avec des recettes agricoles totalisant 99,1 milliards de dollars (Gouvernement du Canada, 2024). Pour le Québec, les données spécifiques au PIB de l'agriculture sont moins détaillées. Cependant, les recettes monétaires agricoles au Québec ont atteint 11,8 milliards de dollars en 2021 (Renaud Sanscartier, 2023).

Malgré le progrès des techniques et des technologies modernes de production agricole dans les pays industrialisés comme le Canada, résultant en une augmentation des rendements, la production agricole reste victime du réchauffement planétaire et des conditions climatiques perturbées en termes de températures et de précipitations (Atlas climatique du Canada, 2024). Il devient primordial que les instances fédérales et provinciales mettent en place des stratégies et des mesures d'adaptation efficaces aux changements climatiques pour le secteur agricole, où tous les niveaux de l'organisation socio-politique du territoire peuvent jouer un rôle (Lazarev, 2009).

1.2 - Question de l'essai

Cet essai vise à identifier et analyser les opportunités, ainsi que les mesures opérationnelles et technologiques qui facilitent l'adaptation du secteur agricole québécois aux changements climatiques. Les conditions météorologiques extrêmes, déjà préoccupantes pour l'agriculture, devraient s'accroître dans les décennies à venir, augmentant ainsi les risques pour les producteurs, les citoyens et les décideurs. Néanmoins, certaines prévisions laissent entrevoir un potentiel de rendement accru pour certaines cultures céréalières.

À travers une revue de littérature, cet essai propose un aperçu des adaptations de la production agricole face aux défis climatiques et cherche à dresser un inventaire des mesures d'adaptation, des pratiques agricoles et des innovations techniques, sociales, économiques et institutionnelles. Dans cette étude, nous recensons les mesures opérationnelles et les innovations technologiques

existantes et celles qui peuvent être mises en œuvre dans le secteur agricole québécois pour optimiser l'adaptation aux changements climatiques, tout en tenant compte des enjeux économiques, sociaux et institutionnels. Cette question permettra d'explorer à la fois les solutions pratiques et les défis liés à l'adaptation des pratiques agricoles, en intégrant les dimensions économiques et sociales.

CHAPITRE 2

CADRE THÉORIQUE

Dans la recherche sur les changements climatiques, les concepts d'adaptation et de résilience sont de plus en plus invoqués. En effet, au cours du 21^e siècle, la température moyenne mondiale pourrait augmenter de plus de 2°C, entraînant divers impacts sur les systèmes naturels et humains (GIEC, 2023). Les changements climatiques sont désormais inévitables, et l'adaptation constitue une composante essentielle de toute action de prévention et de protection (Smith, Klein et Huq, 2003).

L'adaptation se décline en deux volets : réagir activement aux impacts des changements climatiques actuels (adaptation active) et se préparer à ceux qui pourraient survenir à l'avenir (adaptation proactive) (GIEC, 2023). Dans ce contexte, les populations doivent apprendre à se préparer et à réagir face à des événements inattendus ainsi qu'à des variations dans les tendances météorologiques (Gunderson, 2003).

Il est également crucial de développer et de renforcer la résilience face aux changements climatiques, c'est-à-dire la capacité d'absorber ces chocs, de réduire la vulnérabilité et de continuer à fonctionner, ce qui inclut la réorganisation des systèmes, notamment dans le domaine de l'agriculture (Folke, 2006).

2.1- Vulnérabilité

Au sujet des impacts des changements climatiques sur les systèmes naturels et humains, on trouve de nombreuses définitions du concept de vulnérabilité. Dans le domaine des risques naturels, la vulnérabilité est définie *comme « le degré de susceptibilité d'une unité d'exposition à subir des dommages en raison de son exposition à une perturbation ou à un stress, ainsi que la capacité (ou l'absence de celle-ci) de l'unité d'exposition à faire face, récupérer ou s'adapter fondamentalement (devenir un nouveau système ou disparaître) »* (Research and Assessment Systems for Sustainability Program, 2001).

La définition du GIEC est la plus claire : la vulnérabilité est considérée comme « *le degré par lequel un système risque de subir ou d'être affecté négativement par les effets néfastes des changements climatiques, y compris la variabilité climatique et les phénomènes extrêmes. La vulnérabilité dépend du caractère, de l'ampleur et du rythme des changements climatiques auxquels un système est exposé, ainsi que de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation* » (GIEC, 2001, page 196). Pourtant, cette définition parle des sources de pressions naturelles (climatiques) sans prendre en considération d'autres facteurs de pressions non climatiques. Elle relie étroitement la vulnérabilité au phénomène des changements climatiques, la décrivant comme la mesure ou le degré selon lequel un système naturel ou humain est susceptible de subir des dommages dus à ces changements. Cette vulnérabilité dépend de la nature, de l'ampleur et de la rapidité des variations climatiques auxquelles un système est exposé, ainsi que de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation.

En revanche, des conditions sociales, économiques et politiques peuvent affecter la vulnérabilité des systèmes. Cela représente une mesure globale du bien-être humain qui intègre l'exposition d'ordre environnemental, social, économique et politique à un éventail de phénomènes néfastes (Bohle et al., 2014 ; GIEC, 2022).

Dans ce cadre, deux types de vulnérabilité du système agricole sont distingués (GIEC, 2022) :

1. **Vulnérabilité biophysique** : Cette vulnérabilité porte sur les processus écologiques et naturels, en mettant l'accent sur l'exposition et la sensibilité aux changements environnementaux. Elle est évaluée à travers des indicateurs tels que l'intensité des saisons sèches et pluvieuses, les risques d'inondation, ainsi que l'apparition de maladies et de ravageurs. Il convient également d'ajouter l'érosion des sols provoquée par les vents violents, laquelle peut entraîner des pertes considérables en qualité des sols.
2. **Vulnérabilité sociale** : Ce type de vulnérabilité met l'accent sur les facteurs politiques, socioéconomiques, culturels et institutionnels. Elle est évaluée à l'aide d'indicateurs tels que le niveau d'éducation, la sensibilisation, la pauvreté, le capital social, la diversification des moyens de subsistance, la capacité d'adaptation de la société, ainsi que les programmes et réglementations institutionnels et politiques.

2.2 - Atténuation

Il faut distinguer les mesures d'atténuation des effets des changements climatiques et les mesures d'adaptation à ces effets, alors qu'elles remplissent des fonctions complémentaires mais distinctes. Dans le contexte de la production agricole au Québec, ces deux stratégies jouent un rôle clé pour répondre aux défis posés par les changements climatiques. Le sixième rapport du GIEC (2022) fait une distinction importante entre ces deux types de mesures : l'adaptation concerne les impacts directs des changements climatiques, tandis que l'atténuation vise à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine humaine, responsables du réchauffement de la planète (GIEC, 2022b).

Pour répondre aux impacts des activités humaines sur le climat, la première stratégie mise en place implique de réduire cette contribution anthropique. Cette approche, axée sur l'anticipation des conséquences des changements climatiques, vise à les atténuer, adoptant une vision prospective à l'échelle planétaire. En réponse aux changements climatiques, l'atténuation vise principalement à réduire à l'échelle mondiale les émissions de gaz à effet de serre résultant des activités humaines. Elle se manifeste notamment à travers des mécanismes liés au marché du carbone régis par le Protocole de Kyoto. Adopté en 1997, ce protocole a établi des engagements juridiquement contraignants pour 37 pays industrialisés et l'Union européenne afin de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre (GES) d'une moyenne de 5 % par rapport aux niveaux de 1990, pendant la période 2008-2012 (UNFCCC, 2010). En 2012, à la Conférence des Parties (COP) à Doha, une deuxième période d'engagement a été convenue, s'étendant de 2013 à 2020. Cependant, l'Amendement de Doha n'est entrée en vigueur qu'à la fin de 2020, après que le nombre requis de ratifications a été atteint (UNFCCC, 2020). Plus récemment, en juin 2023, les Parties ont conclu les examens annuels pour cette deuxième période d'engagement, reflétant les efforts continus pour réduire les émissions et améliorer la transparence dans les actions climatiques.

Puisque les mesures d'atténuation sont élaborées à l'échelle internationale puis appliquées à l'échelle nationale et régionale, leur opérationnalisation s'effectue dans une perspective de gouvernance descendante (top-down). L'atténuation a dominé l'avant-scène scientifique et politique jusqu'au milieu des années 1990. Toutefois, les résultats des mesures d'atténuation peuvent ne pas être observés à court terme en matière de stabilisation du réchauffement planétaire,

dépendant des propriétés, des concentrations et de la durée de vie des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère (GIEC, 2014a ; Ouranos, 2004).

Ainsi, les impacts et les effets des changements climatiques actuels et futurs seront toujours inévitables avec les seules mesures d'atténuation, d'où l'importance des stratégies d'adaptation. Bien que les deux notions — atténuation et adaptation — semblent être différentes sur le plan théorique et politique, ainsi qu'aux niveaux des échelles d'intervention, leurs objectifs se rejoignent souvent (Smit et al., 2000). Ainsi, pour le Québec agricole, la lutte contre les changements climatiques nécessite une vision holistique qui combine ces deux stratégies, en anticipant les impacts tout en réduisant l'empreinte carbone du secteur. En opérant à l'échelle locale et régionale, les agriculteurs québécois peuvent contribuer à ces efforts à travers l'adoption de pratiques agricoles durables et l'intégration de technologies innovantes qui favorisent à la fois l'atténuation et l'adaptation aux impacts climatiques.

2.3 - Adaptation

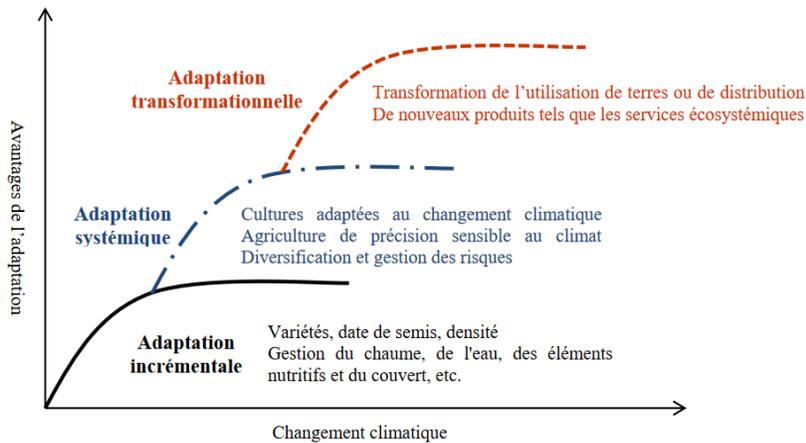
L'adaptation aux changements environnementaux, souvent associée aux changements climatiques modernes, n'est pas un concept nouveau. Depuis les débuts de l'humanité, l'humain a démontré une capacité d'adaptation face aux évolutions constantes de son environnement. Cela inclut des transitions génétiques, des ajustements corporels, des évolutions dans les pratiques culturelles, ainsi que le développement de compétences et de technologies pour répondre à ces défis (O'Neil, 2008). Cette dynamique revêt une importance particulière dans le contexte de l'agriculture au Québec, où les producteurs doivent constamment s'adapter à des conditions environnementales changeantes, en ajustant leurs pratiques agricoles vers des méthodes de conservation des sols et des technologies plus respectueuses de l'environnement.

L'adaptation se définit comme la capacité à réduire les impacts négatifs des changements tout en tirant parti de leurs aspects bénéfiques (Smith, Klein et Huq, 2003). Cette capacité varie en fonction des ressources disponibles, des compétences techniques des agriculteurs et des politiques publiques (National Geographic Society, 2008 ; Yohe et Tol, 2002). Par exemple, les agriculteurs québécois font face à des défis croissants liés au réchauffement climatique (sécheresses, vagues de chaleur, précipitations irrégulières). Pour y répondre, des stratégies d'adaptation sont mises en

place, telles que l'introduction de nouvelles variétés de cultures, des modifications des périodes de plantation, ou encore l'optimisation des systèmes d'irrigation pour mieux gérer l'eau disponible. Ces ajustements relèvent de ce que Guillaume Simonet appelle l'adaptation d'ajustement, où les systèmes agricoles conservent leurs fondements tout en réagissant aux changements immédiats. G. Simonet, dans son article « De l'ajustement à la transformation : vers un essor de l'adaptation? », a distingué deux formes d'adaptation : l'adaptation d'ajustement et l'adaptation transformationnelle (Simonet, 2016). En effet, alors que l'adaptation progressive d'ajustement maintient l'essence et les valeurs des systèmes existants, l'adaptation transformationnelle leur apporte des changements fondamentaux et plus importants. L'adaptation du système agricole aux changements climatiques ne se limite pas aux simples adaptations de nouvelles variétés, aux modifications des temps de plantation ou au recours à une irrigation plus efficiente, mais implique de repenser les pratiques et les activités : diversification et rotation des cultures, pratiques de conservation des sols, agroforesterie et changement des comportements alimentaires (Noble et al., 2015). En d'autres termes, l'adaptation d'ajustement permet au système de s'adapter à quelque chose qu'il a lui-même créé, tandis que l'adaptation transformationnelle nécessite de se transformer soi-même par un processus d'autorégulation socio-économique et écologique des sociétés (Simonet, 2016).

L'adaptation transformationnelle présente aussi des opportunités face aux changements climatiques. Par exemple, au Québec, cela pourrait signifier saisir l'occasion de repenser l'agriculture de demain en adoptant des systèmes plus résilients et durables. Cette approche inclut des facteurs cognitifs, tels que la manière dont les agriculteurs perçoivent les risques climatiques et leurs interrelations avec d'autres facteurs socio-économiques et environnementaux (Rickards et Howden, 2012 ; Park et al., 2012). Par exemple, la montée des températures pourrait offrir de nouvelles zones de culture dans le nord du Québec, mais cela nécessiterait une réflexion collective sur les meilleures pratiques agricoles à adopter.

Figure 2.1 - Types d'adaptation de l'agriculture en fonction des niveaux du C.C .



Source :Rickards et Howden (2012)

2.4 - Résilience

Le concept de résilience dans le contexte de l'agriculture québécoise est essentiel pour comprendre comment les systèmes agricoles peuvent s'adapter aux perturbations environnementales liées aux changements climatiques. La résilience, en tant que capacité d'un système à absorber les perturbations, à s'adapter et à se réorganiser, devient particulièrement pertinente pour l'agriculture du Québec, qui fait face à des défis croissants tels que les variations climatiques extrêmes. Un système agricole résilient est capable non seulement de résister aux crises, mais aussi de se réorganiser et de tirer parti des opportunités qui en découlent. Cela inclut l'innovation et l'apprentissage, qui sont des composantes clés de cette résilience (Folke, 2006).

Les travaux de Holling (1973) et Walker et al. (2004) sur la résilience, notamment la distinction entre « *engineering resilience* » et la « *résilience écologique* », sont particulièrement éclairants pour l'agriculture québécoise. L'*engineering resilience* pourrait se traduire par la capacité de maintenir une production stable malgré les perturbations, par exemple grâce à l'utilisation de technologies agricoles avancées ou de pratiques agricoles résistantes. En revanche, la résilience écologique permettrait au système agricole de se transformer face aux changements environnementaux, en adoptant des nouvelles méthodes de production et en repensant l'organisation des exploitations agricoles.

L'intégration de la vulnérabilité, de la résilience et de l'adaptation dans une perspective systémique est également pertinente. Par exemple, la vulnérabilité d'un système agricole face au changement climatique est liée à sa préparation et à sa capacité d'adaptation. Tandis que la résilience se réfère à la capacité du système à réagir aux perturbations et à évoluer, la vulnérabilité décrit l'état du système avant la perturbation (Cutter et al., 2008). Ainsi, un système agricole vulnérable pourrait être celui qui dépend fortement d'un seul type de culture ou qui manque d'infrastructures adéquates pour faire face à des conditions climatiques extrêmes. Inversement, un système résilient serait celui qui peut s'adapter rapidement aux nouvelles conditions climatiques tout en innovant pour améliorer la durabilité de la production (Ouranos, 2024).

L'adaptation dans l'agriculture peut donc être vue comme un processus d'amélioration continue, où la résilience joue un rôle crucial (Ouranos, 2024). La capacité d'adaptation, qui est une composante clé de la résilience, permettrait aux agriculteurs de répondre aux changements climatiques et de gérer les risques environnementaux de manière proactive (Gallopain, 2006). En ce sens, la résilience devient une caractéristique intégrée des systèmes agricoles du Québec, qui doivent à la fois absorber les chocs et transformer les pratiques agricoles pour répondre aux défis climatiques (Ouranos, 2024).

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE ET OBJECTIFS DE L'ESSAI

3.1- Objectif principal de l'essai

Cet essai est centré sur l'adaptation du secteur agricole du Québec aux impacts des changements climatiques, un enjeu de plus en plus pressant dans le contexte mondial actuel. Les effets du changement climatique, tels que l'augmentation des températures, l'intensification des phénomènes météorologiques extrêmes, et les modifications des régimes de précipitations, représentent des défis significatifs pour les agriculteurs. Ainsi, il est essentiel de comprendre comment ce secteur peut non seulement s'adapter à ces changements, mais aussi en tirer parti pour assurer sa viabilité à long terme.

Pour répondre à cette question centrale, plusieurs axes d'étude seront explorés :

1. **Mesures d'adaptation et innovations technico-socio-économiques** : Il s'agit d'identifier les stratégies et pratiques qui peuvent être mises en œuvre pour aider les exploitations agricoles à faire face aux impacts du changement climatique. Cela comprend des approches agronomiques, telles que l'adoption de cultures plus résistantes à la sécheresse, l'amélioration des systèmes d'irrigation et les pratiques de conservation des sols. En parallèle, l'étude portera sur l'impact des innovations dans les domaines technique, économique et social sur la résilience des systèmes agricoles. Cela implique d'analyser comment de nouvelles technologies agricoles, des pratiques de gestion durable, et des politiques publiques favorisant l'innovation, comme l'agriculture de précision et les technologies numériques, peuvent contribuer à une gestion plus efficace des ressources et à une meilleure adaptation aux aléas climatiques.
2. **Résilience du système agricole** : Pour traiter de la résilience du système agricole, cette étude analyse la manière dont les mesures d'adaptation et les innovations participent à la résilience globale de ce secteur. La résilience ne se limite pas à la capacité de réagir aux perturbations, mais inclut également les capacités d'anticipation et de transformation. Il est donc essentiel de comprendre comment ces adaptations et innovations permettent aux

exploitations agricoles non seulement de survivre, mais aussi de prospérer dans un environnement climatique en constante évolution.

En somme, cet essai vise à fournir une compréhension approfondie des mécanismes d'adaptation du secteur agricole du Québec face aux changements climatiques, tout en mettant en lumière le rôle essentiel des innovations technico-socio-économiques dans la construction d'un avenir agricole résilient et durable.

3.2- Objectifs spécifiques de l'essai

L'objectif principal de cet essai est d'identifier et de proposer des méthodes, pratiques agricoles, outils, programmes et stratégies d'adaptation appliqués à la production agricole, qui pourraient être adaptés et spécifiquement conçus pour le contexte québécois. Ce processus vise à renforcer la résilience de la production agricole face aux variabilités climatiques, telles que les pertes de récoltes, les baisses de rendement, l'apparition de maladies, les ravageurs et les pertes économiques. Cette approche proactive a pour but d'assurer la durabilité de l'agriculture tout en protégeant la sécurité alimentaire et l'économie locale.

Pour atteindre cet objectif, plusieurs étapes ont été suivies :

1. **Identification des principaux risques** : Cette étape implique une analyse des événements et des conditions climatiques susceptibles d'affecter la production agricole au Québec, en mettant l'accent sur les impacts à court et long terme des changements climatiques pour dresser un portrait complet des risques.
2. **Analyse des facteurs de vulnérabilité** : Il est essentiel de comprendre les éléments qui rendent le secteur agricole particulièrement vulnérable aux enjeux climatiques. Cela inclut l'examen des facteurs environnementaux, économiques et sociaux qui exacerbent la vulnérabilité des exploitations, permettant d'identifier les zones à risque élevé.
3. **Inventaire des stratégies d'adaptation existantes** : Cette phase consiste à répertorier les initiatives déjà mises en œuvre au Québec pour faire face aux risques identifiés. L'évaluation de ces stratégies permet de mesurer leur efficacité et d'identifier les domaines nécessitant des améliorations pour renforcer l'adaptabilité du secteur.

4. **Propositions de mesures d'adaptation et technologies viables** : L'objectif final est de développer des recommandations sur des solutions innovantes, qu'elles soient techniques, économiques, sociales ou institutionnelles. Ces mesures visent à renforcer la résilience du système agricole face aux défis climatiques, tout en tenant compte des réalités spécifiques du Québec, pour favoriser une agriculture durable et résiliente.

3.3 - Méthodologie

Pour répondre aux questions de recherche posées, une revue de la littérature scientifique de type narrative est adoptée comme méthode principale de synthèse des connaissances. Cette approche permet d'évaluer de manière critique un ensemble de textes, articles et rapports en lien avec les thématiques identifiées. L'objectif est d'analyser le corpus documentaire relatif à la résilience du système agricole face aux changements climatiques, tout en mettant en lumière les enjeux spécifiques rencontrés par le secteur.

La recherche documentaire vise à collecter des informations pertinentes pour l'étude. Une sélection rigoureuse des documents est effectuée afin d'identifier les sources les plus utiles, susceptibles de fournir des données essentielles à l'avancement de la recherche. Pour ce faire, des bases de données bibliographiques telles que Scopus, Google Scholar, Sofia, PubMed, ainsi que d'autres ressources académiques, ont été explorées afin d'assurer une couverture complète et de qualité des connaissances disponibles.

L'analyse met particulièrement l'accent sur les risques et problèmes rencontrés par le secteur de la production végétale en raison des aléas climatiques. En identifiant ces défis, nous visons à extraire des enseignements applicables non seulement au Québec, mais également dans d'autres régions du Canada et à l'échelle mondiale.

De plus, cette analyse approfondie permet d'identifier les principaux facteurs de vulnérabilité de l'agriculture au Québec, en considérant à la fois les aspects biophysiques (comme la qualité des sols, la disponibilité en eau et la biodiversité) et les éléments socio-économiques (tels que les pratiques agricoles, les marchés, l'approvisionnement, la distribution et le soutien institutionnel).

En comprenant ces dynamiques, nous pouvons mieux appréhender les impacts des changements climatiques sur le système agricole.

Enfin, sur la base des conclusions tirées de cette analyse, des mesures d'adaptation et d'atténuation sont proposées. Ces recommandations incluent des technologies viables et des solutions novatrices, qu'elles soient techniques, économiques, sociales ou institutionnelles. L'objectif est de renforcer la résilience du système agricole face aux défis climatiques, en offrant des pistes concrètes pour la mise en œuvre de stratégies adaptées.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET ANALYSE CRITIQUE

4.1 - Facteurs de vulnérabilité du système agricole en général

L'agriculture est un secteur particulièrement vulnérable aux changements climatiques (CC). Certains effets seront sûrement avantageux, tandis que d'autres seront négatifs. Dans le contexte des changements climatiques et pour mieux comprendre la vulnérabilité d'un système de production agricole, il est essentiel de penser en termes de vulnérabilité systémique. Comme l'a démontré le cas du Covid-19, une crise dans un aspect de la société (par exemple : la santé) peut en menacer d'autres, dont l'agriculture fait partie, comme l'économie, l'alimentation et la politique. On peut considérer que les facteurs de vulnérabilité de la production agricole sont en lien dynamique avec d'autres aspects sociaux, économiques, politiques et environnementaux.

Des travaux de Moss et al. (2001) et Füssel (2007) ont distingué deux catégories de facteurs de vulnérabilité :

- **Facteurs biophysiques** : Ce sont des facteurs naturels liés à l'environnement et aux impacts des changements climatiques. Cette dimension physico-environnementale explique les dommages causés par le climat. Elle se réfère au climat d'une région et aux perturbations et aléas climatiques affectant la productivité agricole, les conditions favorables de production, la qualité des sols et la prévalence des maladies (parasites et ravageurs).
- **Facteurs socio-économiques** : Ces facteurs décrivent les ressources économiques et sociales des individus, des communautés et des populations. Ils affectent la capacité d'une région à faire face aux événements extrêmes et à s'adapter aux changements à plus long terme, en fonction de leur niveau d'éducation, d'équité sociale, de richesse, et d'accès à l'information et à la technologie.

Pour évaluer correctement la vulnérabilité aux changements climatiques et identifier les mesures d'adaptation appropriées face aux enjeux climatiques, il est nécessaire d'améliorer nos

connaissances sur les facteurs biophysiques et socio-économiques pouvant affecter la sensibilité et la résilience du système agricole. Certains auteurs évoquent une approche intégrée dans laquelle les aspects socio-économiques et les facteurs biophysiques sont systématiquement associés et susceptibles de rendre le système fragile (Tesso, 2013 ; Fatemi et al., 2017).

4.1.1- Vulnérabilité aux facteurs climatiques

Les changements climatiques provoquent des perturbations souvent défavorables à la croissance des cultures, entraînant des pertes considérables en production et en rendements. Cependant, certaines conditions, telles que l'augmentation des températures et la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, notamment dans des régions comme le Québec, offrent des opportunités pour introduire de nouvelles cultures et améliorer les rendements (Charbonneau et al., 2013 ; Da Silva et Belzile, 2017).

Néanmoins, ces conditions favorables sont souvent contrebalancées par d'autres phénomènes climatiques extrêmes, comme la sécheresse et les inondations, qui nuisent à la production agricole et accroissent la vulnérabilité du secteur. En effet, les impacts des changements climatiques augmentent la vulnérabilité du système de production agricole, tant au niveau mondial qu'au Québec (Ouranos, 2024 ; Gouvernement du Canada, 2024a).

L'agriculture intensive en monoculture, dominante au Québec, est particulièrement exposée aux effets des changements climatiques, tels que les sécheresses, les inondations et les maladies, tout en ayant un impact dévastateur sur l'environnement (Fraser et al., 2005). Dans un contexte de croissance démographique continue, la production agricole risque de ne pas être en mesure de nourrir la population mondiale, surtout face à la diminution des rendements due aux effets des changements climatiques (GIEC, 2014b).

4.1.2- Vulnérabilité aux facteurs socio-économiques :

4.1.2.1 - Agriculture industrielle intensive

La production agricole au Québec repose largement sur un modèle industriel intensif, qui dépend principalement de l'utilisation de pétrole, de semences hybrides ou génétiquement modifiées, ainsi que de produits chimiques comme les pesticides, les herbicides et les fertilisants. Ces éléments sont indispensables et interconnectés dans le fonctionnement de l'agriculture industrielle.

Pour être efficace, ce type d'agriculture nécessite des combinaisons spécifiques de semences et de produits chimiques, ce qui la rend tributaire de certaines marques et fournisseurs, souvent étrangers au Québec. Actuellement, la majorité des intrants chimiques utilisés à l'échelle mondiale proviennent d'environ de six pays ; Belarus, Canada, la Chine, l'Inde, la Russie et les Etats-Unis (Chatham House, 2017). De plus, les ventes de pesticides représentent un tiers du chiffre d'affaires des cinq entreprises membres du lobby CropLife ; Bayer (Allemande), BASF (Allemande), Corteva-Agriscience (Américaine), FMC (Américaine) et Syngenta (Suisse) (Mandard, 2020). Cette dépendance accrue aux intrants chimiques augmente considérablement la vulnérabilité du système agricole, tout en aggravant les effets néfastes de ce mode de culture sur l'environnement et la santé publique.

4.1.2.2 - Incertitudes des modèles et scénarios climatiques

Le manque de capacité à identifier avec précision les manifestations des bouleversements climatiques et leurs implications sur les systèmes humains limite l'adaptabilité face aux aléas climatiques. Pour mieux s'adapter aux effets des changements climatiques, il est essentiel de gérer les sources d'incertitude, en particulier celles liées aux données et aux projections climatiques futures.

Selon Walker (2003) et Barnaud (2011), les incertitudes relatives aux changements climatiques se divisent en deux catégories : épistémiques et ontologiques. Les incertitudes épistémiques concernent les connaissances scientifiques, les modèles climatiques complexes et les scénarios d'émissions GES, tels que les « Trajectoires de concentration représentatives » (RCP). Ces trajectoires sont des scénarios utilisés par les scientifiques pour modéliser les différentes trajectoires possibles d'émissions futures de GES en fonction de divers choix sociétaux et

économiques, comme l'intensité des politiques climatiques ou les évolutions technologiques (Gouvernement du Canada, s.d.). Elles représentent des niveaux hypothétiques de concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à différents horizons temporels, permettant d'évaluer les impacts climatiques futurs sous diverses conditions. Les incertitudes ontologiques, liées à la nature, englobent les interactions « Homme-Nature » et « Nature-Nature », ainsi que les variabilités naturelles imprévisibles à l'origine du changement climatique (Walker et al., 2003 ; Barnaud et al., 2011). En conséquence, plus nos connaissances scientifiques progressent, plus nous sommes capables de comprendre les interactions et les dynamiques des relations impliquées dans ce phénomène.

Les incertitudes, notamment celles de nature épistémique, portent principalement sur le réchauffement climatique et ses impacts sous-jacents, ainsi que sur les modalités de représentation des risques et les modèles de prévision climatique. Ces incertitudes influencent le développement de stratégies d'adaptation efficaces (Burton et al., 2002). Bien que nous sachions que le climat évolue, la complexité du système climatique, des modèles et des facteurs humains rend difficile la détermination précise des répercussions des changements à un endroit ou à un moment donné.

Cependant, la compréhension des incertitudes associées aux projections climatiques permet de prendre des décisions plus éclairées et de mieux identifier et gérer les risques. À l'inverse, une mauvaise appréhension de ces incertitudes nuit aux efforts de gestion des risques et accroît le risque de mauvaise adaptation, aggravant ainsi la situation (Données Climatiques Canada, 2024).

L'importance relative des sources d'incertitudes dépend de l'échelle spatiale des résultats des modèles (globale ou continentale), de la variable climatique considérée (température, précipitations), de l'échelle temporelle (annuelle, saisonnière, mensuelle) et des contextes démographiques et socioéconomiques. L'accès et la disponibilité des données sur les conditions climatiques et les prévisions météorologiques sont cruciaux pour mettre en œuvre des mesures d'adaptation efficaces. Ces informations améliorent la compréhension des enjeux liés au changement climatique. Ainsi que l'intégration des données climatiques dans les processus décisionnels est essentielle pour élaborer des stratégies d'adaptation efficaces (Moser et Ekstrom, 2010).

4.1.2.3 - Complexité des politiques et des stratégies nationales et locales

En matière de prise de décision concernant les stratégies d'adaptation aux changements climatiques, il est essentiel de distinguer celles qui sont mises en œuvre à l'échelle locale, nationale et internationale (OCDE, 2009). Les stratégies d'adaptation au niveau local, par exemple en matière d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre (GES), ne peuvent avoir un impact significatif si elles ne sont pas soutenues par des initiatives au niveau national. La complexité des interactions entre ces différentes échelles de formulation des stratégies constitue l'un des principaux obstacles à l'adaptation aux changements climatiques (Amundsen et al., 2010).

Il est également possible que les stratégies d'adaptation ne soient pas coordonnées entre les niveaux fédéral et provincial, entraînant des efforts déconnectés les uns des autres. Cette situation résulte souvent d'une gouvernance décentralisée et non coordonnée. Le manque d'équilibre entre le soutien aux stratégies provinciales, qui répondent aux besoins locaux, et l'adoption d'une stratégie nationale cohérente accroît la vulnérabilité des systèmes agricoles et risque de conduire à des situations de mal-adaptation (Institut Climatique du Canada, 2022).

4.1.2.4 - La gouvernance

Le mode de gouvernance joue un rôle essentiel dans l'élaboration et la mise en œuvre de mesures et de stratégies d'adaptation efficaces. L'adoption de ces mesures nécessite l'intégration et la participation des acteurs ainsi que de toutes les parties prenantes (publiques et privées) dans une approche collaborative. La réussite des processus d'adaptation repose sur une bonne communication, des négociations efficaces et une concertation entre les acteurs, ce qui renforce la capacité d'adaptation et réduit la vulnérabilité des systèmes (Moser et Ekstrom, 2010 ; Johnston et Hesseln, 2012).

Toutefois, le manque de renforcement des capacités des acteurs locaux, la défaillance de coordination entre les parties prenantes, la centralisation de la gouvernance et les limites institutionnelles, telles que des politiques rigides et non anticipatives, augmentent le risque de mal-adaptation des systèmes face aux effets des changements climatiques (Swanson, 2010).

4.1.2.5 - Capacité d'adaptation

La capacité adaptative est définie comme la capacité d'un système à évoluer pour mieux gérer son exposition, sa sensibilité et sa vulnérabilité au changement climatique (Neset et al., 2019). Cette capacité est influencée par divers facteurs liés au capital humain, économique et technique au niveau des exploitations agricoles.

- Facteurs liés au capital humain/social ;

Les facteurs liés au capital humain incluent le niveau de formation, l'expérience, l'âge et les réseaux de communication des exploitants agricoles. Un meilleur accès à l'information permet d'améliorer le niveau de connaissance des agriculteurs, augmentant ainsi leur capacité d'adaptation et réduisant la vulnérabilité de leurs exploitations. Il a été observé que les ménages agricoles avec une longue expérience sont généralement moins vulnérables aux changements climatiques que ceux avec peu d'expérience (Tesso, 2013), due à l'expertise accumulée le long des années, au savoir-faire hérité et la connaissance approfondie du territoire et de son historique climatologique.

Pourtant, l'âge des agriculteurs peut également affecter leur capacité d'adaptation : les exploitants plus âgés sont souvent moins enclins à investir et à diversifier leurs activités, ce qui peut limiter leur accès à des aides financières et crédits, impactant négativement la productivité. De plus, les réseaux de communication, qu'ils soient formels (par exemple, à travers des organisations comme l'UPA) ou informels, facilitent la diffusion d'informations sur les pratiques d'adaptation à moindre coût.

- Facteurs liés au capital économique ;

Le capital économique comprend l'ensemble des ressources économiques d'une exploitation et les stratégies de production et de vente visant à améliorer les revenus. Des stratégies de commercialisation efficaces, la diversification des revenus, la valorisation des produits (qu'ils soient biologiques ou non), le statut foncier et les assurances contre les pertes de récoltes favorisent la capacité d'adaptation et la résilience face aux impacts économiques des changements climatiques. Par exemple, une production agricole respectueuse de l'environnement avec une distribution en circuit court peut renforcer la résilience des exploitations tout en atténuant leur empreinte écologique (FAO, 2011a ; Boron, 2006 ; Zaatra, 2021).

- Facteurs liés au capital technique ;

Le capital technique des exploitations englobe les activités agricoles et les pratiques culturelles, telles que les infrastructures et les approches agroécologiques. L'adoption d'infrastructures agroécologiques, comme les haies brise-vent et l'agroforesterie, augmente la capacité d'adaptation des exploitations. Ces infrastructures contribuent à la durabilité des agroécosystèmes grâce à divers processus écologiques et services écosystémiques, notamment la fixation biologique de l'azote, la lutte biologique, la conservation des sols et de l'eau, la réduction de l'utilisation d'intrants chimiques, la préservation de la biodiversité et la séquestration du carbone (Wezel et al., 2014).

4.2 - Impacts des changements climatiques sur l'agriculture québécoise: opportunités et menaces

Les changements climatiques offrent à la fois des opportunités et des défis pour le secteur agricole québécois. L'allongement des saisons de croissance et la possibilité de cultiver des plantes plus au nord pourraient bénéficier à l'agriculture, tandis que des modifications dans la disponibilité de l'eau, des phénomènes météorologiques extrêmes, ainsi que l'émergence de nouveaux organismes nuisibles et maladies poseront des défis significatifs.

4.2.1 - Effets directs

L'agriculture est naturellement sensible aux changements climatiques. L'augmentation des températures, les variations des régimes de précipitations, et les changements dans la fréquence et l'intensité des événements climatiques extrêmes affecteront directement les cultures et l'élevage, amplifiant les risques existants tout en introduisant de nouveaux. Les impacts varieront selon les régions agricoles et les systèmes de production.

4.2.1.1 – Températures

Les projections climatiques pour le sud du Québec à l'horizon 2050 indiquent un réchauffement des températures, avec une augmentation plus marquée en hiver (+2,5 à +3,8 °C) par rapport à l'été (+1,9 à +3,0 °C). Les températures printanières et automnales devraient également augmenter, respectivement de 1,9 à 3,0 °C et de 2,0 à 3,1 °C (Ouranos, 2015 ; Ouranos, 2024). Ce

réchauffement entraînera un déplacement des dates de gel, avec le dernier gel survenant 12 à 20 jours plus tôt et le premier gel ayant lieu 15 à 18 jours plus tard (Bélangier et Bootsma, 2002). En conséquence, les unités thermiques maïs (UTM) devraient augmenter de 29 %, passant de 2 390 UTM en 2002 à 3 088 UTM pour la période 2040-2069. Les unités thermiques maïs (UTM) représentent la durée des saisons de croissance et l'accumulation de chaleur en fonction des degrés-jours de croissance (Bélangier et Bootsma, 2002).

Des températures plus élevées peuvent être avantageuses pour certaines cultures, telles que le maïs et le soja, car elles permettent de profiter de la chaleur estivale et d'une saison de croissance prolongée. Cependant, ces bénéfices sont conditionnés par l'absence d'extrêmes climatiques imprévus, comme des gels tardifs au printemps ou des gelées précoces à l'automne (Bootsma et al., 2005). Ces conditions climatiques pourraient également favoriser l'expansion de ces cultures vers le nord, dans de nouvelles régions (Ouranos, 2024). Cependant, selon les études de Bootsma, le changement climatique pourrait être moins favorable aux rendements des cultures de petits grains, comme le blé. Concernant les cultures fourragères, bien que le nombre de récoltes par an puisse augmenter (Bélangier et al., 2006), la qualité nutritionnelle pourrait diminuer (Gitz et al., 2006 ; Jing et al., 2013). Ces nouvelles conditions pourraient renforcer la position concurrentielle du Québec pour certains types de production, comme celles du maïs et du soja, l'arboriculture et la viticulture (Roy et al., 2017).

En dehors de la saison de croissance, les conditions climatiques défavorables auront également des effets sur l'agriculture, notamment sur les plantes pérennes. Par exemple, des automnes plus chauds, une réduction de la couverture neigeuse et une augmentation des pluies hivernales pourraient accroître le risque de mortalité hivernale des cultures fourragères au Québec (Bélangier et al., 2006 ; Bélangier, 2016).

4.2.1.2 - Précipitation

L'agriculture dépend largement des précipitations durant la saison de croissance, car de nombreuses cultures au Québec sont de type pluvial et nécessitent des apports en eau de pluie. Cependant, la pression sur les ressources en eau est considérable, l'agriculture en étant une part, mais les prélèvements pour l'industrie et les consommations résidentielles étant les plus importants. Cette pression affecte la disponibilité de l'eau nécessaire pour l'agriculture, où les prélèvements excessifs dépassent souvent les taux de recharge des nappes souterraines dans de

nombreux endroits (Larocque et al., 2015). Cela entraîne des étiages estivaux plus sévères et des déficits hydriques durant la saison de croissance (Ouranos, 2015). Les pénuries d'eau peuvent être exacerbées par les perturbations des régimes de précipitations et leur répartition, ainsi que par les fluctuations de température résultant des changements climatiques. Bien que cette situation ne soit pas actuellement observée au Québec, elle pourrait entraîner des conflits entre les différents usagers de l'eau, notamment en raison de l'augmentation des besoins en irrigation (Charron et al., 2020).

En moyenne, dans les régions sud au Canada, les précipitations ont augmenté d'environ 20 % de 1948 à 2012 (Vincent et al., 2015), cette augmentation étant plus marquée dans le sud. Cependant, ces précipitations deviennent plus dispersées et concentrées, c'est-à-dire que les épisodes de pluie deviennent moins fréquents mais beaucoup plus intenses. D'une part, la répartition des précipitations est perturbée, avec des augmentations observées durant le printemps et l'hiver, mais moins de pluie durant la saison de croissance, surtout en été et en automne (Michaud et al., 2012).

D'autre part, le réchauffement climatique a provoqué une diminution notable de la proportion des précipitations tombant sous forme de neige dans le sud du Canada, surtout au printemps et à l'automne (Vincent et al., 2015). Ce changement augmente la fréquence des épisodes de « gel-dégel » et réduit les conditions favorables à la formation de couches de neige, qui servent de protection naturelle contre le froid pour les cultures d'automne et les cultures fourragères, accroissant ainsi les risques de mortalité des plantes (Ouranos, 2015).

Par ailleurs, les pluies extrêmes augmentent les risques d'inondations pouvant endommager les cultures. Par exemple, en juillet 2023, des pluies abondantes ont affecté plusieurs régions du Québec, endommageant les cultures et incitant La Financière agricole du Québec à intervenir pour soutenir les producteurs touchés (Gouvernement du Québec, 2023). De plus, l'été 2024 a été marqué par des dommages records causés par des phénomènes météorologiques extrêmes, notamment des inondations au Québec (BAC, 2024). Les fortes pluies accentuent l'érosion des sols et le ruissellement de surface, ce qui nuit à la qualité des sols agricoles en entraînant la perte de matière organique, de carbone et d'autres nutriments. Cela réduit leur fertilité et impacte négativement la productivité agricole (Macrae et Michaud, 2018). Le lessivage des matières fertilisantes des sols vers les cours d'eau a également des effets nocifs sur la qualité de l'eau, en

raison de la pollution par des produits chimiques diffusés (Forest et Sylvestre, 2016). De plus, la libération accrue de carbone organique contribue à renforcer les effets des changements climatiques, créant un cercle vicieux de rétroaction positive.

Malgré les risques pour la production agricole causés par les perturbations des précipitations, le Québec bénéficie d'un bilan hydrique positif. Cette situation permet de maintenir une grande diversité de cultures et d'assurer une compétitivité continue du secteur agricole québécois. En comparaison avec d'autres régions du Canada ou du monde, où la sécheresse et le manque d'eau deviennent des facteurs limitants pour la production agricole, le Québec reste relativement bien positionné (Debailleul et al., 2013).

4.2.1.3- Concentration élevée en CO₂ atmosphérique

L'augmentation prévue de la concentration atmosphérique de CO₂ pourrait dépasser les 600 ppm à l'échelle mondiale si aucune mesure d'atténuation des gaz à effet de serre n'est mise en place (GIEC, 2018). Cette hausse pourrait bénéficier aux rendements des cultures en stimulant la photosynthèse et en augmentant la production de biomasse, surtout pour les cultures de type C3 comme le blé, l'orge et le soja, par rapport aux cultures de type C4 telles que le maïs (Ouranos, 2015 ; Charbonneau, 2013).

Cependant, des concentrations élevées de CO₂ pourraient affecter la qualité des récoltes en réduisant leur teneur en nutriments, ce qui pourrait conduire à une saturation des plantes lorsque ces niveaux deviennent excessifs (Dong et al., 2018). En résumé, bien que des niveaux élevés de CO₂ puissent altérer la composition nutritionnelle des récoltes, il est nécessaire de mener des recherches approfondies pour évaluer de manière précise les impacts spécifiques sur l'agriculture québécoise.

De plus, l'augmentation de la concentration en CO₂ entraîne des impacts sur les interactions entre les plantes et les insectes, en modifiant la morphologie des plantes et les habitudes alimentaires des insectes. Cette modification pourrait potentiellement favoriser la croissance des mauvaises herbes, ce qui pourrait diminuer l'efficacité de certains herbicides (Tamini et al., 2014 ; Ouranos, 2015).

Il est donc essentiel de considérer à la fois les avantages et les inconvénients potentiels liés à l'augmentation des niveaux de CO₂, car ceux-ci peuvent influencer non seulement les rendements agricoles, mais aussi la qualité des produits et les dynamiques des écosystèmes agricoles.

4.2.2 - Effets indirects

Les changements climatiques engendrent non seulement des effets directs sur l'agriculture, mais aussi des impacts indirects significatifs, notamment en ce qui concerne les ennemis des cultures, tels que les ravageurs, les agents pathogènes et les mauvaises herbes. Les modifications climatiques créent de nouvelles conditions favorables pour des organismes nuisibles, augmentant ainsi leur pression sur les cultures et modifiant leur répartition géographique (Ouranos, 2015). Cela peut nuire aux rendements des cultures et entraîner une augmentation de l'utilisation des pesticides.

4.2.2.1 - Ravageurs

Les changements climatiques peuvent amplifier les effets nuisibles des ravageurs et des insectes phytophages, entraînant des conséquences économiques significatives pour l'agriculture (Ladanyi et Horvath, 2010). L'augmentation des températures influence directement le développement des insectes, et d'autres facteurs comme l'augmentation du CO₂ et les variations des précipitations jouent également un rôle crucial.

- Impact de la température : La température régule la vitesse de développement des insectes, avec des effets plus prononcés sur les insectes foliaires. L'augmentation des températures peut accroître le taux de croissance des insectes ravageurs et le nombre de générations par saison de croissance (Fuhrer, 2003 ; Trnka et al., 2007).
- Migration et répartition : Un réchauffement climatique pourrait entraîner une migration de certaines cultures vers le nord du Québec et l'expansion de nouvelles espèces de ravageurs (Plouffe et Bourgeois, 2012 ; Ouranos, 2024). Bien que le climat soit un facteur déterminant, la disponibilité des ressources et les interactions entre espèces influencent également la distribution des ravageurs et leurs prédateurs.

- Effets sur la lutte biologique : Les changements climatiques peuvent perturber le synchronisme entre les cycles biologiques des ravageurs et ceux de leurs ennemis naturels, affectant ainsi l'efficacité des agents de lutte biologique (Brodeur et al., 2013).
- Interaction avec le CO₂ : L'augmentation du CO₂ entraîne des conséquences sur les interactions entre les plantes et les insectes, notamment en modifiant la chimie des plantes. En outre, des niveaux élevés de CO₂ pourraient accroître la consommation de feuillage par les insectes, ce qui, dans le contexte du Québec, pourrait intensifier les dommages subis par les cultures et perturber les systèmes de lutte biologique (Dermody et al., 2008). De plus, une augmentation du CO₂ peut réduire la qualité nutritionnelle des plantes, augmentant la consommation par les insectes (Hamilton et al., 2005 ; Ballhorn et al., 2011).
- Impact sur les cultures génétiquement modifiées : L'augmentation du CO₂ pourrait diminuer la production de certaines protéines dans les plantes modifiées, ce qui pourrait nécessiter l'ajout de fertilisants azotés. Cela pourrait engendrer des effets néfastes sur l'environnement et la santé (Trumble et Butler, 2009).
- Efficacité des insecticides : Bien que l'augmentation du CO₂ puisse accroître l'efficacité des insecticides en raison d'une consommation accrue de feuillage par les insectes, il existe des inquiétudes concernant l'efficacité des insecticides systémiques. En effet, la fermeture des stomates des plantes, en réponse à une augmentation de CO₂, pourrait limiter l'entrée des pesticides dans les plantes.

Ces dynamiques illustrent la complexité des interactions entre les changements climatiques, les ennemis des cultures et la production agricole, soulignant la nécessité de stratégies d'adaptation adaptées pour faire face à ces défis émergents.

Tableau 4.1 – Impacts positifs et négatifs de l’augmentation de la concentration du CO₂ atmosphériques sur les insectes et les plantes hôtes. (source : Trumble et Butler, 2009)

Impacts de la concentration du CO ₂	Description
Augmentation	<ul style="list-style-type: none"> • Taux de consommation des lépidoptères • Reproduction chez les pucerons • Prédation par les coccinelles • Effet de l’application foliaire de <i>Bacillus thuringiensis</i> (Bt)
Diminution	<ul style="list-style-type: none"> • Taux de développement de certains ravageurs • Réponse aux phéromones d’alarme par les pucerons • Parasitisme • Effet transgénique du Bt dans les plantes OGM • Composés de défense des plantes à base d’azote (alcaloïdes et glycosides cyanogéniques; ex : pomme de terre et prune)

4.2.2.2 - Agents pathogènes et maladies

Les agents pathogènes englobent plusieurs types d’organismes : des champignons, des bactéries, des virus et des nématodes pouvant attaquer les cultures agricoles, causant des maladies et des infections, et réduisant ainsi les rendements. Les changements climatiques affectent les agents pathogènes en modifiant leur croissance, leur reproduction et leur survie. Ils influencent également la sensibilité des plantes hôtes, la répartition géographique des pathogènes et l’efficacité des méthodes de lutte. La température et l’humidité sont les principaux facteurs bioclimatiques qui impactent le développement des maladies (Nnadi et Carter, 2021).

Des températures plus élevées et des précipitations accrues pourraient favoriser la propagation des maladies. Le feuillage dense et humide favorise la germination des spores et la prolifération des bactéries et des champignons. Dans le contexte des changements climatiques et de nouvelles conditions de température et d’humidité au Québec, des maladies envahissantes ou exotiques

pourraient émerger, tout comme de nouveaux insectes. Une augmentation des températures hivernales pourrait également avoir un impact significatif sur les agents pathogènes. Des hivers plus doux permettraient à certains pathogènes de survivre pendant la saison froide, augmentant ainsi l'inoculum disponible au printemps suivant (Gagnon et al., 2011).

De plus, l'augmentation des concentrations de CO₂ due aux changements climatiques pourrait altérer la structure biochimique des plantes hôtes, influençant ainsi leur sensibilité aux agents pathogènes (Boland et al., 2004). En général, le CO₂ atmosphérique peut modifier la physiologie ou la morphologie des plantes hôtes, ce qui peut avoir un impact positif ou négatif sur leur interaction avec les agents pathogènes. Il est important de noter que les modélisations climatiques prévoient des impacts variables sur les agents pathogènes, ce qui rend la généralisation des réponses aux changements climatiques presque impossible.

4.2.2.3 – Plantes adventices

Les changements climatiques peuvent entraîner divers effets sur les mauvaises herbes. L'augmentation des concentrations de CO₂ pourrait modifier la physiologie des plantes, influençant ainsi la compétition entre les cultures et les mauvaises herbes.

De façon générale, l'augmentation du CO₂ engendrera une augmentation de l'activité photosynthétique, du taux de croissance, de la biomasse, du rapport C/N et des composés de défense à base de carbone chez les plantes. Cependant, l'impact de cette augmentation du CO₂ affectera différemment les plantes selon leurs processus photosynthétiques, en distinguant les effets sur les plantes de type C3 et C4 (Taiz et Zeiger, 2002).

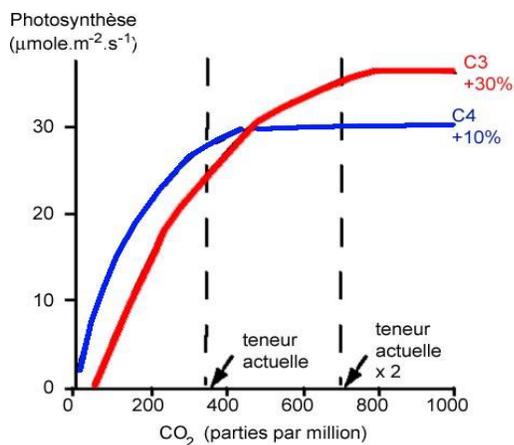
Les plantes de type C3, comme le chardon des champs ou l'herbe à poux, sont plus efficaces en photosynthèse à des niveaux élevés de CO₂ atmosphérique, contrairement aux plantes de type C4, qui réagissent moins bien à une augmentation des concentrations de CO₂ (Figure 3) (Fuhrer, 2003 ; Seguin, 2010). Ces mauvaises herbes, qui sont déjà problématiques dans les champs de culture, pourraient devenir encore plus compétitives, menaçant la productivité des cultures principales comme le maïs, le blé et le soya, qui sont principalement de type C4 (Seguin, 2010). En Amérique du Nord, 9 des 15 espèces de plantes adventices les plus problématiques sont de type C3, tandis que les cultures dominantes sont principalement de type C4, comme le maïs. Par conséquent, ces

cultures de type C4 pourraient devenir plus vulnérables face aux mauvaises herbes en raison des augmentations des concentrations atmosphériques de CO₂.

L'augmentation du CO₂ peut accroître la compétition entre les mauvaises herbes et les cultures, compromettant le rendement de ces dernières en favorisant la croissance des mauvaises herbes et en diminuant l'efficacité des herbicides. Par exemple, dans la culture du soja, une diminution des rendements serait engendrée par l'augmentation du CO₂, qui contribue à l'accroissement de la biomasse du chardon des champs (*Cirsium arvense*) et à la diminution de l'efficacité du glyphosate (Ziska, 2010). Cette augmentation de la teneur en CO₂ stimule également l'activité reproductive des mauvaises herbes et des espèces envahissantes, comme le montre l'augmentation de la production de pollen chez l'herbe à poux (Knolmayer et al., 2024). Bien que des études ailleurs aient montré que l'augmentation du CO₂ peut affecter la croissance des mauvaises herbes et l'efficacité des herbicides, les données spécifiques au Québec sur ces interactions sont limitées.

L'augmentation des températures affectera la distribution spatiale des mauvaises herbes, entraînant une migration vers le nord de nouvelles espèces, de manière similaire aux insectes nuisibles. Les températures plus clémentes favorisent l'expansion vers le nord de l'aire de répartition de ces espèces envahissantes, en facilitant leur survie hivernale (Wolfe et al., 2008 ; Ouranos, 2015 ; Atlas climatique du Canada, 2024b). Les changements climatiques au Québec contribuent à la migration vers le nord de certaines mauvaises herbes et espèces envahissantes, ce qui représente un défi supplémentaire pour l'agriculture locale. Par ailleurs, la diminution prévue des précipitations créera des conditions très favorables à l'expansion de plusieurs mauvaises herbes, qui sont moins compétitives dans des environnements plus humides

Figure 4.1 - Impact de l'augmentation du CO₂ sur le taux photosynthétique des plantes C3 et C4



Source : Seguin, 2010

4.2.3 - Impacts économiques : opportunités et menaces

Les éléments affectant le bilan économique de l'agriculture au Québec, dans le contexte des changements climatiques, incluent la productivité agricole et la rentabilité des exploitations. Concernant les grandes cultures, ce bilan dépend des prix mondiaux, de l'offre et de la demande, de l'introduction de nouvelles variétés de cultures, ainsi que de l'évolution des rendements futurs en fonction des pratiques culturales adaptées (Charbonneau et al., 2020). Selon les scénarios climatiques futurs, le Québec bénéficie de sa position géographique. Avec une hausse de la température annuelle moyenne de 2,8 °C, les conditions resteront optimales pour la productivité agricole (Burke et al., 2015). Ainsi, le secteur agricole québécois devrait connaître une amélioration de sa productivité d'ici 2050.

Des études sur les rendements en grandes cultures, notamment pour le maïs-grain et le soja, qui représentent plus de 87 % de la production de céréales au Québec (MAPAQ, 2020), montrent que les rendements auront tendance à augmenter d'ici 2050. L'augmentation des températures favorise des saisons de croissance plus longues, où l'accumulation de chaleur (mesurée en degrés-jours ou unités thermiques maïs UTM) continuera d'augmenter (Bélanger et Bootsma, 2002 ; Debailleul et

al., 2013 ; Charbonneau et al., 2020). Cependant, les rendements peuvent être affectés négativement par des températures excessivement élevées et par des épisodes de sécheresse, ainsi que par une forte évapotranspiration (augmentation du nombre de jours avec des températures dépassant 30 °C), surtout pour les céréales à paille comme le blé et l'orge (Charbonneau et al., 2020). Ces nouvelles conditions climatiques peuvent également favoriser la propagation de ravageurs, de maladies et de nouvelles espèces envahissantes, nécessitant des investissements significatifs pour leur contrôle (Firlej et Saguez, 2019). Parallèlement, les dépenses en produits fertilisants augmenteront proportionnellement avec les rendements (Debailleul et al., 2013).

Les changements climatiques et les nouvelles conditions optimales permettront l'introduction de nouvelles variétés, offrant ainsi un plus grand choix de cultures rentables et de nouvelles opportunités d'affaires. La position concurrentielle de l'agriculture au Québec, face aux changements et scénarios climatiques futurs, devrait améliorer le marché des grains par rapport à ses concurrents, grâce à une augmentation des rendements et à un déficit hydrique plus faible (Debailleul et al., 2013). De plus, l'augmentation continue des prix sur le marché mondial, liée à la croissance démographique et à la demande, pourrait améliorer la situation économique des producteurs québécois (Ito, 2019).

D'autres analyses étudiant les impacts des changements climatiques sur les rendements des cultures de pommiers et la production de sirop d'érable (Tamini et al., 2014) montrent que la situation économique et la position concurrentielle des producteurs québécois devraient s'améliorer avec les projections climatiques futures. Cependant, ces nouvelles opportunités de développement économique pour les exploitations et leur position concurrentielle doivent être pleinement exploitées et accompagnées de techniques culturales innovantes pour s'adapter aux nouvelles conditions climatiques (Charbonneau et al., 2013 ; Da Silva et Belzile, 2017).

4.3 - Atténuation et adaptation

4.3.1- Interdépendance des mesures d'atténuation et d'adaptation

Des études traitent l'importance des mesures d'adaptation et d'atténuation face à l'aggravation des conditions climatiques et de l'importance d'intégrer ces deux approches dans les politiques climatiques. L'adaptation et l'atténuation sont toutes deux cruciales pour faire face aux effets du changement climatique. L'atténuation inclut les actions visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) ou à augmenter les puits de carbone pour diminuer leur concentration dans l'atmosphère (Grubb et al., 2022). Alors que l'adaptation est nécessaire pour gérer les impacts du changement climatique qui sont déjà inévitables, comme les pertes et préjudices supplémentaires.

Il est possible d'obtenir des synergies importantes en combinant les mesures d'atténuation et d'adaptation dans une approche intégrée, renforçant la résilience à long terme en développant des politiques climatiques qui englobent à la fois atténuation et adaptation pour être efficaces et efficientes (OCDE, 2023 b).

Souvent, les mesures d'adaptation et d'atténuation présentent des avantages et des obstacles à l'adoption distincts (Wreford, Ignaciuk et Gruère, 2017). En particulier, les mesures d'adaptation peuvent offrir des avantages directs aux agriculteurs et aux communautés locales. Tandis que les mesures d'atténuation tendent à générer des bénéfices principalement d'ordre public plutôt que privé, et nécessitant souvent des investissements initiaux très importants.

Les mesures d'atténuation sont essentielles pour faire face aux défis climatiques actuels et futurs. Alors que l'adaptation reste inévitable car les impacts associés aux trajectoires les plus ambitieuses de stabilisation des concentrations de GES sont loin d'être négligeables. Il n'existe pas de niveau de changement climatique entièrement sans danger que l'on pourrait atteindre uniquement par des politiques d'atténuation. Les incertitudes et les défis liés à la stabilisation des concentrations de GES, conjugués aux avancées dans la science des impacts, ont mis en évidence la nécessité de développer des stratégies d'adaptation pour compléter les efforts d'atténuation.

Initialement, la substituabilité entre atténuation et adaptation dominait la conception des politiques climatiques. Cependant, la prise en compte de leurs caractéristiques intrinsèques, comme les échelles temporelles et géographiques de leur efficacité, ainsi que leurs capacités et limites

respectives, a mis en lumière leur complémentarité stratégique pour une gestion efficace du risque climatique (Jones et al., 2007).

4.3.2- Caractérisation des mesures d'adaptation

La caractérisation des mesures d'adaptation agricoles face au changement climatique peut sembler complexe, mais elle est cruciale pour la formulation de stratégies efficaces et adaptées. En tenant compte de plusieurs dimensions, telles que l'intention et la finalité, le moment et la durée, l'échelle et la responsabilité, ainsi que la forme des mesures, il est possible de créer une typologie robuste. Cette typologie permet d'orienter de manière plus précise les décisions politiques, les pratiques agricoles et les recherches futures dans le domaine de l'adaptation aux changements climatiques.

La finalité des mesures d'adaptation est souvent de garantir la durabilité du secteur agricole tout en augmentant ses revenus. Cette finalité peut être économique en réduisant les coûts ou en augmentant les revenus des producteurs, environnementale en minimisant les impacts négatifs sur l'environnement et en améliorant les mesures d'atténuation des gaz à effet de serre (GES), et sociale en améliorant les conditions de vie des agriculteurs et des communautés rurales.

Le moment où les mesures sont mises en œuvre joue également un rôle clé. Elles peuvent être proactives, prises avant que les impacts climatiques ne se manifestent clairement, comme l'adaptation des pratiques agricoles en prévision de tendances climatiques à long terme. À l'inverse, elles peuvent être réactives, adoptées en réponse à des impacts climatiques déjà observés, comme l'ajustement de la gestion des cultures après un événement climatique extrême (Grigorieva et al., 2023)

Toujours selon Grigorieva (2023), la durée des mesures d'adaptation a aussi un effet important. On distingue les mesures à court terme, qui sont des solutions immédiates aux problèmes urgents, comme l'irrigation temporaire pendant une période de sécheresse, et les mesures à long terme, qui sont des stratégies planifiées pour s'adapter aux changements climatiques sur plusieurs décennies, comme la modification des systèmes de cultures ou l'adaptation de l'utilisation des terres.

Les mesures d'adaptation peuvent également être classées en fonction de l'échelle à laquelle elles sont appliquées et des responsabilités des acteurs impliqués. À une échelle individuelle, elles

peuvent inclure des pratiques adoptées par un agriculteur sur sa propre exploitation, comme la modification des techniques de culture. À une échelle communautaire, elles peuvent consister en des initiatives menées par un groupe d'agriculteurs partageant des expériences, tandis qu'à une échelle régionale ou nationale, elles peuvent se traduire par des politiques publiques ou des programmes mis en place par des autorités publiques, comme des subventions pour des pratiques agricoles durables (Howdesn et al., 2007). Ainsi, les responsabilités sont également partagées entre les agriculteurs, qui mettent en œuvre directement les mesures sur leurs exploitations, et les gouvernements ou institutions, qui définissent et appliquent des politiques publiques favorisant l'adaptation.

Enfin, les mesures d'adaptation agricoles peuvent prendre diverses formes en fonction de leurs caractéristiques. Elles peuvent être technologiques, comme l'introduction de nouvelles technologies ou de systèmes de prévision météorologique avancés ; organisationnelles, telles que l'optimisation des rotations de cultures ; éducatives, à travers la formation et la sensibilisation des agriculteurs aux pratiques d'adaptation, ou encore financières, sous forme de subventions, crédits ou assurances pour soutenir les investissements nécessaires à l'adaptation, comme l'achat de matériel résistant aux conditions climatiques extrêmes (Grigorieva et al., 2023 ; Smit et Skinner, 2002).

4.3.3 - Classifications des mesures d'adaptation par catégories

La classification des mesures d'adaptation s'appuie sur l'échelle à laquelle ces mesures sont appliquées et sur les différents et multiples acteurs qui y sont impliqués (Voir Tableau 4.2). On peut caractériser des mesures liées aux infrastructures et aux technologies développées par des acteurs étatiques (gouvernement/ministères) et les industries du secteur privé. Alors que des mesures plus économiques et sociales ; programme de subvention et de compensation, gestion des ressources, assurance agricole, agriculture urbaine et développement des communautés nourricières, sont la responsabilité des institutions étatiques, des organismes communautaires, des citoyens et même des agriculteurs.

D'autres mesures sont plus reliées aux techniques agricoles et des modes de production respectueuses à l'environnement (agriculture de conservation, agroécologie...etc.) (Smit et Skinner, 2002 ; OCD, 2023a).

En général, il n'existe pas de solution universelle ni de mesures d'adaptation applicables partout. Ces mesures doivent être adaptées et mises en œuvre à l'échelle locale, en fonction du contexte et des spécificités de chaque exploitation. Dans une perspective de durabilité, les mesures adoptées doivent viser à augmenter la productivité et les revenus, à favoriser l'adaptation aux changements climatiques, ainsi qu'à atténuer les émissions et les effets de ces changements. Un exemple de cette approche est l'« Agriculture intelligente face au climat » développée par la FAO (Yilai et al., 2024).

Tableau 4.2 - Catégories des options d'adaptation aux changements climatiques en agriculture (Smit et Skinner, 2002 ; OCDE, 2023a ; Jacobs et al, 2019)

Catégories des mesures d'adaptation	Acteurs impliqués	Mesures d'adaptation (description)
Mesures infrastructurelles et technologiques	<ul style="list-style-type: none"> • Gouvernements et autres organismes publics • Secteur privé (agro-industrie) 	<ul style="list-style-type: none"> • Développement des cultures (nouvelles variétés, cultivars et hybrides) • Systèmes d'information météorologique et climatique (systèmes d'alerte pour prévisions météorologiques quotidiennes et prévisions saisonnières) • Innovations technologiques en matière de gestion des ressources (gestion de l'eau, système d'irrigation et de drainage)
Mesures sociales, économiques et institutionnelles	<ul style="list-style-type: none"> • Gouvernements et autres organismes publics 	<ul style="list-style-type: none"> • Programme de subventions et de soutien à l'agriculture (assurance-récolte, programmes de stabilisation des revenus, programme de compensation) • Programmes de gestion des ressources (politique et programme pour influencer

	<ul style="list-style-type: none"> • Organismes communautaires et citoyens • Institutions privées • Agriculteurs 	<p>l'utilisation des terres et des ressources en eau / gestion intégrée des ressources)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Végétalisation des diètes • Agriculture urbaine - Plan de développement d'une communauté nourricière (PDCN) • Assurance privée • Participation à un programme de stabilisation du revenu • Diversification des sources de revenus
Mesures comportementales et culturelles de production	<ul style="list-style-type: none"> • Agriculteurs 	<ul style="list-style-type: none"> • Production agricole (diversification des types et variétés des cultures, modification de l'intensité de la production) • Utilisation des terres (changement de l'emplacement des productions, pratiques alternatives de jachère et de travail du sol) • Topographie du terrain (modifier la topographie du terrain) • Calendrier des opérations (modification du calendrier des opérations agricoles)
Mesures écosystémiques ou fondées sur la nature	<ul style="list-style-type: none"> • Agriculteurs 	<ul style="list-style-type: none"> • Agroécologie • Agriculture biologique • Agroforesterie

4.4- Adaptation et résilience : vers une agriculture durable

Étant donné la nature évolutive des changements climatiques, il est crucial de s'adapter continuellement aux nouvelles réalités. Le secteur agricole a non seulement la capacité de s'adapter, mais aussi de devenir résilient face aux défis. Selon le Cadre stratégique du gouvernement fédéral du Canada sur l'adaptation aux changements climatiques, pour qu'un système atteigne cette résilience, il doit être capable de résister et de s'adapter à divers chocs ou changements physiques, économiques ou sociétaux liés aux changements climatiques (Gouvernement du Canada, 2016).

De nombreux producteurs agricoles québécois ont déjà mis en place des mesures d'adaptation pour assurer la pérennité de leurs activités et leur résilience à long terme. En tant que gestionnaires de leurs terres, ces exploitants veillent à la protection des sols, de l'eau, de la biodiversité et des écosystèmes. Les programmes gouvernementaux, fédéraux et provinciaux, tels que ceux consacrés à la gestion des risques et au soutien des assurances, fournissent diverses formes d'aide aux agriculteurs. Cependant, des changements stratégiques supplémentaires et des mesures d'adaptation pourraient être nécessaires pour renforcer encore la résilience. Les sections suivantes explorent les principales mesures technico-socio-économiques et institutionnelles recommandées pour garantir une adaptabilité durable de l'agriculture.

Pour mettre en œuvre les mesures d'adaptation, qu'elles concernent l'échelle de l'entreprise ou soient d'ordre collectif, les producteurs devront suivre plusieurs étapes. Tout d'abord, ils devront se sensibiliser et s'informer sur les changements climatiques attendus et leurs impacts prévus. Ensuite, ils devront identifier les meilleures mesures à adopter pour leurs entreprises ou leurs régions et évaluer la faisabilité de leur mise en œuvre. Enfin, certaines de ces mesures nécessiteront des apprentissages, des essais et erreurs, ainsi que le développement de pratiques innovantes.

Les défis à venir pour les producteurs en matière d'adaptation sont importants. Pour cela, il est important d'accompagner les agriculteurs avec l'aide d'experts, en termes de sensibilisation et d'accompagnement par des conseillers formés et outillés, et de développer les recherches répondant aux questions relatives à l'adaptation aux changements climatiques.

4.4.1 - Adaptation des techniques reliées aux pratiques agricoles

La majorité des techniques de production actuellement en vigueur reposent sur des méthodes conventionnelles de production intensive, qui engendrent des effets néfastes sur l'environnement et la santé publique, comme l'utilisation excessive en engrais chimiques. Ces méthodes compromettent également la résilience des systèmes agricoles et augmentent leur vulnérabilité face aux changements climatiques (Watson et al., 2019).

Cependant, des techniques agricoles alternatives offrent des solutions prometteuses. Les méthodes basées sur l'agroécologie et l'agriculture biologique sont particulièrement reconnues pour leurs nombreux avantages. Elles améliorent non seulement la rentabilité de la production, mais réduisent également l'empreinte écologique de l'agriculture en favorisant une meilleure biodiversité naturelle et les services écosystémiques qui en découlent (Brewer et al., 2018 ; Anel et al., 2017). De plus, elles renforcent la capacité d'adaptation des systèmes agricoles face aux perturbations climatiques. Ces mesures d'adaptation intègrent les principes de l'agriculture durable en favorisant des pratiques telles que la conservation des sols, la gestion intégrée des ravageurs, l'adaptation des calendriers de culture et l'utilisation de technologies d'agriculture de précision (Brewer et al., 2018).

4.4.1.1 - Pratiques de conservation des sols

Un des objectifs clés pour une meilleure adaptation de l'agriculture au Québec face aux effets des changements climatiques est de conserver la santé des sols par l'amélioration de leur texture (CDAQ, 2021). Bien qu'elle soit émettrice de GES, l'agriculture a la capacité de capter le carbone et ainsi réduire ses émissions globales de GES, et elle le fait déjà. En continuant à adopter des pratiques de gestion bénéfiques, les producteurs peuvent améliorer les performances environnementales de l'agriculture. Bon nombre de ces pratiques sont liées à la gestion des sols.

En général, l'accumulation de matière organique est un objectif clé du Plan d'Action en Développement durable (PAD), car elle constitue un indicateur crucial de la santé des sols. En effet, la matière organique joue un rôle fondamental dans l'amélioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols, ce qui est essentiel pour garantir une agriculture durable et productive. Elle procure au sol une stabilité structurelle, réduit l'érosion, offre une protection

contre le compactage des sols et améliore l'aération, l'infiltration d'eau et la capacité de rétention d'eau du sol, caractéristiques clés qui seront particulièrement importantes en temps de sécheresse ou d'inondation. La matière organique des sols sert aussi de réserve pour les nutriments essentiels à la croissance des plantes, y compris l'azote, le phosphore et le soufre, et elle forme la base du réseau trophique du sol, constituant ainsi une fondation pour toute la vie du sol (Lefèvre et al., 2017).

Pour améliorer et préserver la santé des sols, plusieurs stratégies peuvent être envisagées, telles que l'augmentation de surfaces agricoles en cultures pérennes, l'utilisation de cultures de couverture, la diversification des espèces cultivées et la réduction du travail mécanique des sols (Gasser et al., 2023).

- Augmentation des surfaces en cultures pérennes

L'augmentation des surfaces cultivées en cultures pérennes au Québec offre plusieurs avantages, notamment en matière de santé des sols, ce qui est d'autant plus pertinent face aux effets négatifs du changement climatique. Les sols cultivés avec des plantes pérennes, comme la luzerne, le trèfle, ou la fléole des prés, présentent une meilleure teneur en matière organique et une stabilité structurelle renforcée par rapport aux systèmes de cultures annuelles. Ces cultures pérennes, bénéficiant d'une période photosynthétique plus longue et d'un système racinaire plus développé, favorisent un apport constant de carbone au sol. Ce processus joue un rôle clé dans la séquestration du carbone, contribuant ainsi à atténuer la concentration de CO₂ dans l'atmosphère. En outre, il aide à préserver la structure et la fertilité des sols, des éléments cruciaux face aux défis environnementaux posés par le changement climatique (Gasser et al., 2023).

L'adoption de ces systèmes pérennes permet non seulement de renforcer la résilience des sols aux perturbations climatiques, mais elle participe également à leur régénération, en améliorant leur capacité à résister aux phénomènes extrêmes liés aux changements climatiques, comme les sécheresses ou les inondations. Le renforcement de la matière organique dans le sol aide à prévenir l'érosion et à améliorer les propriétés hydrauliques des sols, ce qui est essentiel dans un contexte de dérèglement climatique où les conditions météorologiques deviennent de plus en plus imprévisibles (Gasser et al., 2023).

Pour encourager cette transition vers des systèmes pérennes, plusieurs stratégies sont envisageables, comme l'indiquent Gasser et Anger (2023). Cela inclut le développement de marchés pour les cultures pérennes, notamment pour les secteurs d'élevage, ainsi que la création de technologies adaptées à la production alimentaire humaine à partir de légumineuses fourragères ou d'autres espèces pérennes. De plus, la mise en place de systèmes de cultures de couverture, en alternance avec des plantes pérennes, pourrait offrir des solutions de gestion efficaces des sols tout en contribuant à la diversification des pratiques agricoles (Gasser et Anger, 2023).

Les cultures de couverture, par exemple, jouent un rôle clé dans l'atténuation des changements climatiques en séquestrant le carbone et en réduisant l'effet albédo, notamment en limitant l'absorption excessive de chaleur. Elles sont également cruciales pour maintenir la santé des sols en prévenant l'érosion, en améliorant l'infiltration de l'eau et en soutenant l'activité biologique du sol (Kaye et Quemada, 2017). En effet, ces systèmes contribuent à préserver la structure du sol, à mobiliser les éléments fertilisants et à lutter contre les ravageurs et maladies. En revanche, des pratiques agricoles intensives, comme le travail profond des sols ou l'exposition de surfaces non cultivées, peuvent entraîner une dégradation de la matière organique et nuire à la fertilité des sols, exacerbant ainsi les impacts négatifs du changement climatique.

Cette couverture peut être constituée d'une plante unique ou d'un mélange de plantes, semées soit en intercalaire avec la culture principale, soit en dérobé après la récolte, en fin de saison (Gasser et Anger, 2023). Selon la nature du sol, les cultures principales et la situation géographique, diverses espèces des familles des légumineuses, des graminées et des crucifères peuvent être choisies. Agriculture et Agroalimentaire Canada a mis en place un outil Web d'aide à la décision pour faciliter le choix des cultures de couverture adaptées (AAC, 2024).

Une fois mise en place dans les champs, cette couverture est détruite et enfouie pour enrichir le sol, servant d'engrais verts. Les cultures de couverture et les engrais verts sont bien documentés pour leurs multiples bénéfices économiques, agronomiques et environnementaux (Vanasse, 2017), mais aussi pour l'atténuation et l'adaptation aux changements climatiques (Michaud et al., 2020 ; Kaye et Quemada, 2017).

L'importance de maintenir une couverture du sol, que ce soit par des cultures de couverture ou des résidus de culture, est largement reconnue pour préserver la santé des sols (Wood et Bowman, 2021). Une couverture végétale permanente ou un paillis aide à conserver la matière organique et à soutenir l'activité biologique du sol. Cela contribue à préserver la structure du sol et ses propriétés hydrauliques en réduisant la formation de croûtes de battance, en favorisant l'infiltration de l'eau et en diminuant le ruissellement et les risques d'érosion. Les cultures de couverture jouent également un rôle crucial en maintenant l'activité des microorganismes des sols, en mobilisant les éléments fertilisants, en perturbant les cycles de certains ravageurs et maladies, et en limitant le développement des mauvaises herbes.

De plus, les effets positifs des cultures de couverture sur la productivité des cultures sont bien établis (Bourgeois et al., 2021). À l'inverse, les pratiques agricoles qui exposent le sol, comme le fait de laisser à nu des surfaces non utilisées ou de travailler de façon profonde les sols, réduisent la teneur en carbone organique et la fertilité des sols, où ces conséquences sont en avantages accentuées dans le contexte des changements climatiques.

En conclusion, l'intégration de cultures pérennes et de systèmes de couverture dans l'agriculture est une stratégie efficace pour atténuer et s'adapter aux effets du changement climatique. Ces pratiques permettent non seulement de maintenir la santé des sols face aux conditions climatiques extrêmes, mais aussi de renforcer la résilience des écosystèmes agricoles à long terme.

- Diversification et rotation des cultures

La diversification et la rotation des cultures jouent un rôle crucial dans l'agriculture de conservation des sols, en particulier face aux enjeux liés aux changements climatiques. En effet, ces pratiques permettent non seulement de contrôler les ravageurs et d'améliorer la santé des sols, mais elles contribuent également à l'adaptation des systèmes agricoles aux nouvelles conditions climatiques. Une étude menée au Missouri en 2022 a montré que la diversification des cultures annuelles améliore la santé des sols, à condition d'inclure plus de deux cultures dans la rotation (Veum et al., 2022). Ces rotations variées ont des effets positifs mesurables sur des indicateurs clés de la santé des sols, tels que la matière organique, l'azote disponible et la stabilité des agrégats,

ce qui est d'autant plus pertinent dans un contexte de fluctuations climatiques qui affectent les propriétés du sol.

Cependant, certaines cultures peuvent nuire à la qualité du sol, particulièrement dans un climat plus variable. Par exemple, les monocultures de maïs, de céréales et de pommes de terre, identifiées comme problématiques dès 1990, contribuent à la dégradation de la structure du sol, à la surutilisation des engrais et à la perte de matière organique (Tabi et al., 1990). De plus, la culture répétée du soya dans la rotation a été associée à des effets négatifs sur la santé des sols, en particulier la matière organique, ainsi qu'à une baisse des rendements du soya en Ontario (Agomoh et al., 2021). Cette dynamique est exacerbée par la variabilité des conditions pédoclimatiques, particulièrement au Sud d'Ontario et Québec, où les conditions de sol et de climat peuvent fortement varier d'une année à l'autre, ce qui rend certaines cultures moins adaptées aux nouvelles conditions climatiques (Vijayakumar, 2024 ; Veum et al. 2022)

Les cultures pérennes, en revanche, montrent des bénéfices significatifs pour la santé des sols, surtout par rapport aux cultures annuelles et maraîchères. Toutefois, la diversification des cultures annuelles, notamment en réduisant la fréquence du maïs et du soya, dépend aussi de la demande du marché et des conditions pédoclimatiques locales. Pour encourager cette diversification, il est nécessaire de proposer des alternatives rentables tout en mettant en avant les avantages écologiques et économiques pour les producteurs.

Une option prometteuse consiste à promouvoir l'introduction de céréales d'automne dans les rotations. Par exemple, le blé d'automne peut être semé directement dans le couvert de soya, sans travail de sol supplémentaire, ou juste après la récolte du soya, ce qui aide à protéger le sol contre l'érosion et améliore la structure du sol (Agomoh et al., 2021). Au printemps, ce blé couvre le sol, ce qui permet ensuite d'implanter des cultures intercalaires comme les trèfles, contribuant ainsi à la création d'une seconde culture de couverture tout en enrichissant le sol en azote pour la culture suivante, comme le maïs. Le seigle hybride, en tant que culture d'automne, présente également un intérêt en raison de sa productivité et de sa capacité à générer de la biomasse, bien que des défis subsistent pour sa commercialisation (Gélinas et Ruel, 2016).

Dans le contexte des changements climatiques, le canola d’hiver représente une autre alternative intéressante. Le réchauffement des températures hivernales pourrait favoriser l’adaptation du canola d’hiver aux conditions du Québec, offrant ainsi une couverture du sol pendant l’hiver. Cependant, pour être viable, les variétés actuelles nécessitent un semis précoce en août, ce qui n’est possible qu’après une céréale d’automne (Allard et Gasser, 2022). Ce type d’adaptation pourrait offrir une réponse aux défis posés par le réchauffement climatique tout en contribuant à la durabilité des sols et à la diversification des cultures.

- Travail réduit des sols et semi-direct

Le travail réduit des sols et le semis direct représentent des stratégies cruciales pour adapter l’agriculture aux effets des changements climatiques tout en contribuant à l’atténuation de leurs impacts. Traditionnellement, le labour conventionnel à l’automne, effectué avec une charrue à versoirs, est largement utilisé pour préparer le sol (Pigeon et al., 2012). Bien que cette méthode soit flexible et bien adaptée à différentes textures et humidités de sol, elle présente plusieurs inconvénients. Elle entraîne des coûts élevés en termes d’équipement, de carburant et de main-d’œuvre, tout en n’assurant pas toujours une décomposition optimale des résidus de culture (Al-Kaisi, 2019). De plus, l’absence de résidus en surface augmente les risques d’érosion hydrique et éolienne, ce qui, dans un contexte de changements climatiques, exacerbe les pertes de sol et la diminution du carbone organique, réduisant ainsi la fertilité du sol et la productivité agricole. Cette dégradation nécessite souvent une utilisation accrue d’engrais chimiques, ce qui augmente les émissions de CO₂, contribuant ainsi au réchauffement climatique.

Il existe des techniques alternatives de travail du sol qui offrent des avantages environnementaux, agronomiques et économiques, et qui peuvent remplacer le labour traditionnel. On parle ici des techniques de conservation des sols par le travail réduit ou sans labour, ainsi que des semis directs. Les techniques sans labour et le travail réduit du sol englobent des méthodes moins intensives que le labour traditionnel, laissant une bonne partie du sol couvert par des résidus de culture après le semis. Ces techniques se divisent principalement en deux catégories : les techniques culturales simplifiées et le semis direct (Laurent, 2015). Selon l’Union des producteurs agricole au Québec, 38.1 % des exploitants agricoles ont adoptés des techniques des techniques culturales simplifiées,

incluant la réduction du travail du sol et des pratiques visant la conservation des sols (UPA, 2022), où environ 30 à 35 % des terres agricoles dédiées aux grandes cultures (maïs, soya, céréales) sont cultivées en semis direct (Producteurs de grains du Québec, 2020).

Dans ce contexte, les techniques de travail réduit des sols et de semis direct offrent des alternatives intéressantes qui permettent non seulement de mieux s'adapter aux variations climatiques, mais aussi d'atténuer leur impact. Ces méthodes, qui comprennent le travail réduit du sol et le semis direct, sont moins intensives que le labour conventionnel et laissent davantage de résidus de culture à la surface du sol. Cela contribue à la protection du sol contre l'érosion et à l'amélioration de sa structure, en particulier dans des conditions climatiques où l'intensification des phénomènes météorologiques extrêmes (pluies torrentielles, sécheresses) rend la gestion du sol encore plus cruciale (Laurent, 2015).

Les techniques culturales avec un travail moins intensif du sol, telles que le déchaumage et le scarifiage, impliquent un travail superficiel du sol, généralement à une profondeur de 5 à 10 cm, pour enfouir partiellement les résidus de culture tout en préservant l'intégrité du sol (Lal et al., 2020). Ce type de travail réduit les perturbations physiques du sol, tout en maintenant une couverture de résidus qui aide à maintenir l'humidité et à prévenir l'érosion, un défi crucial dans un contexte de changements climatiques où les événements climatiques extrêmes, tels que les sécheresses et les pluies torrentielles, deviennent plus fréquents (Lal et al., 2020). Le semis direct, en revanche, consiste à semer directement dans le sol sans préparation préalable, ce qui minimise les perturbations du sol et permet de maintenir une couverture végétale permanente, contribuant ainsi à la stabilisation du sol et à la réduction de l'érosion (Teasdale et al., 2021).

Ces méthodes sont souvent complétées par l'utilisation de couverts végétaux, un élément central du Plan d'Agriculture Durable 2020-2030, qu'ils soient permanents, intermittents, vivants ou sous forme de résidus de culture. Les couverts végétaux jouent un rôle clé dans la gestion de l'eau, car ils piègent les nutriments et réduisent les risques de lixiviation tout en limitant l'érosion. En améliorant la structure du sol et en favorisant une meilleure infiltration de l'eau, ces pratiques permettent également d'augmenter l'activité biologique du sol, ce qui renforce sa résilience face aux aléas climatiques, comme les variations de température et d'humidité, de plus en plus fréquentes en raison du changement climatique (Moreno et al., 2021).

En outre, ces techniques permettent de réduire la dépendance aux intrants tels que les fertilisants chimiques et les carburants, ce qui offre des avantages économiques significatifs pour les producteurs en termes de réduction des coûts opérationnels (Alvarez et al., 2020). L'utilisation de couverts végétaux et la réduction des perturbations du sol permettent également un meilleur contrôle des mauvaises herbes, ce qui diminue la nécessité de recourir à des traitements chimiques, contribuant ainsi à une agriculture plus durable et respectueuse de l'environnement (Kirkegaard et al., 2021). Ces pratiques s'avèrent ainsi particulièrement adaptées pour faire face aux défis du changement climatique, tout en offrant des solutions à la fois écologiques, agronomiques et économiques pour une agriculture résiliente.

- Décompaction des sols

Le problème de compaction des sols est également important et entraîne des répercussions négatives sur la durabilité de l'agriculture, la santé des sols et de l'environnement en général. Un sol compacté influence le développement et la croissance normale des cultures, menant à des pertes importantes en quantité et en qualité de la production agricole (réduction de l'aération, système racinaire peu développé, carence en nutriments, etc.), engendrant ainsi des pertes économiques considérables. La compaction diminue la capacité d'infiltration du sol et augmente les risques d'érosion superficielle, ce qui provoque des conséquences environnementales néfastes en termes de ruissellement des matières nutritives, comme le nitrate et le phosphate, vers les cours d'eau et les plans d'eau (Lamarre, 2014 ; Al-Kaisi, 2016 ; Michaud et al., 2012). À cela s'ajoutent les émissions d'oxyde nitreux (NO₂) par dénitrification de l'azote minéral, qui contribuent aux changements climatiques (Camirand et Gingras, 2009).

La compaction des sols est influencée par plusieurs facteurs, tels que la nature et la structure du sol, son taux d'humidité, les pratiques agricoles et le type de machinerie utilisée. Les sols argileux, surtout en conditions humides, sont plus susceptibles d'être compactés sous la pression de machines lourdes. Les grandes cultures conventionnelles et intensives, qui utilisent des machines lourdes adaptées à des exploitations étendues, aggravent ce problème.

Cependant, il existe des mesures d'adaptation pour réduire ces effets et minimiser la compaction des sols. Par exemple, l'implantation de cultures de couverture avec des systèmes racinaires profonds, comme le radis et le sorgho, peut aider à décompacter le sol (Brown et al., 2017). Limiter la circulation des grandes machines dans les champs, surtout en période humide, améliore également la situation.

Les pratiques de conservation des sols, les techniques culturales simplifiées et le semis direct favorisent une décompaction naturelle surtout des sols lourds de type argileux. Cela s'explique par une circulation réduite et une meilleure capacité portante des sols (CPQ, 2000 ; Zanella, 2007). Enfin, une bonne organisation, la réduction des passages de machines lourdes et la planification de ces passages dans des couloirs définis (en suivant toujours les mêmes rangs lors des traitements et autres tâches) contribuent à diminuer le risque de compaction sur l'ensemble du terrain.

La compaction des sols représente un défi majeur pour l'agriculture durable, avec des répercussions considérables sur la santé des sols et de l'environnement, particulièrement dans le contexte des changements climatiques. Cette problématique est d'autant plus pressante à mesure que les conditions climatiques deviennent plus extrêmes, avec des périodes de sécheresse plus fréquentes et des pluies plus intenses, qui aggravent la compaction des sols (Lal, 2015). Un sol compacté entrave le développement des racines des cultures, réduisant leur capacité à accéder aux nutriments et à l'eau, ce qui conduit à une diminution de la production en termes de quantité et de qualité (Michaud et al., 2012). Ce phénomène est particulièrement problématique face aux défis climatiques, car il limite la résilience des sols face aux sécheresses et réduit leur capacité à capter l'eau en période de fortes pluies, augmentant ainsi les risques d'érosion (Al-Kaisi, 2016).

4.4.1.2 - Pratiques agroécologiques par l'agroforesterie

L'agroforesterie est définie par « l'interaction entre l'agriculture et les arbres, y compris l'utilisation agricole des arbres. Cela comprend les arbres dans les fermes et dans les paysages agricoles, l'agriculture en milieu forestier et le long des bordures forestières, ainsi que la production d'arbres et de cultures » (ICRAF, 2024).

L'agroforesterie s'inscrit parmi les diverses solutions basées sur la nature qui peuvent aider à s'adapter aux changements climatiques tout en combattant la perte de biodiversité. Ce modèle agricole gagne en popularité au Québec et suscite un intérêt croissant au sein de la recherche scientifique. Il s'agit d'un système intégré qui repose sur l'association intentionnelle d'arbres ou d'arbustes avec des cultures ou des élevages, permettant ainsi de créer des co-bénéfices grâce à leurs interactions (Anel et al., 2017).

Les systèmes agroforestiers s'inscrivent dans une approche agroécologique de l'agriculture, visant à renforcer la résilience des écosystèmes en adoptant des pratiques agricoles régénératrices. Ils offrent un potentiel significatif pour aider les agroécosystèmes à s'adapter aux changements climatiques en contribuant à la réduction de la température ambiante, à la diminution de l'érosion éolienne, à la séquestration du carbone et à l'amélioration de la structure et de la fertilité des sols, ainsi qu'à la biodiversité (Nasielski et al., 2015).

On trouve différents types de systèmes d'agroforesterie au Québec, chacun offrant des avantages spécifiques pour l'environnement, la lutte contre et l'adaptation aux changements climatiques, ainsi que pour la production agricole. Parmi les aménagements écologiques les plus répandus sur le territoire québécois, on peut citer les bandes riveraines végétalisées et les haies brise-vent. Cependant, d'autres pratiques agroécologiques, telles que l'apiculture associée à des espèces ligneuses, la culture sous couvert forestier, les cultures annuelles intercalaires avec des arbres et des arbustes, ainsi que l'aqua-forêt, sont moins populaires auprès des agriculteurs, bien qu'elles présentent également des bénéfices (AAC, 2006).

- Les bandes riveraines élargies et aménagées

Une bande riveraine est une zone tampon végétalisée située entre un champ cultivé et un cours d'eau ou un plan d'eau. Cette ceinture de végétation naturelle et permanente, qui entoure les plans d'eau, joue un rôle de transition entre les milieux aquatique et terrestre. Pour garantir l'efficacité de ses nombreuses fonctions, elle doit idéalement être composée d'un mélange de plantes herbacées, d'arbres et d'arbustes, de préférence des espèces indigènes. L'aménagement des bandes riveraines contribue à préserver la qualité de l'eau des cours d'eau, à réduire l'érosion des berges et le ruissellement, et à retenir et filtrer les eaux de ruissellement (comme les engrais et les

pesticides) avant qu'elles n'atteignent les cours d'eau. De plus, ces bandes jouent un rôle clé dans la séquestration du carbone, contribuant ainsi à l'adaptation et à l'atténuation des effets des changements climatiques. Elles favorisent également la création d'habitats naturels pour de nombreuses espèces fauniques, renforçant ainsi la biodiversité (Martineau, Boivin et Léger, 2013 ; Anel et al., 2017).

Au Québec, la Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables (PPRLPI) du gouvernement provincial exige la conservation d'une bande riveraine végétalisée d'une largeur minimale de 3 mètres à partir de la ligne des hautes eaux, pouvant atteindre jusqu'à 15 mètres selon le degré de pente et la hauteur du talus. En plus des normes minimales de protection inscrites dans la PPRLPI, qui sont appliquées par le biais de la réglementation municipale, certaines municipalités peuvent adopter des règlements spécifiques concernant l'aménagement des bandes riveraines, que ce soit en milieu agricole ou résidentiel (UPA, 2024 ; LégisQuébec, 2022). Dans le cadre du Plan d'Agriculture Durable 2020-2030 (PAD), l'aménagement de ces bandes est encouragé, notamment lorsqu'elles sont composées d'un mélange d'espèces végétales herbacées, d'arbres et d'arbustes indigènes, dans le but de doubler les superficies agricoles favorisant la biodiversité.

Cependant, les coûts liés à l'implantation et à l'entretien des bandes riveraines végétalisées, ainsi que la perte d'espace cultivable et de rendements, rendent cette pratique difficilement applicable par les agriculteurs. Pour faire face à ces défis, des programmes de subvention ont été mis en place, offrant des incitations financières pouvant atteindre 70 à 90 % des dépenses admissibles pour l'implantation d'aménagements agroenvironnementaux, comme le programme Prime-Vert 2023-2026 (MAPAQ, 2024a).

- Les haies brise-vent

Les haies brise-vent peuvent être aménagées entre les terrains agricoles. Elles se composent d'un alignement d'arbres et d'arbustes le long des champs, offrant une protection contre le vent et réduisant les dommages potentiels aux cultures (Brandle et al., 2004). Les haies brise-vent jouent un rôle essentiel dans l'adaptation face aux aléas climatiques et l'atténuation des changements climatiques, en réduisant l'érosion éolienne des sols et en minimisant les dommages causés par

des vents violents. De plus, ces haies constituent un milieu naturel qui favorise la biodiversité, servant d'habitats pour la faune et de sources de nourriture pour de nombreux pollinisateurs ainsi que pour les prédateurs naturels des ravageurs. Cela renforce la résilience des cultures et a des retombées positives sur les rendements et la productivité (AAC, 2009). Le développement de ces bandes végétales contribue à la séquestration du CO₂ atmosphérique, jouant ainsi un rôle important dans l'atténuation des changements climatiques. Tout comme les bandes riveraines, les haies brise-vent sont éligibles pour des subventions et des incitations financières que les agriculteurs peuvent utiliser pour la mise en place des aménagements agroenvironnementaux (MAPAQ, 2024a).

4.4.1.3 - Gestion intégrée des ennemis des cultures

Les changements climatiques affectent de manière significative l'agriculture, non seulement en modifiant les conditions de croissance des cultures, mais aussi en influençant la dynamique des ravageurs et des maladies. Les variations des températures, les précipitations plus erratiques, ainsi que l'augmentation des événements climatiques extrêmes, créent de nouveaux défis pour la gestion des ennemis des cultures. Par exemple, les ravageurs peuvent voir leurs cycles biologiques modifiés, leur aire de répartition élargie ou leurs prédateurs naturels devenir moins efficaces (Brodeur et al., 2013). Dans ce contexte, il devient essentiel de préparer la filière agricole pour s'adapter à ces évolutions.

Une des stratégies clés pour faire face à ces changements réside dans la gestion intégrée des ennemis des cultures, qui combine diverses méthodes pour réduire les risques tout en minimisant l'impact environnemental. Cette approche nécessite un suivi constant des populations de ravageurs et un approfondissement des connaissances sur leurs cycles biologiques, leurs plantes hôtes et leurs ennemis naturels. La recherche est donc primordiale pour comprendre l'évolution des risques liés aux changements climatiques et pour adapter les stratégies de gestion en conséquence. Par exemple, l'analyse des conditions bioclimatiques émergentes permet de planifier les périodes d'intervention et d'identifier les méthodes de lutte les plus efficaces en fonction des spécificités locales et des risques accrus (Gouvernement du Québec, 2004).

Dans ce cadre, la surveillance des ravageurs est un élément fondamental de cette gestion proactive. Le *Réseau d'Alertes Phytosanitaires* (RAP) du MAPAQ joue un rôle crucial en fournissant des informations actualisées sur les infestations de ravageurs dans les différentes régions,

permettant ainsi des interventions ciblées et opportunes. En outre, la participation d'experts agronomes, de conseillers et de techniciens agricoles au suivi de terrain est indispensable pour affiner les stratégies de lutte et prendre en compte les nouvelles dynamiques induites par les changements climatiques (MAPAQ, 2024b).

Les programmes comme le *Pôle d'Excellence en Lutte Intégrée* (PELI), qui promeut la réduction de l'usage des pesticides et la diversification des méthodes de lutte, sont des exemples d'initiatives visant à renforcer la résilience des systèmes agricoles face à l'évolution des ravageurs et des maladies. Le PELI facilite également le réseautage et la collaboration entre agriculteurs, chercheurs et acteurs du secteur pour adopter des pratiques agricoles durables et réduire la dépendance aux produits chimiques (Agrobonsens, 2024). La science citoyenne, qui permet d'impliquer les citoyens dans la surveillance des ravageurs, constitue une autre avenue intéressante pour améliorer la collecte de données et étendre la couverture géographique du dépistage (Kobori et al., 2016). Toutefois, la lutte intégrée demeure une action volontaire des agriculteurs, qui ne sont pas obligés de l'adopter, ce qui représente un obstacle majeur et une limite à son efficacité.

Les avancées technologiques jouent un rôle crucial dans la lutte contre les ennemis des cultures. L'utilisation de drones et de modélisations numériques permet d'optimiser la surveillance phytosanitaire et de mieux comprendre les interactions complexes entre les cultures, les ravageurs et les conditions environnementales (Boucher et al., 2017). Les technologies de détection avancées, comme la qPCR et la PCR numérique, peuvent offrir également des outils puissants pour identifier rapidement les ravageurs et évaluer leur virulence, permettant ainsi des interventions plus précises et ciblées (Comtet et al., 2015).

Cependant, les changements climatiques risquent de perturber l'équilibre entre les ravageurs et leurs prédateurs naturels. Certains ravageurs pourraient se développer plus rapidement ou s'étendre dans des zones où ils n'étaient pas présents auparavant, rendant leur gestion plus complexe. En réponse, il sera essentiel d'adopter une approche intégrée qui combine diverses méthodes de lutte, qu'elles soient biologiques, mécaniques, culturelles, génétiques ou chimiques, tout en évitant une dépendance excessive aux pesticides (Gouvernement du Québec, 2004). Des pratiques telles que l'utilisation de variétés résistantes, la diversification des cultures, la gestion de l'humidité par l'irrigation, ou l'installation de filets de protection peuvent contribuer à limiter les dégâts causés par les ravageurs et à maintenir des écosystèmes agricoles plus résilients (Louvel et Lessard, 2012).

Enfin, des actions visant à préserver la biodiversité, telles que l'aménagement de haies brise-vent, la végétalisation des bandes riveraines et la plantation de bandes fleuries, peuvent non seulement soutenir les ennemis naturels des ravageurs, mais aussi favoriser la pollinisation, essentielle à la production agricole. Ces pratiques sont d'autant plus importantes dans le contexte des changements climatiques, car elles renforcent la résilience des systèmes agricoles face à des conditions de plus en plus imprévisibles et extrêmes (MAPAQ, 2017).

4.4.1.4 - Agriculture intelligente et technologies de précision

Le secteur agricole est en pleine transformation grâce aux nouvelles technologies, offrant ainsi de nouvelles perspectives pour améliorer la productivité et la rentabilité des exploitations agricoles. Ces évolutions, qui remontent à la mécanisation, ont pris un tournant avec la révolution verte et les modifications génétiques, pour atteindre aujourd'hui l'agriculture de précision (McFadden et al., 2023). Cette révolution technologique, portée par l'agriculture 4.0 et 5.0, repose sur l'utilisation de données numériques, d'intelligence artificielle et de robotique, offrant ainsi de nouvelles solutions face aux défis croissants liés aux changements climatiques et à la gestion des ressources naturelles.

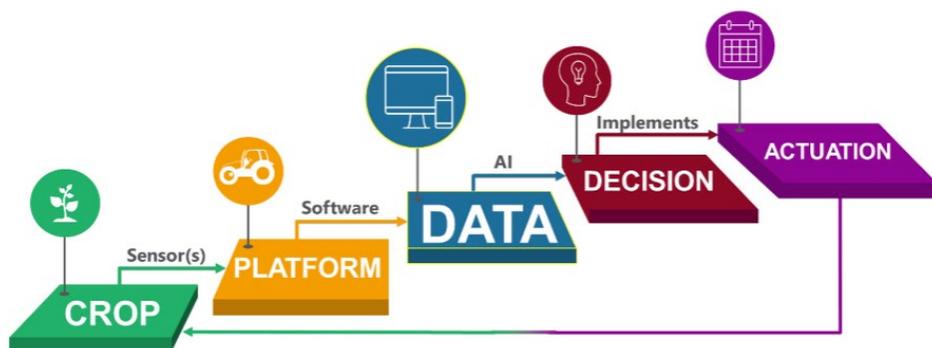
Avec les impacts du changement climatique, tels que les sécheresses prolongées, les variations de température extrêmes et la fréquence accrue des phénomènes climatiques extrêmes, l'agriculture est confrontée à des défis de plus en plus complexes (Fraser et Campbell, 2019). Pour s'adapter à ces changements, l'intégration des nouvelles technologies agricoles devient essentielle. L'agriculture de précision permet de répondre plus efficacement à ces enjeux en ajustant les pratiques agricoles en fonction des conditions climatiques et environnementales locales, favorisant ainsi une gestion plus durable et résiliente des terres (CEMA, 2017).

Traditionnellement, les agriculteurs se basaient sur leur expérience et leurs observations pour prendre des décisions concernant leurs cultures. Cependant, avec l'agrandissement des exploitations et l'intensification des pratiques agricoles, cette méthode devient de moins en moins applicable. L'utilisation d'une approche fondée sur les données, telle que l'agriculture 4.0, permettrait une gestion plus fine des exploitations agricoles, facilitant ainsi l'adaptation face aux conditions climatiques changeantes. Cette approche repose sur l'intégration des technologies

télématiques et des systèmes de gestion des données, permettant d'optimiser les opérations agricoles et d'améliorer l'efficacité des interventions telles que l'irrigation, la fertilisation ou la gestion des ravageurs (Saiz-Rubio et Rovira-Más, 2020).

Le principal défi de ces nouvelles technologies réside dans la gestion des données collectées, qui doivent être transformées en informations pertinentes pour aider les agriculteurs à prendre des décisions éclairées. Grâce à l'utilisation de capteurs, de drones, et de satellites, les données relatives à l'humidité du sol, la température ou la santé des cultures sont collectées en temps réel. Ces informations sont ensuite analysées pour modéliser les besoins spécifiques des cultures en fonction des conditions climatiques et des sols. Ainsi, les agriculteurs peuvent ajuster de manière plus précise l'irrigation, la fertilisation ou les traitements phytosanitaires, optimisant ainsi les ressources et minimisant l'impact environnemental (Saiz-Rubio et Rovira-Más, 2020).

Figure 4.3 – Les étapes du cycle de l'agriculture intelligente basée sur les données



Source : Saiz-Rubio et Rovira-Más, 2020

L'adoption de l'agriculture 5.0, qui va au-delà de l'agriculture 4.0, permet d'intégrer des dimensions sociales et environnementales pour une agriculture plus durable. Cette évolution met l'accent sur la collaboration entre les humains et les technologies pour promouvoir des pratiques agricoles qui soutiennent la résilience des écosystèmes et la durabilité environnementale. L'agriculture 5.0, grâce à des technologies avancées et une meilleure gestion des sols et de la

biodiversité, offre une réponse plus adaptative face aux changements climatiques, permettant ainsi aux agriculteurs de maintenir leur production tout en réduisant leur impact sur l'environnement (Fraser et Campbell, 2019).

Les technologies de précision modernes permettraient également de mieux gérer les menaces pesant sur les cultures. La surveillance phytosanitaire s'en trouve améliorée grâce à des outils d'aide à la décision, permettant de détecter plus rapidement les symptômes de stress hydrique, de carences nutritives ou de nuisances liées aux ravageurs. Par exemple, l'utilisation d'irrigation à taux variable, combinée à des systèmes de surveillance des sols, permet d'optimiser l'utilisation de l'eau, un enjeu majeur face aux pénuries liées au changement climatique (Fraser et Campbell, 2019).

Cependant, malgré les avantages indéniables de ces technologies, leur adoption n'est pas sans défis. Les jeunes agriculteurs, généralement plus enclins à adopter ces technologies, doivent cependant faire face à des obstacles financiers et éducatifs. De plus, l'intégration de ces technologies demande une formation continue et un accès à des ressources financières, des défis amplifiés par les inégalités d'accès à ces technologies dans les zones rurales ou les pays en développement (Roots Analyses, 2024).

- Irrigation à taux variable :

La plupart des systèmes d'irrigation automatiques utilisés, en particulier dans les cultures maraîchères, appliquent de l'eau de manière uniforme sur toute la surface cultivée. Cependant, les propriétés du sol et la disponibilité de l'eau varient considérablement au sein de nombreux champs. Les technologies d'irrigation à taux variable permettent d'adapter l'apport en eau aux besoins spécifiques des plantes, optimisant ainsi l'utilisation des ressources en eau (Soto et al., 2019).

Cette méthode repose sur des technologies de mesure sur le terrain (comme les tensiomètres pour mesurer l'humidité du sol et les capteurs optiques), ainsi que sur la télédétection (drones et images satellites) pour cartographier l'humidité et les besoins en eau des cultures dans différentes zones du même champ (Soto et al., 2019 ; Prévost, 2023). Le taux d'application d'eau est ajusté en fonction de ces mesures, tenant compte des variations au sein du champ.

Les systèmes d'irrigation de précision à taux variable augmentent l'efficacité de l'irrigation, réduisent les risques de stress hydrique, diminuent la consommation globale d'eau, et améliorent ainsi les rendements et la qualité des productions tout en permettant une meilleure gestion des ressources en eau. Cependant, malgré ces avantages significatifs, cette technologie implique des coûts d'investissement et d'entretien élevés (Soto et al., 2019 ; Jacobs et al., 2019).

- Application de fertilisants à taux variable

Dans le cadre de l'agriculture conventionnelle, en particulier dans les grandes cultures intensives, l'utilisation excessive de fertilisants chimiques et organiques engendre de nombreux risques environnementaux. Ces risques comprennent l'émission de gaz à effet de serre, la dégradation de la qualité des sols, ainsi que la pollution diffuse des eaux de surface et la présence de résidus chimiques dans les produits alimentaires. Ces impacts sont d'autant plus préoccupants dans un contexte de changements climatiques, où l'intensification des phénomènes météorologiques extrêmes, tels que les pluies torrentielles, augmente les risques de ruissellement et d'érosion des sols, facilitant ainsi la contamination des cours d'eau et des nappes phréatiques par le lessivage des nutriments (Soto et al., 2019).

Face à ces enjeux croissants, il est impératif de mettre en œuvre des pratiques agricoles visant à limiter l'utilisation excessive de fertilisants chimiques, notamment par l'adoption de technologies plus précises et durables. Parmi les solutions adaptées aux changements climatiques, l'application de fertilisants à taux variable apparaît comme une méthode clé pour réduire les impacts environnementaux tout en maintenant la productivité agricole. Cette technologie repose sur des outils de précision permettant de mesurer les déficits nutritifs dans le sol et les besoins spécifiques des cultures, à l'aide de capteurs, de drones ou d'images satellites (Soto et al., 2019). Ces technologies permettent de créer une cartographie détaillée des champs, identifiant les zones nécessitant un apport d'engrais spécifique, et d'ajuster automatiquement les doses appliquées en fonction des besoins réels des cultures et des variations du sol (par exemple, en tenant compte de la topographie ou de la teneur en nutriments).

L'adoption de l'application de fertilisants à taux variable offre de nombreux avantages écologiques et économiques. D'un point de vue environnemental, cette approche permet de réduire

significativement les émissions de gaz à effet de serre générées par l'épandage excessif de fertilisants, contribuant ainsi à atténuer les effets des changements climatiques (Tremblay et Michaud, 2014). Par ailleurs, cette technologie permet de limiter la quantité d'eau en ruissellement et la pollution des eaux, ce qui atténue les impacts sur les écosystèmes aquatiques et réduit les risques de contamination des ressources en eau potable. Sur le plan économique, l'utilisation optimisée des fertilisants permet de réduire les coûts des intrants tout en maximisant les rendements, ce qui peut améliorer la rentabilité des exploitations agricoles (Soto et al., 2019). Cependant, cette technologie, encore relativement nouvelle, fait l'objet de débats concernant sa rentabilité.

4.4.1.5 - Agriculture bio-intensive

Les impacts négatifs sur l'environnement des différents systèmes de production, conventionnels et biologiques, font l'objet de débats scientifiques, économiques et sociaux. Accusée d'augmenter les émissions de GES, l'agriculture conventionnelle intensive a pour objectif de maximiser la production et la rentabilité pour nourrir le monde. L'industrialisation de l'agriculture par son intensification a eu pour conséquences d'augmenter les émissions de GES le long de la chaîne de valeur. Pourtant, l'impact de la production agricole selon une approche d'analyse par cycle de vie démontre que les émissions de GES sont les plus élevées au niveau de la production dans les champs et les fermes (Poore et Nemecek, 2018).

D'un autre côté, l'agriculture biologique est souvent définie comme une alternative à la culture intensive et conventionnelle, et comme une façon d'améliorer la qualité de la production agricole. Selon l'International Federation of Organic Agriculture Movements (IFOAM), l'agriculture biologique améliore la santé des cultures, des sols et des humains, et, dans un cadre plus large, la santé de l'environnement (IFOAM, 2009). L'agriculture biologique assure le passage de la logique d'épuiser les ressources de la nature pour produire, vers la logique d'en profiter des services écologiques offerts par la nature pour produire (Jordan, 2008).

L'approche écologique de la culture biologique est basée sur l'utilisation de produits dits organiques plutôt que synthétiques. L'objectif est d'augmenter la fertilité et l'activité biologique du sol par l'accroissement de la qualité et de la quantité de matière organique dans celui-ci. Cette méthode de gestion vise à réduire l'utilisation de produits chimiques de synthèse, favorisant une

meilleure biodiversité naturelle d'espèces et une activité biologique plus importante des sols (FAO, 2011b).

L'agriculture biologique, bien qu'étant perçue comme une alternative plus écologique et respectueuse de l'environnement, fait face à des défis face aux changements climatiques. En raison de ses rendements souvent inférieurs à ceux de l'agriculture conventionnelle, elle nécessite plus d'espace pour produire la même quantité de nourriture (Smith et al., 2019). Cela peut rendre l'agriculture biologique plus vulnérable à l'impact du changement climatique, notamment en ce qui concerne les conditions climatiques extrêmes et les variations imprévisibles de température et de précipitations.

De plus, les pratiques biologiques, telles que le travail mécanique des sols (labour), sont sensibles aux effets du changement climatique, car elles peuvent nuire à la structure du sol, réduire sa capacité à retenir l'eau et accroître la vulnérabilité à l'érosion et à la dégradation. Ces méthodes affectent également la biodiversité naturelle et la fertilité des sols (Kämpf et al., 2016), des aspects cruciaux pour l'adaptation aux changements climatiques. Ainsi, bien que l'agriculture biologique vise à réduire l'utilisation de produits chimiques de synthèse, elle doit également évoluer pour intégrer des pratiques plus résilientes aux effets du climat, notamment en améliorant la gestion de l'eau et la conservation des sols. L'intégration de pratiques agroécologiques telles que les cultures de couverture, la rotation des cultures et l'aménagement de bandes riveraines pourrait améliorer la résilience de l'agriculture biologique aux conditions climatiques changeantes, tout en renforçant ses bénéfices environnementaux.

Comme l'agriculture biologique, l'agriculture de conservation est considérée comme une alternative à l'agriculture conventionnelle. L'agriculture de conservation se définit par une diminution du labour, tandis que l'agriculture biologique se concentre sur le retrait des engrais et des phytosanitaires de synthèse. Les relations entre agriculture de conservation et agriculture biologique sont souvent conflictuelles. Pourtant, ces deux formes d'agriculture, qui revendiquent chacune de pratiquer une production respectueuse de l'environnement, sont en fait deux approches « complémentaires et convergentes » (Goulet, 2008).

Une nouvelle approche bio-intensive est proposée, centrée sur une agriculture à la fois productive et écologiquement intensive, fondée sur une utilisation durable des ressources et des services écosystémiques, désignée sous le terme « agriculture écologiquement intensive » (AEI) (Bonny,

2010 ; Griffon, 2013). La révolution verte, associée à une révolution écologique avec l'AEI, nécessite un changement de paradigme. Ce changement est nécessaire dans les pratiques de production et de lutte contre les ravageurs, via une agriculture raisonnée et une lutte intégrée. L'intensification écologique consiste à développer une agriculture plus productive tout en réduisant l'utilisation d'intrants et en limitant son impact environnemental. Cela implique d'intensifier les mécanismes naturels des écosystèmes, ce qui peut inclure l'optimisation des sols en évitant le labour, en encourageant la couverture des sols, le soutien à l'activité des vers de terre, l'augmentation des périodes de photosynthèse pour générer plus de biomasse, ainsi que la promotion de la lutte biologique pour encourager les auxiliaires des cultures. Cette approche ne rejette pas l'utilisation d'engrais et de pesticides de synthèse, ni celle des organismes génétiquement modifiés (OGM) (Bonny, 2010 ; Griffon, 2013 ; Lavorel et Boulet, 2010). En revanche, l'adoption de cette approche bio-intensive vise à répondre aux besoins des marchés agricoles, tant en termes de quantité que de qualité des produits, tout en contribuant à la séquestration du carbone et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Par ailleurs, elle favorise le maintien, voire le développement, de la biodiversité, en soutenant des pratiques agricoles qui préservent et renforcent la diversité des écosystèmes. En outre, cette approche prend en compte la gestion de la circulation de l'eau, visant à maintenir sa qualité et à optimiser son usage, ce qui est crucial dans le contexte des changements climatiques.

L'agriculture écologiquement intensive (AEI) émerge comme une réponse stratégique face aux changements climatiques, en permettant d'adapter les pratiques agricoles tout en atténuant les impacts environnementaux. En intégrant des pratiques durables et respectueuses de l'environnement, l'AEI permet non seulement de s'adapter aux impacts des changements climatiques, mais aussi d'atténuer ses effets.

4.4.1.6 - Gestion technique et politique de l'eau

Les projections des scénarios climatiques futurs indiquent des changements significatifs dans les régimes de précipitations, notamment une augmentation des précipitations hivernales et printanières, une réduction du couvert neigeux due à des températures plus élevées en hiver, des épisodes de pluies extrêmes et des périodes de sécheresse prolongées entraînant des étages

estivaux plus sévères. Ces modifications du cycle hydrologique entraîneront des conséquences négatives sur la production agricole que ce soit conventionnelle et/ou biologique, la santé des sols et les ressources en eau, compromettant ainsi l'approvisionnement en eau d'irrigation (Macrae et Michaud, 2018 ; Ouranos, 2015 ; Charron et al., 2020).

Pour améliorer la gestion de l'eau au niveau des exploitations agricoles, plusieurs mesures d'adaptation peuvent être mises en place. En général, les pratiques qui favorisent la santé et la structure des sols, ainsi que leur perméabilité et leur capacité de rétention d'eau, renforceront la résilience des cultures face à ces risques accrus. Par exemple, l'adoption de techniques de conservation des sols, la réduction de la compaction et la diversification des rotations représentent de bonnes premières étapes. Les aménagements agroforestiers peuvent également jouer un rôle important dans l'atténuation de ces risques (Anel et al., 2017 ; Brown et al., 2017 ; Gasser et al., 2023).

En agriculture, améliorer la gestion de l'eau permet ainsi d'augmenter le rendement des cultures sans prélever davantage d'eau. Pour cela, les agriculteurs doivent optimiser la gestion de l'irrigation ainsi que leurs systèmes d'approvisionnement, de collecte et de stockage de l'eau. Ils doivent également améliorer la gestion des eaux de surface en révisant leurs aménagements hydroagricoles et leurs systèmes de drainage (Charron et al., 2020). En général, le renforcement de la résilience de l'agriculture est possible grâce à des mesures d'adaptation technologiques et politiques concernant la gestion des ressources en eau. Ces mesures d'adaptation se basent sur de bonnes pratiques agricoles, des technologies d'approvisionnement et d'irrigation, ainsi que sur des approches politiques et institutionnelles innovantes via la gestion intégrée des ressources en eau (Tableau 4.3).

Tableau 4.3 - Mesures d'adaptation technologiques et approches politiques et institutionnelles de la gestion de l'eau en agriculture (source : Rapport final RADEAU 2, Charron et al.,2020)

Technologies/Pratiques	Description
Technologies et bonnes pratiques agricoles	
Agriculture de précision	Optimisation de l'irrigation via données collectées (drones, GPS, satellites, capteurs). Mesure de la variabilité des champs, détection des maladies et mauvaises herbes.
Nanotechnologies et régulateurs de croissance	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation de nanomatériaux pour la formulation d'engrais/herbicides/pesticides et dans la dégradation des contaminants organiques et le traitement de l'eau • Contrôle de la transpiration, stimulation de la germination via nanoparticules, utilisation d'osmoprotecteurs contre le stress hydrique et la salinité.
Pratiques culturales bénéfiques	<ul style="list-style-type: none"> • Techniques visant à réduire les impacts environnementaux, améliorer la rétention d'eau des sols et diminuer les besoins d'irrigation (ex. travail minimal du sol, haies).
Paillis biodégradables et pulvérisables	<ul style="list-style-type: none"> • Paillis biodégradables à base d'amidon et bioplastique, augmentant la productivité de l'eau, installables avec les mêmes équipements que les paillis en plastique standard. • Paillis pulvérisables à la surface du sol, abordables et compétitifs par rapport aux paillis plastiques biodégradables.
Technologies d'approvisionnement en eau et systèmes d'irrigation	
Bassins d'irrigation	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation d'un étang (naturel ou artificiel) comme source d'eau continue, individuel ou collectif. La recharge doit être effectuée au moment opportun.

Réutilisation des eaux usées et les eaux de drainage	<ul style="list-style-type: none"> • Utilisation des eaux grises pour certaines cultures. Exemples: gestion de l'eau de lavage des légumes, réutilisation ou traitement dans des centres dédiés. • Réutilisation des eaux usées recyclées issues des centres de traitement. • Traitement les eaux de drainage, permettant leur réutilisation pour l'irrigation.
Rétention de l'eau de surface	<ul style="list-style-type: none"> • Reconnexion des cours d'eau et des milieux humides pour détourner l'eau vers des réservoirs en période de crue. • Installation de barrages et des réservoirs pour la collecte des eaux de crue.
Technologies des puits d'injections	<ul style="list-style-type: none"> • Injection d'eau dans une nappe phréatique pour la recharge, applicable en milieu urbain et agricole, dépendant des conditions géologiques et géographiques.
Systèmes d'irrigation localisée	<ul style="list-style-type: none"> • Système goutte-à-goutte, distribuant l'eau via des émetteurs, limitant les pertes par évaporation et réduisant les risques de maladies en appliquant l'eau directement à la zone racinaire. • Système d'irrigation enfoui : Réseau de conduites enterré en métal, offrant une distribution permanente et durable, adapté aux terrains irréguliers, utilisé principalement dans les cultures pérennes.
Technologies de mesures dans les champs	<ul style="list-style-type: none"> • Consolidation des informations sur les besoins des plantes, l'évapotranspiration, et d'autres facteurs pour améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau. • Réseau de capteurs pour suivre en temps réel l'évolution du statut hydrique du sol, utilisant des technologies comme la télédétection pour une gestion optimisée.
Approches politiques et institutionnelles	

Gestion intégrée (GIRE)	<ul style="list-style-type: none"> • La gestion intégrée permet de rassembler les acteurs de l'eau, assurer l'approvisionnement et le contrôle de la qualité et de la quantité de l'eau, préserver la biodiversité et assurer la prospérité des activités socio-économiques en gérant les risques.
Outils collectifs de gestion des eaux en milieu agricole	<ul style="list-style-type: none"> • Système USHER pour contrôler le prélèvement d'eau en période de sécheresse, incluant simulation de modèles de culture et suivi des débits d'étiage. • Outils informatiques permettent de voir les répercussions qu'auraient à court ou à long terme certaines décisions législatives liées à la gestion de l'eau en agriculture, selon différents scénarios et une analyse multisectorielle.

4.4.1.7 - Gestion des cultures

Les changements climatiques auront des effets néfastes sur l'agriculture, même s'ils offrent aussi des opportunités, telles que le développement de nouvelles cultures et l'expansion dans des régions jusqu'alors peu ou non exploitées au Québec. Pour renforcer l'adaptation et la résilience du secteur, il est essentiel que les agriculteurs modifient leurs pratiques, ajustent leurs opérations et leurs calendriers de culture, ainsi qu'utilisent de nouvelles variétés plus adaptées. Ces mesures leur permettront de mieux s'adapter et d'en tirer profit dans le contexte des changements climatiques (Brewer et al., 2018).

Les agriculteurs sont encouragés à ajuster leurs périodes de semis et de récolte en fonction des conditions climatiques changeantes et prévues, afin de réduire les effets néfastes de la chaleur et d'éviter le stress thermique et hydrique sur leurs cultures, ce qui pourrait affecter leur productivité (Wolfe et al., 2018). Des outils d'aide à la décision, tels que l'Atlas agro-climatique développé au Québec, s'avèrent très utiles pour adapter les calendriers des cultures et des opérations (Lepage et al., 2012).

L'adoption de cultures et de variétés plus tolérantes aux stress climatiques, tels que les sécheresses, les inondations et les températures élevées, est une stratégie d'adaptation couramment évoquée

(Loboguerrero et al., 2018). Les agriculteurs peuvent sélectionner des variétés en fonction de leur date de maturité et de leur génétique, afin de mieux s'adapter à la saison de croissance, aux précipitations et aux ravageurs (Brewer et al., 2018). Actuellement, ils peuvent exploiter des variétés cultivées plus au sud, où le cumul de chaleur est plus élevé, pour tirer parti de l'allongement de la saison de croissance (Lepage et al., 2012).

Bien que des variétés tolérantes à la chaleur soient disponibles pour certaines cultures, les efforts se concentrent principalement sur des espèces majeures comme le maïs et le blé. Les avancées en génie génétique offrent des opportunités pour de nouvelles cultures, en prenant en considération que le processus de développement de telles variétés est très complexe et lent, tandis que l'adoption de ces cultures dépend de plusieurs facteurs liés aux préférences du marché et au rendement (Wolfe et al., 2018). Cependant, une grande partie des semences développées par génie génétique sont des organismes génétiquement modifiés (OGM), souvent adaptées à des systèmes de cultures intensives qui privilégient des rendements élevés à court terme. Cette approche ne favorise pas la diversification des cultures ni l'adoption de variétés plus adaptées à une vision globale de la souveraineté alimentaire. Les OGM, en particulier ceux conçus pour résister aux herbicides ou pour améliorer la productivité des cultures à grande échelle, encouragent des pratiques agricoles intensives qui ne tiennent pas nécessairement compte des besoins écologiques et des réalités climatiques locales (Noack et al., 2024). Une telle orientation limite également la possibilité d'intégrer des variétés locales et plus résistantes aux conditions climatiques variées, ce qui pourrait être crucial dans un contexte de changements climatiques.

En revanche, une vision alternative axée sur la souveraineté alimentaire, notamment au Québec, pourrait permettre de nourrir davantage les communautés locales en privilégiant des cultures adaptées aux conditions locales et en réduisant la dépendance aux semences OGM importées. Cette approche favoriserait des systèmes agricoles plus durables, résilients aux changements climatiques, et réduirait les distances de transport des produits alimentaires, diminuant ainsi l'empreinte carbone du secteur agricole. En outre, elle offrirait une opportunité d'augmenter la biodiversité, de préserver les écosystèmes locaux et de soutenir une agriculture plus responsable (Qaim, 2020 ; Noack et al., 2024).

4.5 - Mesures d'adaptation socio-économiques et institutionnelles

En parallèle aux pratiques agricoles écologiques, diverses mesures d'adaptation d'ordre social, économique et institutionnel peuvent être envisagées. Ces approches témoignent d'une flexibilité d'adaptation et d'une capacité d'innovation qui renforcent la résilience tant de l'agriculture que des exploitations agricoles, ainsi que des communautés rurales et urbaines.

Ces mesures comprennent des fonctions essentielles des autorités publiques, notamment l'élaboration de plans d'adaptation et de stratégies climatiques, le renforcement des capacités par le biais de changements de gouvernance, d'éducation et de sensibilisation. Elles incluent également des services climatologiques et la communication d'informations pour appuyer la prise de décisions. On y trouve aussi des innovations sociales et économiques, telles que la tendance au végétalisme, la demande croissante pour des produits biologiques, l'agriculture urbaine, ainsi que des programmes d'assurance ciblant les risques climatiques et la mise en place de mécanismes financiers, comme des aides ex post en cas de catastrophe (OCDE, 2023a).

4.5.1 - Végétalisation des régimes alimentaires et demande élevée en produits biologiques ;

La demande croissante des québécois pour des produits végétaux alternatifs à la viande témoigne d'un profond changement de paradigme alimentaire, influencé par les préoccupations sanitaires et environnementales. Selon une étude de Léger réalisée en 2019, près de 9 % des Canadiens sont végétariens ou végétaliens, et 26 % se considèrent flexitariens (Légaré, 2020). Ce phénomène, largement motivé par des considérations éthiques et de santé, s'inscrit dans un contexte où 35 % de la population canadienne déclare réduire ou éliminer la viande de son alimentation. Ce segment de consommateurs, devenu incontournable, se tourne de plus en plus vers les protéines végétales, une tendance particulièrement marquée parmi les jeunes de moins de 35 ans, qui sont trois fois plus susceptibles d'adopter ce type de régime alimentaire que les plus de 49 ans (Parent et Charlebois, 2018).

Les chiffres de vente de produits comme le tofu illustre cette évolution : entre 2013 et 2017, les ventes ont augmenté de 20 % par an, passant de 22,36 M\$ à 38,04 M\$ dans les grandes chaînes de supermarchés (Fournier, 2019). Cette tendance, accompagnée par une demande croissante en graines et autres sources de protéines végétales à l'échelle mondiale (MAPAQ, 2020), reflète les changements profonds dans les habitudes alimentaires. Plusieurs facteurs expliquent cette transition, parmi lesquels la hausse des prix de la viande, une prise de conscience accrue des impacts sanitaires et environnementaux de la consommation carnée (IARC, 2015 ; Watson et al., 2019), ainsi que l'encouragement du Guide alimentaire canadien à privilégier les protéines végétales (Gouvernement du Canada, 2019).

Cette évolution alimentaire présente des implications directes pour l'agriculture, en particulier face aux enjeux liés aux changements climatiques. La réduction de la consommation de viande entraînera inévitablement une diminution des surfaces agricoles consacrées aux cultures fourragères destinées à l'élevage, une adaptation qui pourrait avoir des effets bénéfiques en termes de gestion des ressources naturelles. En parallèle, le Québec, avec 44 % des exploitations agricoles biologiques du pays, est bien positionné pour répondre à cette demande croissante. Avec 2 474 fermes certifiées en production biologique, le Québec se distingue par ses pratiques agricoles durables, particulièrement dans des secteurs comme les cultures céréalières, maraîchères et acéricoles (Keable, 2023). De plus, un sondage réalisé en 2022 révèle une augmentation de 5 % de la consommation de produits biologiques par rapport à 2020, avec 58 % des répondants déclarant consommer ces produits (Rioux, 2022).

Face aux impacts croissants des changements climatiques, l'agriculture biologique, perçue comme une réponse aux défis environnementaux, apparaît comme une solution clé pour réduire l'empreinte écologique de l'agriculture conventionnelle. Cette approche réduit les émissions de gaz à effet de serre et contribue à la préservation des sols, de la biodiversité et des écosystèmes. Les préoccupations sociétales croissantes concernant la santé des sols, le bien-être animal et la durabilité des pratiques agricoles renforcent cette tendance. En outre, la transition vers une alimentation végétale et la promotion des produits biologiques peuvent atténuer les effets du changement climatique en diminuant la déforestation et en réduisant les besoins en ressources agricoles pour l'élevage (Kamgang et al., 2024).

Ainsi, la réduction de la consommation de viande, couplée à l'adoption d'une agriculture plus durable, constitue un levier stratégique d'adaptation et d'atténuation face aux changements climatiques. Cette transformation alimentaire, soutenue par l'essor des produits à base de plantes et l'agriculture biologique, ouvrirait de nouvelles opportunités économiques tout en favorisant une approche plus respectueuse de l'environnement.

4.5.2- Agriculture urbaine et développement des communautés nourricières

En 2020, Montréal a été distinguée pour ses efforts dans la transition vers des systèmes alimentaires résilients et durables, ainsi que pour sa lutte contre l'insécurité alimentaire, recevant ainsi une reconnaissance dans le cadre du Pacte de Milan. Ce pacte, lancé lors de l'Exposition universelle de 2015, rassemble aujourd'hui plus de 240 villes à travers le monde, dont Montréal fait partie des 16 signataires en Amérique du Nord (Milan, 2015 ; FAO, 2019). Ce rôle des villes est d'autant plus crucial que, face aux changements climatiques, elles sont appelées à transformer leurs systèmes alimentaires pour les rendre plus locaux, équitables, résilients et durables. Avec plus de 50 % de la population mondiale vivant en milieu urbain, un chiffre qui devrait dépasser 66 % d'ici 2050 (ONU, 2024), cette transition prend une ampleur croissante.

Au Québec, en plus de Montréal, des villes comme Gatineau, Sherbrooke, Salaberry-de-Valleyfield, Rimouski et Granby ont intégré la question alimentaire dans leurs politiques publiques. Elles se sont engagées à institutionnaliser des stratégies alimentaires qui favorisent des systèmes plus durables et résilients, en particulier face aux défis environnementaux posés par les changements climatiques (Azima et Mundler, 2022). Ces politiques visent à garantir l'accès à des aliments de qualité tout en protégeant la biodiversité et en réduisant le gaspillage alimentaire, notamment à travers le développement de l'agriculture urbaine, un des piliers essentiels des stratégies alimentaires durables. L'agriculture urbaine, en tant qu'axe majeur du Pacte de Milan, contribue non seulement à la production alimentaire locale, mais aussi à l'atténuation des effets des changements climatiques en réduisant l'empreinte écologique des chaînes d'approvisionnement alimentaires urbaines (FAO, 2019).

Dans le cadre de cette transition, l'agriculture urbaine se déploie sous diverses formes, incluant des projets commerciaux sur des terrains privés, ainsi que des potagers à domicile ou des jardins communautaires gérés par des entités publiques ou communautaires sur des terrains publics (Duchemin, 2020 ; Duchemin et al., 2021). Cette diversification des pratiques agricoles jouerait un rôle dans l'augmentation de la résilience des communautés face aux impacts climatiques, tout en apportant des bénéfices multiples, notamment en matière de sécurité alimentaire, de santé et de cohésion sociale.

L'agriculture urbaine joue également un rôle central dans l'adaptation aux changements climatiques. Elle permet de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et de limiter les émissions de gaz à effet de serre (GES) en favorisant des pratiques agricoles plus écologiques, comme l'utilisation réduite de fertilisants chimiques et de pesticides de synthèse, tout en développant des circuits courts pour l'approvisionnement alimentaire (Santo et al., 2016). En outre, les services écosystémiques générés par l'agriculture urbaine, tels que la réduction des îlots de chaleur urbains par l'évapotranspiration des plantes et l'amélioration de la gestion des eaux pluviales, contribuent à renforcer la résilience des villes face aux effets du réchauffement climatique (Santo et al., 2016). Ces pratiques favorisent également la biodiversité urbaine en créant des habitats pour les pollinisateurs, comme les abeilles, et en soutenant d'autres espèces locales.

Les villes québécoises, comme Montréal, adoptent des politiques adaptées à leur contexte local pour soutenir l'agriculture urbaine. Ces politiques incluent des règlements sur l'utilisation des sols, tels que les permis pour la construction de serres ou l'élevage d'animaux, et des directives encadrant la production et la distribution des produits alimentaires urbains (Gouvernement du Québec, 2021). De plus, depuis 1998, la Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés, mise en place par le ministère de l'Environnement du Québec, encadre les activités agricoles urbaines afin de garantir la sécurité des pratiques (MELCCFP, 2023).

Enfin, des initiatives comme le Plan de développement de communautés nourricières (PDCN) offrent des solutions concrètes pour renforcer la résilience alimentaire des villes face aux défis climatiques. Soutenus par le MAPAQ, ces projets de développement de l'agriculture urbaine participative visent à promouvoir l'autonomie alimentaire des communautés, tout en intégrant des stratégies d'aménagement du territoire plus durables (MAPAQ, 2022). Ces plans favorisent une gouvernance locale qui valorise les acteurs du territoire, de la production à la consommation, et

contribue à une meilleure gestion des risques climatiques tout en répondant aux besoins alimentaires des populations urbaines.

En somme, à travers le développement de systèmes alimentaires urbains durables et résilients, l'agriculture urbaine apparaît comme un levier stratégique d'adaptation et d'atténuation face aux changements climatiques. Ces initiatives favorisent non seulement une plus grande autonomie alimentaire, mais participent aussi à la préservation des écosystèmes locaux, à la réduction des émissions de GES et à la création de villes plus durables et résilientes aux impacts des changements climatiques.

4.5.3- Gestion intégrée des ressources en eau (GIRE)

Les prévisions climatiques indiquent que les effets du réchauffement, notamment les variations des précipitations et l'augmentation du risque d'inondations et de sécheresses, poseront des défis majeurs pour la gestion des ressources en eau (Michaud et al., 2012). Ces phénomènes auront des impacts considérables sur l'agriculture, qui dépend fortement de la disponibilité de l'eau pour l'irrigation et la gestion des sols. Comme l'a souligné le rapport du GIEC, il est crucial de mettre en place des mesures d'adaptation face à ces effets du changement climatique, et ce, même si les efforts d'atténuation sont indispensables pour limiter les causes du réchauffement (GIEC, 2023). Cela implique la nécessité d'adopter une approche intégrée qui non seulement contribue à l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, mais aussi facilite l'adaptation aux impacts du changement climatique à long terme.

En matière de gestion de l'eau, cela inclut la résolution de problématiques complexes liées à la surexploitation des ressources, comme la surconsommation des eaux souterraines pour l'agriculture, qui menace la durabilité environnementale et augmente la vulnérabilité face aux événements climatiques extrêmes, , surtout les épisodes de sécheresse prolongées. Il a été prouvé que dans plusieurs régions du sud du Québec, la consommation d'eau souterraine, notamment par l'agriculture et l'industrie, dépasse parfois les taux de recharge des nappes phréatiques, ce qui entraîne fréquemment des situations de pénurie en eau à long terme (Larocque et al., 2015).

Depuis 2002, le Québec a mis en place la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) par bassin versant, une approche innovante de gouvernance qui repose sur la collaboration de tous les acteurs concernés. Cette stratégie vise à concilier les usages de l'eau — qu'ils soient agricoles, industriels ou urbains — avec les besoins de préservation des écosystèmes aquatiques, tout en tenant compte des principes du développement durable (MELCCFP, 2022). En favorisant une concertation active et volontaire entre les différents acteurs (municipalités, agriculteurs, entreprises, citoyens), la GIRE permet de mieux identifier les enjeux spécifiques à chaque territoire et de mettre en place des solutions collectives adaptées aux impacts du changement climatique.

En contexte de changements climatiques, la gestion intégrée des ressources en eau facilite également la gestion des risques liés aux événements extrêmes tels que les inondations et les sécheresses, en permettant une répartition plus équitable et plus durable de l'eau disponible. Cette approche intégrée permet de hiérarchiser les priorités d'action, en prenant en compte les impacts socio-économiques, notamment agricoles, et en adaptant les politiques aux spécificités locales, afin de préserver la qualité de l'eau, la biodiversité et la résilience des écosystèmes aquatiques face aux évolutions climatiques (MELCCFP, 2022). Ainsi, la GIRE constitue une réponse pragmatique et nécessaire pour faire face aux défis climatiques tout en assurant la pérennité des ressources en eau pour les générations futures.

4.5.4- Assurance agricole

Dans le contexte des changements climatiques, l'agriculture se trouve parmi les secteurs les plus vulnérables aux perturbations environnementales. Les agriculteurs doivent faire face à des variations climatiques de plus en plus imprévisibles, telles que des périodes de sécheresse prolongées, des inondations ou des vagues de chaleur extrême, qui peuvent compromettre la viabilité de leurs exploitations. Face à ces risques accrus, les mesures d'adaptation deviennent essentielles pour renforcer la résilience du secteur. L'assurance récolte constitue l'un des outils clés permettant aux producteurs agricoles de se protéger contre les pertes liées à des événements climatiques défavorables. En effet, souscrire une assurance contre les risques climatiques permet aux agriculteurs de stabiliser leurs revenus et d'assurer la continuité de leurs activités agricoles malgré les aléas climatiques (Smit et Skinner, 2002 ; Owen, 2020).

L'assurance agricole, comme l'exemple de l'assurance récolte dans plusieurs pays européens, joue donc un rôle important dans la gestion des risques climatiques. En couvrant des événements comme les gelées, les sécheresses, les inondations ou les ravageurs, ces assurances renforcent la résilience des exploitations en permettant aux producteurs de faire face aux conséquences financières des événements extrêmes. De plus, elles permettent de mieux se préparer aux impacts des changements climatiques, notamment en réduisant la vulnérabilité des exploitations face aux événements climatiques imprévisibles (Zaatra, 2021). L'augmentation de la demande pour ces produits d'assurance est directement liée à l'incertitude accrue associée au changement climatique, incitant de plus en plus d'agriculteurs à rechercher des mécanismes de protection pour leurs cultures (Cobourn, 2023).

Les programmes d'assurance subventionnés par l'État, comme ceux offerts par la Financière agricole du Québec (FADQ), jouent un rôle majeur dans l'adaptation de l'agriculture aux changements climatiques. Ces programmes permettent aux petites et moyennes exploitations de gérer les risques de manière plus efficace, en rendant les assurances plus accessibles financièrement. Sans ces subventions, les coûts liés à la gestion et au règlement des sinistres risqueraient de rendre ces produits économiquement non viables pour de nombreux producteurs, limitant leur capacité à s'adapter aux nouvelles conditions climatiques (Glauber et al., 2021). Par exemple, le programme d'assurance récolte (ASREC) de la FADQ couvre une large gamme de cultures, allant des céréales aux cultures maraîchères et à l'arboriculture, protégeant ainsi les exploitations agricoles contre divers aléas climatiques (FADQ, 2024b).

Cependant, bien que l'assurance agricole soit un outil d'adaptation efficace, elle peut aussi entraîner des effets pervers, comme la "mal-adaptation". Cela se produit lorsque les producteurs, en étant protégés financièrement, prennent des risques accrus en cultivant des espèces peu adaptées aux nouvelles conditions climatiques. En négligeant des stratégies d'adaptation à long terme, comme la diversification des cultures ou la mise en place de pratiques agricoles plus durables, les agriculteurs pourraient se retrouver davantage vulnérables aux changements climatiques futurs (Ignaciuk, 2015 ; OCDE, 2016). Par exemple, certaines assurances, comme l'assurance paramétrique, pourraient encourager les agriculteurs à maintenir des pratiques agricoles qui ne tiennent pas compte des prévisions climatiques, comme la culture de maïs et de soja dans des zones soumises à des vagues de chaleur extrême (Antón et al., 2012). L'assurance paramétrique est un

type d'assurance qui repose sur des paramètres pré-définis et mesurables, plutôt que sur une évaluation traditionnelle des pertes réelles. Au lieu de rembourser une indemnité en fonction des dommages observés, l'assureur verse une indemnité en fonction d'un paramètre spécifique qui a été convenu à l'avance dans le contrat, tel que la quantité de pluie, la vitesse du vent ou la température, par exemple (Western Financial Group, 2024). Ce phénomène, où l'assurance réduit l'incitation à l'adopter des mesures préventives, pourrait compromettre les efforts pour renforcer la résilience du secteur agricole face aux impacts climatiques futurs.

En conclusion, bien que l'assurance récolte et d'autres formes d'assurances agricoles offrent un soutien important face aux risques climatiques, elles doivent être intégrées dans une stratégie plus large de gestion des risques climatiques. Il est nécessaire d'encourager une approche proactive qui combine la protection financière avec des pratiques agricoles adaptatives, telles que la diversification des cultures, l'agriculture de conservation et la gestion intégrée des ressources naturelles. Seule une telle approche permettra de garantir une résilience durable de l'agriculture face aux défis croissants posés par les changements climatiques.

4.5.5- Services climatologiques (information, alerte précoce, sensibilisation)

Actuellement, nos connaissances sur l'évolution des phénomènes météorologiques et des aléas climatiques demeurent restreintes. Cela rend difficile la détermination de tendances ou la réalisation de projections fiables. Cette situation engendre des incertitudes sur les impacts à moyen et long terme des changements climatiques. Cela concerne particulièrement la fréquence d'événements tels que les fortes précipitations, la grêle, les températures extrêmes et les sécheresses. Ce manque de compréhension complique l'évaluation et la gestion des risques, notamment pour la production agricole, et limite la certitude des prévisions liées à d'autres risques, comme les inondations (Ouranos, MAMH et ministère de la Sécurité publique, 2020).

Malgré ces défis, l'amélioration continue des connaissances climatologiques favorise l'adaptation et l'atténuation des effets des changements climatiques. Il est crucial de fournir des informations pertinentes pour faciliter la prise de décision, en développant des systèmes d'alerte précoce, des services climatologiques, des outils d'aide à la décision et des activités de sensibilisation (Ouranos, 2020) (Annexe 2).

La demande croissante pour des informations climatiques nécessite également le développement d'outils de diffusion adaptés aux divers usagers. Des lacunes persistent dans la compréhension des extrêmes climatiques, et l'intérêt pour des variables difficiles à mesurer, comme le verglas et l'humidité, souligne le besoin d'outils d'analyse appropriés. De plus, l'innovation dans les méthodes de post-traitement multivarié est essentielle pour assurer la cohérence et la précision des informations fournies (Atlas Climatique du Canada, 2024a).

Pour répondre à ces enjeux, plusieurs organismes étatiques et privés s'engagent dans le développement des services climatologiques afin de produire des bases de données et des prévisions climatiques plus précises pour améliorer la capacité d'adaptation des sociétés. À titre d'exemple, Ouranos au Québec a élaboré une stratégie visant à soutenir les différentes parties prenantes dans leur processus d'adaptation. Cette stratégie vise plusieurs objectifs clés : améliorer la modélisation climatique afin de produire des simulations de qualité, approfondir la connaissance des aléas climatiques, assurer une quantification continue des changements climatiques, enrichir les services climatiques avec des analyses robustes, et garantir la rigueur scientifique des messages diffusés (Ouranos, 2020).

Les services climatologiques, en particulier ceux qui portent sur l'information, l'alerte précoce et la sensibilisation, sont essentiels pour les producteurs agricoles au Québec face aux défis croissants des changements climatiques. Bien que ces services restent encore en développement, leur évolution et leur personnalisation pour répondre aux besoins spécifiques des agriculteurs permettent une meilleure gestion des risques climatiques, une planification agricole plus précise, et une amélioration de la résilience face aux événements climatiques extrêmes.

4.5.6 - Éducation, sensibilisation et diffusion de l'information

L'éducation, la sensibilisation et la diffusion de l'information jouent un rôle fondamental dans l'adaptation de l'agriculture aux changements climatiques. Alors que le secteur agricole est particulièrement vulnérable aux variations climatiques, il est impératif que les acteurs concernés disposent d'informations pertinentes et accessibles.

L'information spécialisée est essentielle pour soutenir la prise de décision. Elle fournit des analyses détaillées et des recommandations fondées sur des données scientifiques, permettant aux décideurs politiques d'évaluer les impacts des changements climatiques sur des secteurs spécifiques tels que l'agriculture. Par exemple, des études peuvent analyser comment les variations de température et les schémas de précipitations affectent les rendements des cultures ou la santé du sol. Ces informations sont cruciales pour planifier des stratégies d'adaptation efficaces (Swart et al., 2014).

L'intégration des savoirs scientifiques et traditionnels est également d'une grande pertinence. Les savoirs locaux, souvent transmis au fil des générations, apportent une perspective unique sur les variations climatiques et les stratégies d'adaptation. Par exemple, certaines méthodes agricoles ancestrales peuvent être particulièrement adaptées aux conditions locales, offrant des solutions viables lorsque les données scientifiques sont insuffisantes ou inadaptées (Dorji et al., 2024). Cette approche hybride, qui valorise les savoirs traditionnels tout en les combinant avec les avancées scientifiques, représente un atout précieux pour développer des solutions agricoles durables et adaptées aux réalités locales (McCoy, 2024).

Le volet de l'éducation et de la sensibilisation est crucial pour changer les comportements. Informer et former les citoyens, les entreprises et les organismes sur les enjeux climatiques et les actions à entreprendre est essentiel. Des campagnes de sensibilisation peuvent aider à promouvoir des comportements écoresponsables, en soulignant l'impact des choix individuels sur l'environnement. Toutefois, il est important de noter que produire davantage d'informations de qualité ne garantit pas leur utilisation. Malgré la disponibilité de nombreux outils d'adaptation, leur application pratique par les utilisateurs reste insuffisamment documentée (Bachand et al., 2012).

Les savoirs locaux et traditionnels apportent des éclaircissements sur les variables climatiques et enrichissent les données scientifiques. En intégrant ces connaissances dans les systèmes modernes de surveillance environnementale, on obtient une vision plus nuancée des changements climatiques. Cela est particulièrement pertinent pour la formulation de mesures d'adaptation, où les savoirs traditionnels peuvent combler des lacunes lorsque les données scientifiques sont manquantes (Dorji et al., 2024 ; McCoy, 2024).

Au Québec, le niveau de compréhension des changements climatiques varie considérablement parmi les professionnels, les entreprises et les communautés. Certaines personnes possèdent une

sensibilisation accrue, tandis que d'autres manquent d'informations essentielles (Champagne St-Arnaud et al., 2022). Pour remédier à cette disparité, des efforts ciblés de sensibilisation sont nécessaires dans les secteurs public et privé. Plus les individus et les organisations comprennent les enjeux climatiques, plus ils seront en mesure de prendre des mesures proactives et de s'engager dans des processus d'adaptation (Marquet et Salles, 2014).

En somme, une approche intégrée qui combine différentes formes de connaissances, renforce la sensibilisation et valorise les savoirs locaux est essentielle pour améliorer l'efficacité des efforts d'adaptation dans le secteur agricole face aux changements climatiques. Cette démarche nécessite une collaboration étroite entre scientifiques, décideurs et communautés locales, afin d'élaborer des solutions qui soient à la fois pertinentes et applicables (Marquet et Salles, 2014). En renforçant l'éducation et la sensibilisation, le Québec pourra mieux se préparer aux défis posés par les changements climatiques et garantir la durabilité de son agriculture pour les générations futures.

4.5.7 - Planification et action publique

Le Québec, conscient des enjeux cruciaux liés aux changements climatiques, a établi un cadre institutionnel pour promouvoir l'adaptation et la résilience de ses communautés et écosystèmes. Ce cadre repose sur une série de stratégies, de plans et de politiques impliquant le gouvernement, les municipalités, les communautés et les partenaires de la recherche. En clarifiant les rôles et les responsabilités de chacun, ce dispositif cherche à garantir une réponse intégrée et efficace aux défis environnementaux croissants (Marquet et Salles, 2014). Dans cette section, nous présenterons les plans d'action, les stratégies et les mesures envisagées pour faire du Québec un modèle d'adaptation face aux impacts des changements climatiques sur tout sur l'agriculture, tout en respectant les engagements internationaux et provinciaux en matière de climat.

Parmi ces initiatives, le « Plan pour une Économie Verte 2030 » et son « Plan de mise en œuvre 2024-2029 » se distinguent par leur objectif de transformation des pratiques économiques, intégrant des critères de durabilité et de résilience, tout en renforçant l'économie locale (Gouvernement du Québec, 2020 ; Gouvernement du Québec, 2024a).

Ce plan inclut des initiatives comme le consortium « Ouranos », qui vise à intégrer les connaissances scientifiques dans les décisions publiques et privées, en promouvant la recherche sur les impacts climatiques et en diffusant des informations accessibles aux décideurs (www.ouranos.ca). La programmation « Climat Municipalités » soutient les municipalités dans la planification de leurs stratégies d'adaptation, en offrant des ressources financières et techniques, ainsi que des formations adaptées (MELCCFP, 2024). Les « Plans d'Adaptation Municipaux » visent à élaborer des plans spécifiques aux réalités locales, en menant des analyses de vulnérabilités et en impliquant les citoyens dans le processus (Ouranos, MELCCFP, 2024).

Le « Plan Stratégique 2023-2027 » du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCCFP, 2023a) sert de feuille de route pour le gouvernement, coordonnant les efforts d'adaptation à l'échelle provinciale. La « Stratégie Gouvernementale d'Adaptation aux Changements Climatiques » identifie des secteurs prioritaires tels que la santé et l'agriculture, tout en promouvant des investissements dans des infrastructures durables et en sensibilisant le public sur les enjeux climatiques (Gouvernement du Québec, 2013).

L'engagement de tous les acteurs est essentiel dans ce plan institutionnel pour l'adaptation aux changements climatiques au Québec, qui représente un engagement fort envers une approche proactive et durable. Le gouvernement coordonne les efforts et alloue les ressources nécessaires, tandis que les municipalités élaborent et mettent en œuvre les plans d'adaptation en collaboration avec les citoyens. La participation active des communautés et des citoyens garantit que les mesures d'adaptation répondent à leurs besoins spécifiques, tandis que les partenaires de la recherche apportent les données et analyses indispensables pour éclairer les décisions politiques. En unissant les efforts, la co-construction et la participation de tous ces acteurs, ainsi qu'en intégrant les connaissances scientifiques, le Québec peut renforcer la capacité d'adaptation et la résilience des écosystèmes face aux défis environnementaux (Marquet et Salles, 2014).

Un exemple de plan d'action ciblé pour le secteur agricole est le Plan d'Agriculture Durable 2020-2030 (PAD). Depuis 2021, le gouvernement du Québec a lancé le PAD 2020-2030, ayant pour but de réduire l'empreinte écologique et d'atténuer les impacts négatifs des pratiques agricoles sur l'environnement, en tant que mesures d'adaptation et de mitigation face aux changements climatiques.

- Plan d'agriculture durable - PAD 2020-2030 ;

S'inscrivant dans les orientations de la stratégie canadienne pour une agriculture durable (Gouvernement du Canada, 2024) et répondant aux principes du développement durable de l'ONU (ONU, 2020), le PAD a pour cible de réduire l'empreinte environnementale de l'agriculture au Québec, identifiant des objectifs et favorisant les démarches agroenvironnementales concertées et mobilisées vers l'atteinte de résultats concrets.

Le Plan d'Agriculture Durable 2020-2030 vise à assurer la durabilité du secteur agricole face aux changements climatiques et aux préoccupations sanitaires liées aux pratiques agricoles. Cinq objectifs ont été établis, chacun avec des indicateurs spécifiques : (1) Réduire l'usage des pesticides et leurs risques pour la santé et l'environnement ; (2) Améliorer la santé et la conservation des sols (culture semi-direct, culture de couverture, travail réduit du sol, etc.) ; (3) Améliorer la gestion des matières fertilisantes (agriculture de précision) ; (4) Optimiser la gestion de l'eau (irrigation adaptée, gestion intégrée des ressources en eau) ; (5) Améliorer la biodiversité (pratiques agroécologiques, bandes riveraines végétalisées et haies brise-vent).

4.5.8 - Soutien financier et renforcement des capacités

Le financement public dans le domaine de l'innovation et de la production de connaissances agricoles aide le secteur à mieux s'adapter aux changements climatiques et à renforcer sa résilience (Wreford et al., 2017). Un rapport de l'OCDE en 2023, portant sur la question du financement de la production de connaissances agricoles dans 54 pays, révèle que ces financements restent relativement limités (OCDE, 2023a). Bien que le financement soit crucial pour améliorer les capacités d'adaptation de l'agriculture et atténuer les impacts des changements climatiques, il constitue un levier essentiel pour les initiatives d'adaptation menées par les gouvernements, les centres de recherche et les organisations non gouvernementales (ONG) (Biagini et al., 2014 ; Owen, 2020 ; Simonet, 2016). Des projets tels qu'« Action Climat Québec » et « Agriculimat », financés par le gouvernement du Québec, ainsi que le « Laboratoire vivant - Racines d'avenir (2023-2028) » de l'UPA, soutenu par le programme « Solutions agricoles pour le climat — Laboratoires vivants » du gouvernement du Canada, illustrent parfaitement cette dynamique en fournissant des ressources et un cadre pour aider les agriculteurs du Québec à adopter des pratiques

durables dans leur gestion quotidienne (Gouvernement du Québec, 2024b ; Agriculimat, 2024 ; UPA, 2023). Ces projets et programmes visent le renforcement des capacités via l'éducation, la sensibilisation, le financement de la recherche et le transfert de connaissances.

La recherche et développement publique joue un rôle fondamental en fournissant des données précises qui aident les acteurs privés à prendre des décisions éclairées concernant l'adaptation. Les subventions et financements ciblés encouragent l'innovation en matière de pratiques agricoles durables, permettant aux agriculteurs d'accéder à des technologies telles que des systèmes d'irrigation économes en eau, des semences résistantes et des méthodes agroécologiques, réduisant ainsi leur vulnérabilité face aux événements climatiques extrêmes (Wathall et al., 2012 ; El Bakali et al., 2023).

Un autre aspect important est le soutien à la recherche sur les prévisions météorologiques et les systèmes d'alerte précoce, qui représentent des outils importants pour aider les producteurs à anticiper et à atténuer les effets néfastes des événements extrêmes. Les exploitants agricoles dépendent directement ou indirectement des infrastructures publiques, telles que les systèmes d'irrigation, de drainage et de réservoirs d'eau, dont la disponibilité impacte leur capacité à faire face aux changements climatiques (Huang et Wang, 2014).

De plus, des instruments financiers comme les prêts à taux réduit et les services d'assurance agricole aident les agriculteurs à surmonter les difficultés économiques résultant des pertes de récolte, facilitant ainsi une gestion proactive des risques (Glauber et al., 2021). Enfin, en s'associant à des initiatives d'éducation et de sensibilisation, ces programmes renforcent les capacités locales d'adaptation.

DISCUSSION

Les changements climatiques auront des répercussions diverses et complexes sur la production agricole mondiale dans les prochaines décennies. Plusieurs études soulignent la diversité des effets du réchauffement climatique sur les rendements agricoles, présentant des conséquences à la fois positives et négatives. À l'échelle mondiale, les recherches mettent en évidence l'augmentation de la variabilité des conditions climatiques, ainsi qu'une fréquence accrue des événements extrêmes, tels que des vagues de chaleur, des sécheresses et des inondations. Bien que le réchauffement climatique puisse offrir certaines opportunités, comme l'allongement de la saison de croissance pour certaines cultures, il menace également la sécurité alimentaire à long terme. En outre, les variations climatiques favorisent la propagation des maladies et des insectes nuisibles, introduisant de nouveaux défis pour la gestion des cultures et des sols (Smith et Olesen, 2010).

Les stratégies d'adaptation aux effets des changements climatiques sont multiples. Elles incluent la diversification des cultures, l'amélioration de la gestion de l'eau et l'adoption de pratiques agricoles écologiques, telles que la conservation des sols, l'agriculture bio-intensive et l'agroforesterie. La synthèse des recherches mondiales révèle que pour une résilience durable face aux changements climatiques, ces pratiques doivent être associées à des efforts d'atténuation visant à limiter les émissions de gaz à effet de serre (GES). Les stratégies d'adaptation et d'atténuation, bien que distinctes, sont souvent interconnectées et complémentaires pour réduire les impacts des changements climatiques (Moser et Ekstrom, 2010).

Au Québec, l'agriculture est particulièrement vulnérable aux effets des changements climatiques. Certains aspects du climat, tels que l'augmentation des niveaux de CO₂ et l'allongement de la saison de croissance, pourraient théoriquement bénéficier à certaines cultures. Cependant, ces avantages restent limités face à l'intensification des phénomènes climatiques extrêmes, tels que les vagues de chaleur et les sécheresses prolongées. Selon les projections climatiques, la variabilité accrue des conditions pourrait nuire à la productivité agricole en perturbant les cycles de culture, affectant la qualité des sols et des récoltes (Ouranos, 2015). L'agriculture québécoise devra aussi faire face à une multiplication des menaces liées aux insectes nuisibles et aux maladies, exacerbées par un climat plus chaud et humide.

Le secteur agroalimentaire, fortement tributaire de conditions climatiques stables, se verra confronté à des coûts de production plus élevés, des rendements incertains et des risques économiques accrus. L'analyse des données disponibles met en évidence une grande variété de vulnérabilités parmi les exploitations agricoles, selon leur taille, localisation et mode de production. L'évaluation des risques nécessite une approche flexible pour comprendre les impacts locaux des changements climatiques et ajuster les stratégies en conséquence.

Les producteurs agricoles québécois ont déjà mis en place diverses stratégies d'adaptation, telles que la diversification des cultures, l'amélioration de la gestion de l'eau et l'adoption de technologies plus résilientes. Toutefois, la rapidité des changements climatiques exige une adaptation continue et renforcée, avec l'intégration de nouvelles pratiques agricoles, l'introduction de technologies innovantes et une gestion plus efficace des ressources naturelles (Fatemi et al., 2017).

La discussion sur les solutions envisageables commence par l'identification des mesures nécessaires pour renforcer la résilience du secteur agricole face aux changements climatiques. Bien que certaines pratiques agricoles existantes puissent atténuer les impacts immédiats du changement climatique, il est essentiel de promouvoir des solutions plus durables à long terme. Parmi celles-ci, l'agroforesterie, l'agriculture bio-intensive et l'agriculture de conservation figurent parmi les pistes prometteuses pour accroître la durabilité de l'agriculture québécoise. Ces pratiques contribuent à la biodiversité, à la protection des sols, à l'optimisation de la gestion de l'eau et à la réduction des émissions de GES.

Cependant, la mise en œuvre de ces solutions se heurte à des obstacles, notamment des coûts d'investissement initiaux élevés, la nécessité de formation et un soutien institutionnel adapté. Par exemple, bien que l'agroforesterie présente de nombreux avantages, elle soulève des préoccupations concernant la perte de terres cultivables en raison de son caractère extensif. De même, l'agriculture de précision, qui permet une gestion optimisée des ressources, exige des investissements importants en matériel et des politiques publiques cohérentes pour une adoption à grande échelle. Ces ajustements nécessitent un soutien continu des institutions gouvernementales et privées afin d'accompagner la transition vers des pratiques agricoles résilientes.

Bien que les mesures d'adaptation soient essentielles, elles ne suffisent pas à elles seules. Il est également crucial de mener des actions d'atténuation pour limiter l'ampleur des bouleversements climatiques futurs. L'atténuation, qui consiste à réduire les émissions de gaz à effet de serre, est une démarche clé pour limiter les impacts du changement climatique. Le secteur agricole, bien qu'il contribue aux émissions de GES, peut également jouer un rôle déterminant dans leur réduction, notamment par une gestion améliorée des sols pour renforcer leur capacité à séquestrer le carbone. Les pratiques agricoles durables, comme l'utilisation de cultures de couverture, la rotation des cultures et la gestion des engrais, permettent de réduire l'empreinte carbone tout en améliorant la qualité des sols. Une approche intégrée combinant adaptation et atténuation est donc cruciale pour garantir la résilience à long terme des systèmes agricoles. Les bénéfices des mesures d'adaptation sont souvent immédiats et tangibles pour les agriculteurs, tandis que ceux de l'atténuation sont globaux, mais nécessitent des investissements à long terme.

Les politiques publiques jouent un rôle central dans la réussite des stratégies d'adaptation et d'atténuation. Le financement de la transition vers une agriculture plus durable doit être ciblé, en particulier pour soutenir les petits exploitants, qui sont les plus vulnérables aux impacts du changement climatique. Les programmes de financement et d'assurances doivent offrir une couverture adéquate pour les risques climatiques, tout en encourageant les pratiques agricoles préventives.

Les politiques publiques doivent aussi viser à renforcer les capacités d'adaptation et d'atténuation dans le secteur agricole. Elles doivent être inclusives et orientées vers les besoins des producteurs, en particulier les plus vulnérables. Les services climatiques doivent être accessibles et compréhensibles pour tous les agriculteurs, afin de faciliter leur préparation et leur adaptation aux événements climatiques extrêmes. L'éducation et la sensibilisation des agriculteurs jouent également un rôle crucial. Pour cela, une approche participative est essentielle, impliquant les communautés agricoles et les acteurs locaux dans les processus décisionnels. Des initiatives comme le « Plan pour une Économie Verte 2030 » illustrent le potentiel de cette approche intégrée. Toutefois, les mesures d'adaptation doivent être mises en œuvre de manière participative pour renforcer la résilience des systèmes agricoles face aux changements climatiques (Moser et Ekstrom, 2010 ; Marquet et Salles, 2014).

Par ailleurs, l'impact net des changements climatiques sur l'agriculture reste incertain en raison de la complexité des interactions dans les écosystèmes agricoles, et la vulnérabilité dépendra de divers facteurs tels que l'intensité des changements, la sensibilité des systèmes agricoles et la capacité d'adaptation des producteurs (Burton et al., 2002 ; Wathall et al., 2012). De nombreuses lacunes subsistent concernant les informations et la recherche sur les impacts des changements climatiques et les stratégies d'adaptation spécifiques au secteur agricole québécois.

Parmi les pistes de recherche à explorer, on peut mentionner l'analyse de la productivité des cultures face aux événements climatiques extrêmes, l'impact des changements climatiques sur la qualité des récoltes, l'effet combiné de l'augmentation du CO₂ et des modifications climatiques sur les nuisibles, ainsi que les ajustements nécessaires dans la répartition des cultures. D'autres pistes incluent l'étude approfondie des effets des changements climatiques sur la qualité des sols et des ressources en eau, ainsi que l'analyse des coûts économiques liés à ces impacts. Il est également crucial d'identifier et d'analyser les mesures d'adaptation existantes et de suivre l'expérimentation de nouvelles solutions, tout en vérifiant l'efficacité des outils de transfert de connaissances pour préparer les acteurs du secteur à ces changements.

CONCLUSION

Les résultats de cette synthèse confirment que les changements climatiques représentent un défi majeur pour l'agriculture québécoise, avec des impacts à la fois directs et indirects sur la productivité et la durabilité des systèmes agricoles. Si certains changements peuvent offrir des opportunités, telles qu'un allongement de la saison de croissance et une extension potentielle des zones cultivables, ces avantages sont largement contrebalancés par les risques accrus d'événements climatiques extrêmes, tels que des vagues de chaleur, des sécheresses prolongées, ainsi que des menaces croissantes liées aux maladies, aux insectes et à la perte de la qualité des sols. Ces évolutions mettront à l'épreuve la résilience du secteur agricole du Québec, qui devra non seulement s'adapter aux nouvelles conditions climatiques, mais aussi anticiper les effets des interactions complexes entre les divers facteurs environnementaux.

À travers l'analyse des stratégies d'adaptation, comme la diversification des cultures, l'agroforesterie, la gestion intégrée de l'eau et l'agriculture de précision, il apparaît clairement que ces approches sont essentielles pour renforcer la résilience du secteur face aux impacts des changements climatiques. Toutefois, leur mise en œuvre implique des investissements conséquents, un soutien institutionnel solide et une mobilisation accrue des producteurs agricoles. En outre, les actions d'atténuation, bien qu'indispensables pour limiter l'ampleur des bouleversements à venir, doivent être combinées avec les stratégies d'adaptation pour garantir la résilience à long terme de l'agriculture québécoise.

Les politiques publiques jouent un rôle crucial pour faciliter cette transition. Il est primordial que des mécanismes financiers ciblent les acteurs les plus vulnérables, comme les petits exploitants agricoles, et qu'une couverture adéquate soit fournie pour les risques climatiques. L'accès aux technologies, aux informations climatiques et aux outils d'adaptation doit être facilité, permettant aux producteurs de mieux anticiper les événements climatiques extrêmes et d'adopter des pratiques résilientes. Les programmes éducatifs et les démarches de sensibilisation, menées de manière participative avec les acteurs locaux, renforceront également l'efficacité de ces stratégies.

Finalement, le Québec se trouve à un carrefour où les décisions prises aujourd'hui détermineront en grande partie l'avenir de son secteur agricole face aux défis climatiques. Il est crucial d'adopter

une approche proactive qui combine à la fois adaptation et atténuation, tout en encourageant l'innovation et en soutenant l'éducation ainsi que la sensibilisation des acteurs du secteur. Cela sera essentiel pour assurer un avenir durable à l'agriculture québécoise. Comme le souligne Gilles Maréchal, chercheur en économie et droit rural, dans son article ; *Les projets alimentaires territoriaux (PAT) : entre rupture, transition et immobilisme* ; « Il faut que tout change pour que rien ne change ». Cette citation illustre la nécessité de réformes profondes dans notre système alimentaire, soulignant que l'adoption d'une gouvernance intelligente et d'une action collective est primordiale pour transformer les défis climatiques en véritables opportunités (Maréchal et al., 2018). Cela soulève une autre piste de recherche importante est la question de la gouvernance du changement climatique dans le secteur agricole. Comment les différents acteurs – gouvernement, chercheurs, producteurs, et communautés locales – peuvent-ils collaborer de manière efficace pour favoriser la transition vers une agriculture durable et résiliente ? Une analyse approfondie des mécanismes de gouvernance, de la coordination entre les différents niveaux de pouvoir et de l'implication des communautés locales sera nécessaire pour développer des politiques agricoles inclusives et adaptées. En intégrant ces stratégies dans des politiques publiques cohérentes et inclusives, nous pourrions renforcer la résilience du secteur et répondre efficacement aux incertitudes climatiques, tout en exploitant les opportunités offertes par ces changements.

RÉFÉRENCES

- Agomoh, I.V., Drury, C.F., Yang, X., Phillips, L.A., Reynolds, W.D. (2021). Crop rotation enhances soybean yields and soil health indicators. *Soil Science Society of America Journal*, 85: 1185-1195. <https://doi.org/10.1002/saj2.20241>
- Agriclimat (2024). Des fermes adaptées pour le futur. <https://agriclimat.ca/>
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) (2006). L'agroforesterie au Québec : Des pratiques, des partenaires, un même engagement. https://www.agrireseau.net/agriculturebiologique/documents/Agroforesterie_au_Quebec_final_fr.pdf
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) (2009). Biens et services écologiques et agroforesterie l'intérêt du producteur agricole et de la société. Synthèse et recommandations. https://publications.gc.ca/collections/collection_2011/agr/A22-531-2011-fra.pdf
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) (2024). Élaboration d'un outil Web d'aide à la décision sur les cultures de couverture pour les producteurs de l'Est du Canada. <https://agriculture.canada.ca/fr/production-agricole/protection-cultures/ressources-matiere-lutte-antiparasitaire-agriculture/elaboration-dun-outil-web-daide-decision-cultures-couverture-producteurs-lest-du-canada>
- Agrobonsens (2024). Qui est le PELI ? <https://agrobonsens.com/qui-est-le-peli>
- Al-Kaisi, M. (2016). How to Minimize Soil Compaction During Harvest. *Integrated Crop Management (ICM) News*. <https://crops.extension.iastate.edu/cropnews/2016/09/how-minimize-soil-compaction-during-harvest>
- Al-Kaisi, M. (2019). Corn Residue Breakdown as Affected by Tillage and N Application. *Integrated Crop Management (ICM) News*. Bottom of Form Top of Form Bottom of Form <https://crops.extension.iastate.edu/cropnews/2019/11/corn-residue-breakdown-affected-tillage-and-n-application>
- Allard, F., Gasser, M.O. (2022). Impact des céréales d'automne sur la rentabilité, l'amélioration de la santé du sol et la réduction de l'usage des pesticides par rapport aux céréales de printemps. Rapport final. IRDA. 62 p. <https://www.agrireseau.net/grandescultures/documents/109486>.
- Alvarez, R., González, M., & Díaz, R. (2020). Effects of reduced tillage on soil structure and crop performance in a temperate region. *Soil and Tillage Research*, 199, 104-112. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104112>
- Amundsen, H., Berglund, F., Westskog, H. (2010) Overcoming barriers to climate change adaptation a question of multilevel governance? *Environment & Planning C-Government & Policy* 28, 276-289.
- Anel B., Cogliastro, A., Olivier, A., Rivest, D.(2017). Une agroforesterie pour le Québec. Document de réflexion et d'orientation. Comité agroforesterie, Centre de référence en agriculture et

- agroalimentaire du Québec, Québec. 73 p.
<https://admin.robvq.qc.ca/uploads/b42d4936c437ca3520661be68741b334.pdf>
- Annan, F., Schlenker, W. (2015). Federal Crop Insurance and the Disincentive to Adapt to Extreme Heat. *American Economic Review*, vol. 105/5, pp. 262-266, <https://doi.org/10.1257/aer.p20151031>
- Antón, J., Kimura, S., Lankoski, J., Cattaneo, A. (2012). A Comparative Study of Risk Management in Agriculture under Climate Change », Documents de l'OCDE sur l'alimentation, l'agriculture et les pêcheries, n° 58, Éditions OCDE, Paris. <https://doi.org/10.1787/5k94d6fx5bd8-en>
- Atlas climatique du Canada (2024). Changement climatique et agriculture.
<https://atlasclimatique.ca/agriculture>
- Atlas Climatique du Canada (2024a). Incertitudes relatives aux projections climatiques.
<https://donneesclimatiques.ca/ressource/lincertitude-dans-les-projections-climatiques/>
- Azima, S., Mundler, P. (2022). Le cas inspirant de la politique alimentaire urbaine de Milan. Fiche n°3, Bulletin n°22 – juillet – août 2022.
<https://praxis.encommun.io/n/WKBfoH4nRkNFTtu0FbV6eBTUil8/>
- Bureau d'Assurance du Canada- BAC (2024). Communiqué de presse. https://bac-quebec.qc.ca/media/jj2cr5q1/nr-2024-09-24_summer-of-nat-cats_fr_final.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Bachand, D., Lauzon, L. et Bourgeois, G. (2012). Sensibilisation et diffusion d'informations sur les opportunités et les risques associés aux changements climatiques pour l'agriculture au Québec (Rapport scientifique final pour Ouranos). Montréal, Québec. 47 p. Repéré à <https://www.ouranos.ca/sites/default/files/2023-05/proj-ant-thant-bachand-rapportfinal.pdf>
- Ballhorn, D.J., Schmitt, I., Fankhauser, J.D., Katagiri, F., Pfanz, H. (2011) CO₂-mediated changes of plant traits and their effects on herbivores are determined by leaf age. *Ecological Entomology* 36, 1-13 <https://resjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2311.2010.01240.x>
- Barnaud, C., Antona, M., Marzin, J. (2011). Vers une mise en débat des incertitudes associées à la notion de service écosystémique. *Vertigo*. <https://journals.openedition.org/vertigo/10905>
- Bélanger, G. (2016). Défis et opportunités des changements climatiques pour les fermes laitières du Québec. https://www.agrireseau.net/documents/Document_96512.pdf
- Bélanger, G, Bootsma, A. (2002). Impacts des changements climatiques sur l'agriculture au Québec. Présentation au 65e congrès de l'Ordre des Agronomes du Québec.
<https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/Belanger.pdf>
- Bélanger, G., Castonguay, Y., Bertrand, A., Dhont, C., Rochette, P., Couture, L., Drapeau, R., Mongrain, D., Chalifour, F.-P., Michaud, R. (2006). Winter damage to perennial forage crops in eastern Canada: Causes, mitigation, and prediction. *Can. J. Plant Sci.* 86: 33–47.
<https://cdnsiencepub.com/doi/pdf/10.4141/P04-171?download=true>

- Biagini B., Bierbaum R., Stults M., Dobardzic S., McNeeley S.M. (2014). A typology of adaptation actions: a global look at climate adaptation actions financed through the global environment facility. *Global Environmental Change*, 2014/03/01, vol. 25, p. 97-108.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378014000065>
- Boucher, A.C., Gagnon, A.E., Chouinard, G. (2017). Analyse des approches et des technologies novatrices en termes de surveillance phytosanitaire dans les grandes cultures et les cultures horticoles au Québec. CEROM, rapport final.
https://www.agrireseau.net/documents/Document_95783.pdf
- Bourgeois, B., Charles, A., Van Eerd, L.L., Tremblay, N., Lynch, D., Bourgeois, G., Bastien, M., Bélanger, V., Landry, C., Vanasse, A. (2021). Interactive effects between cover crop management and the environment modulate benefits to cash crop yields: a meta-analysis. *Canadian Journal of Plant Science*, 102: 656-678. <https://doi.org/10.1139/cjps-2021-0177>
- Bohle, HG., Downing, T., Watts, M. (1994). Climate change and social vulnerability Toward a sociology and geography of food insecurity. *Global Environmental Change-human and Policy Dimensions - GLOBAL ENVIRON CHANGE*. 4. 37-48.
https://www.researchgate.net/publication/245668859_Climate_change_and_social_vulnerabilityToward_a_sociology_and_geography_of_food_insecurity
- Boland, G. J., Melzer, M. S., Hopkin, A., Higgins, V., Nassuth, A. (2004). Climate change and plant diseases in Ontario. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 26(3), 335–350.
<https://doi.org/10.1080/07060660409507151>
- Bootsma, A., Gameda, S., McKenney, D.W. (2005). Potential impacts of climate change on corn, soybeans and barley yields in Atlantic Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, 85: 345–357.
<https://cdnsiencepub.com/doi/pdf/10.4141/S04-025>
- Borron S. (2006). Building resilience for an unpredictable future: how organic agriculture can help farmers adapt to climate change. Rome (Italie): Food and Agriculture Organization of the United Nations. 25 p. <http://www.fao.org/publications/card/fr/c/d736bbbe-d445-5f32-bfb0-1f7dec3d5530/>
- Bonny, S. (2010). L'intensification écologique de l'agriculture : voies et défis. ISDA, Jun 2010, Montpellier, France. 11 p.
https://hal.science/file/index/docid/526154/filename/Bonny_L_intensification.pdf
- Brandle, J. R., Hodges, L., et Zhou, X. H. (2004). Windbreaks in North American Agricultural Systems. Faculty Publications. 389. <https://digitalcommons.unl.edu/agronomyfacpub/389>
- Brewer, T., Chatrchyan, A., Ficken, S., McDermott, L., Morrill, K., et O'Neil, K. (2018). Climate Smart Farming in the Northeast: Six Key Strategies for Farmers. Cornell, College of Agriculture and Life sciences. <http://climatesmartfarming.org/resources/cornell-csf-factsheet-six-key-strategies-for-farmers/>
- Brodeur, J., Boivin, G., Bourgeois, G., Cloutier, C., Doyon, J., Grenier, P., et Gagnon, A. (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.
<https://www.ouranos.ca/sites/default/files/2023-05/proj-ant-thant-brodeur-rapportfinal.pdf>

- Brown, C., Follings, J., Moran, M., Rosser, B. (2017). Guide agronomique des grandes cultures. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales de l'Ontario (MAAARO). <https://www.ontario.ca/files/2022-10/omafra-agronomy-guide-for-field-crops-fr-2022-10-13.pdf>
- Bryant, C.R., Smit, B., Brklacich, M., Johnston, Th.R., Smithers, J., Chiotti, Q. and Singh, B. (2000). Adaptation in Canadian agriculture to climatic variability and change. *Climatic Change*, 45(1): 181-201. <https://doi.org/10.1023/A:1005653320241>
- Burke, M., Hsiang, S., Miguel, E. (2015). Global non-linear effect of temperature on economic production. *Nature* no.527, p.235-239. <https://web.stanford.edu/~mburke/climate/BurkeHsiangMiguel2015.pdf>
- Burton I., Huq S., Lim B., Pilifosova O., Schipper E.L. (2002). From impacts assessment to adaptation priorities: The shaping of adaptation policies, *Climate Policy*, 2, pp. 145-159 https://www.researchgate.net/publication/233641673_From_Impacts_Assessment_to_Adaptation_Priorities_The_Shaping_of_Adaptation_Policy
- Camirand, J. et Gingras, C. (2009). Agriculture et climat : Vers des fermes zéro carbone. *Nature Québec*. <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/2069613>
- CDAQ (2021). Plan d'adaptation de l'agriculture du Centre-du-Québec aux changements climatiques. *Projet Agriculmat*. 44 p. ISBN 978-2-9819521-5-8 https://agriclimat.ca/wp-content/uploads/2021/03/Agriculmat_Plan-adaptation_Centre-Du-Quebec.pdf
- CEMA (2017). Digital Farming: What Does It Really Mean? https://www.cema-agri.org/images/publications/position-papers/CEMA_Digital_Farming_-_Agriculture_4.0_13_02_2017_0.pdf
- Champagne St-Arnaud, V.C., Boivin, M., Langlais, K. (2022). Baromètre de l'action climatique ; Disposition des Québécoises et des Québécois envers les défis climatiques. Rapport réalisé par le Groupe de recherche sur la communication marketing climatique, université de Laval, 37 p. https://unpointcinq.ca/wp-content/uploads/2022/12/Barometre2022_WEB.pdf
- Charbonneau, É., Moreno Prado, J.M., Pellerin, D., Bélanger, G., Côté, H., Bélanger, V., Allard, G., Chaumon, D. (2013). Première évaluation de l'impact potentiel des changements climatiques sur la durabilité technico-économique et agroenvironnementale des fermes laitières au Québec. Rapport final, 62p. <https://www.ouranos.ca/sites/default/files/2023-05/proj-ant-thant-charbonneau-rapportfinal.pdf>
- Charbonneau, É., Ouellet, V., Fournel, S., Payant, C., Jégo, G., Bélanger, G. et al. (2020). Choix des graminées fourragères et des mesures d'atténuation du stress thermique des vaches sur les fermes laitières québécoises dans un contexte de changements climatiques, 56p. <https://www.ouranos.ca/sites/default/files/2022-07/proj-201419-apa-charbonneau-rapportfinal.pdf>
- Charron, I., Beauchemin, A., Blais-Gagnon, A., Boivin, C., Delmotte, S., Ducruc, S., Dugré, D., Landry, F., Lefebvre, R., Jégo, G., Gosselin, JS., Michaud, A., Morrissette, R., Raynauld, M., St-Arnauld, R.M., Vallée, J., Valleros, A. (2020). Recherche participative alternatives durables pour la gestion de l'eau en milieu agricole dans un contexte de changement climatique (Radeau 2). Rapport final présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). 283 p. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/a0759a9c-afb2->

41ce-b6e2-003fca41a74f/resource/a7a80ad1-9a4c-4fd1-a7ce-1b0534d00041/download/radeau2_rapportfinal_20200910_vf.pdf

- Chatham House (2017), *Chokepoints and Vulnerabilities in Global Food Trades*, p. 42.
<https://www.chathamhouse.org/sites/default/files/publications/research/2017-06-27-chokepoints-vulnerabilities-global-food-trade-bailey-wellesley-final.pdf>
- Cobourn, K. (2023). Climate change adaptation policies to foster resilience in agriculture: Analysis and stocktake based on UNFCCC reporting documents. Documents de l'OCDE sur l'alimentation, l'agriculture et les pêcheries n° 202, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/5fa2c770-en>.
- Cohn, J. P. (2008). Citizen science: can volunteers do real research? *BioScience* 58, 192-197.
<https://doi.org/10.1641/B580303>
- Comtet, T., Sandionigi, A., Viard, F., Casiraghi, M. (2015). DNA (meta) barcoding of biological invasions: a powerful tool to elucidate invasion processes and help managing aliens. *Biological Invasions* 17, 905-922.
https://www.researchgate.net/publication/272367495_DNA_metabarcoding_ofbiological_invasions_a_powerful_tool_to_elucidate_invasion_processes_and_help_managing_alien
- Conseil SAM (2023). Le Plan d'action régional intégré (PARI). Conseil Système Alimentaire Montréalais. <https://www.montrealmetropoleensante.ca/plans-daction/decouvrez-nos-plans-daction/plan-daction-integre-2023-2025-du-conseil-sam/>
- CPQ (2000). Guide des pratiques de conservation en grandes cultures : le semis direct. Module 2 – Travail du sol, Feuillet 2-C. 17 pages. <https://www.agrireseau.net/documents/62392/guide-des-pratiques-de-conservation-en-grandes-cultures-le-semis-direct>
- Cutter, S.L., Barnes, L.R., Berry, M., Burton, C.G., Evans, E., Tate, E., & Webb, J.J. (2008). A place-based model for understanding community resilience to natural disasters. *Global Environmental Change-human and Policy Dimensions*, 18, 598-606.
https://www.academia.edu/7740205/A_place_based_model_for_understanding_community_resilience_to_natural_disasters
- Da Silva, L., Belzile, L. (2017). Les enjeux économiques des changements climatiques en agriculture. Webinaire 14 novembre 2017. Agriculimat.
https://www.agrireseau.net/documents/Document_98625.pdf
- Debailleul, G., Tamini, L.T., Doyon, M., Clerson-Guicherd, F., Jacques, L-S., Hernandez, M., Louvel, J. (2013). Analyse prospective de la position concurrentielle du Québec en matière de production agricole dans un contexte de changements climatiques , 193p.
<https://www.ouranos.ca/sites/default/files/2023-05/proj-ant-thant-debailleul-rapport.pdf>
- Dermody, O., O'Neill, B.F., Zangerl, A.R., Berenbaum, M.R., DeLuc, E.H. (2008). Effects of elevated CO₂ and O₃ on leaf damage and insect abundance in a soybean agroecosystem. *Arthropod-Plant Interactions* (2008) 2:125–135. DOI 10.1007/s11829-008-9045-4.
https://www.academia.edu/251571/Effects_of_Elevated_CO2_and_O3_on_Leaf_Damage_and_Insect_Abundance_In_a_Soybean_Agroecosystem

- Dong, J., Gruda, N et al. (2018). Effects of Elevated CO₂ on Nutritional Quality of Vegetables: A Review. *Frontiers*, volume 9, <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2018.00924/full>
<https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00924>
- Données Climatiques Canada (2024). Comprendre les projections futures : Incertitudes relatives aux projections climatiques. <https://donneesclimatiques.ca/ressource/lincertitude-dans-les-projections-climatiques/>
- Dorji, T., Rinchen, K., Morrison-Saunders, A., Blake, D., Banham, V., Pelden, S. (2024). Understanding How Indigenous Knowledge Contributes to Climate Change Adaptation and Resilience: A Systematic Literature Review. *Environmental Management* <https://doi.org/10.1007/s00267-024-02032-x>
- Duchemin, E. (2020). Évaluer l’agriculture urbaine dans toute sa diversité et sa multifonctionnalité. *AgriUrbain*. <https://agriurbain.hypotheses.org/4718>
- Duchemin, E., McClintock, N., Thanh Hiên Pham, T. (2021). Évaluation de l’agriculture urbaine comme infrastructure verte de résilience individuelle et collective face aux changements climatiques et sociaux. Rapport final présenté à Ouranos. <https://www.ouranos.ca/sites/default/files/2022-07/proj-201419-apa-duchemin-rapportfinal.pdf>
- El Bakali, I., El Mekki, A., Maatala, N., Harbouze, R. (2023). A systematic review on the impact of incentives on the adoption of conservation agriculture: new guidelines for policymakers and researchers. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 21(1). <https://doi.org/10.1080/14735903.2023.2290415>
- ENRD (2019). La jeunesse et le renouvellement des générations. European Network for Rural Development. 1-32. https://ec.europa.eu/enrd/sites/default/files/enrd_publications/publi-eafrd-brochure-08-fr_2019.pdf
- FADQ (2023). L’état des cultures de la FADQ, bilan au 10 octobre 2023, Rapport numéro 12. La Financière Agricole du Québec. <https://www.fadq.qc.ca/salle-de-presse/bulletins-dinformation/etat-des-cultures/etat-des-cultures-2023/letat-des-cultures-de-la-fadq-bilan-au-10-octobre-2023-rapport-numero-12>
- FADQ (2024a). La Financière Agricole du Québec ; Mission. <https://www.fadq.qc.ca/a-propos-de-nous/mission>
- FADQ (2024b). La Financière Agricole du Québec ; Description. <https://www.fadq.qc.ca/assurance-recolte/description>
- FADQ (2024c). Guides des normes reconnues par la Financière agricole du Québec ; en matière de pratiques culturales. <https://www.fadq.qc.ca/fileadmin/fr/assurance-recolte/guide-normes-pommes-terre-cereales-mais-grain-oleagineux.pdf>
- FAO (2011a). Organic agriculture and climate change mitigation. A report of the Round Table on Organic Agriculture and Climate Change. November 2011, Rome, Italy. https://orgprints.org/id/eprint/20855/1/RTOACC_booklet_2011_final.pdf

- FAO (2011b). En quoi consiste l'agriculture biologique? In FAO. Organic Agriculture. Questions fréquemment posées sur l'agriculture biologique.
<http://www.fao.org/organicag/oa-faq/oa-faq1/fr/>
- FAO (2015). Climate change and food security: risks and responses. 122 pages.
<https://www.fao.org/3/i5188e/I5188E.pdf>
- FAO (2019). Pacte de politique alimentaire urbaine de Milan : Cadre de suivi. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture Rome, Italy. Mise à jour 15/4/2021. 32 pages.
<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/9e830d97-57ca-4eb5-b015-f2ccec180b93/content>
- FAOstat (2020). Emissions due to agriculture Global, regional, and country trends 2000–2018. FAOSTAT analytical brief-18. <https://www.fao.org/3/cb3808en/cb3808en.pdf>
- Fatemi F., Ardalan A., Aguirre B., Mansouri N., Mohammadfam I. (2017). Social vulnerability indicators in disasters: findings from a systematic review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 22, p. 219-227
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212420916302746?via%3Dihub>
- Firlej, A., Saguez, J. (2019). Changements climatiques et phytoprotection au Québec. Synthèse et recommandations, Québec : IRDA et CÉROM, 82p.
https://irda.blob.core.windows.net/media/5527/firlej-et-al-2019-synthese_sur_les_changements_climatiques_en_agriculture.pdf
- Folke, C. (2006). Resilience: The Emergence of a Perspective for Social-ecological System Analyses. *Global Environmental Change*, XXVI, p. 253-267.
https://www.ida.liu.se/~769A09/Literature/Resilience/Folke_2006.pdf
- Forest, J.F., Sylvestre, E. (2016). Évaluation des principaux risques climatiques actuels sur les cultures maraîchères afin d'identifier les besoins d'adaptation et les technologies potentielles. Rapport final présenté à l'Association des producteurs maraîchers du Québec, mars 2016. 109 p.
https://agriclimat.ca/wp-content/uploads/2018/10/2.-Rapport_final_Besoins_adaptation_aux_CC_FLC.pdf
- Fournier, M.E. (2019). « Pénurie de tofu au Québec » LaPresse, section affaires et économie.
<https://www.lapresse.ca/affaires/economie/agroalimentaire/201901/26/01-5212482-penurie-de-tofu-au-quebec.php#>
- Fraser, E., Mabee, W., Figge, F. (2005). A framework for assessing the vulnerability of food systems to future shocks. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2004.10.011>
- Fraser, D.G., Campbell, M. (2019). Agriculture 5.0: Reconciling Production with Planetary Health. *One Earth*, Volume 1, Issue 3, 278 - 280 <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.10.022>
- Fuhrer, J. (2003) Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 97, 1-20. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00125-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00125-7)

- Füssel H.M. (2007). Vulnerability: a generally applicable conceptual framework for climate change research. *Global Environmental Change*, vol. 17, n. 2, p. 155-167.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.05.002>
- Gagnon, A., Roy, M., et Roy, A. (2011). Impacts directs et indirects des changements climatiques sur les ennemis des cultures. https://agriclimat.ca/wp-content/uploads/2018/10/2.-Impacts-directs-et-indirects-des-CC-sur-les-ennemis-des-cultures_Gagnon-et-al.pdf
- Gallopín, G. (2006). Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity. *Global Environmental Change*. 16. 293-303.
https://www.researchgate.net/publication/280232726_Linkages_between_vulnerability_resilience_and_adaptive_capacity
- Gasser, M.-O., Angers, D. (2023). Rapport 3 de l'Étude sur l'état de santé des sols agricoles du Québec. : Stratégies et interventions pour améliorer la santé des sols. Rapport final présenté au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). IRDA. 15 pages.
https://irda.blob.core.windows.net/media/8898/irda_eessaq_rapport3_novembre2023.pdf
- Gasser, M.O., Biswas, A., Martinelli, G., Easher, T.H., Bernard, C., Zita, A. (2023). Évolution d'indicateurs spatialisés de la santé des sols sous l'effet des changements climatiques au Québec et en Ontario. Rapport final. IRDA et partenaires. 118 pages.
https://irda.blob.core.windows.net/media/8897/irda_rapportscientifique_indicateurssantesolschangementsclimatiques_2023.pdf
- Gélinas, B., Ruel, D. (2016). Le seigle hybride, des possibilités de développement pour les producteurs agricoles et les transformateurs. Rapport PADAR présenté au MAPAQ. 26 p.
https://www.agrireseau.net/documents/Document_94372.pdf
- GIEC (2001). *Climate change 2001: Impacts, Adaptation & Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report, 1000p. Chapter 1 : Overview of Impacts, Adaptation, and Vulnerability to Climate Change. 75-103.
https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGII_TAR_full_report-2.pdf
- GIEC (2005). Report of the Joint IPCC WG II & III Expert Meeting on the Integration of Adaptation, Mitigation and Sustainable. Île de La Réunion, France, 236 p.
<https://archive.ipcc.ch/pdf/supporting-material/expert-meeting-2005-02.pdf>
- GIEC (2014). Summary for policymakers. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros,
- GIEC (2007). Bilan 2007 des changements climatiques: conséquences, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au Quatrième Rapport d'Évaluation du GIEC.
<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2020/02/ar4-wg2-sum-vol-fr.pdf>
- GIEC (2014a). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

- GIEC (2014b). Human Health: Impacts, Adaptation, and Co-Benefits. In *Climate Change 2014 – Impacts, Adaptation and Vulnerability: Part A: Global and Sectoral Aspects: Working Group II Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report* (pp. 709–754). chapter, Cambridge: Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap11_FINAL.pdf
- GIEC (2018). *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.* https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf
- GIEC (2022a). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- GIEC (2022b). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf
- GIEC (2023). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- Gitz, D. C., Ritchie, J. C., Krizek, D. T., Springer, T. L., Reeves III, J. B. and V. Reddy. (2006). Effect of temperature and CO₂ on forage nutritive value of ‘Pete’ eastern gamagrass. In *Proceedings of the Fifth Eastern Native Grass Symposium*, [ed. M. A. Sanderson, P. Adler, S. Goslee, J. C. Ritchie, H. Skinner, and K. Soder], 107–114. Washington, DC: USDA NRSC and USDA ARS. <https://www.ars.usda.gov/research/publications/publication/?seqNo115=143993>
- Glauber, J., Baldwin, K., Antón, J., Ziebinskaet, U. (2021). Design principles for agricultural risk management policies. *Documents de l’OCDE sur l’alimentation, l’agriculture et les pêcheries*, n° 157, Éditions OCDE, Paris. <https://doi.org/10.1787/1048819f-en>
- Global Carbon Atlas (2023). <https://globalcarbonatlas.org/>
- Goulet F. (2008). Des tensions épistémiques et professionnelles en agriculture. Dynamiques autour des techniques ans labour et leur évaluation environnementale. *Revue d’anthropologie des connaissances*, n° 4, p. 291-310. <https://www.cairn.info/revue-anthropologie-des-connaissances-2008-2-page-291.html>
- Gouvernement du Canada (s.d.). Representative Concentration Pathways. <https://climate-scenarios.canada.ca/?page=scen-rcp>

- Gouvernement du Canada (2004). Impacts et adaptation liés aux changements climatiques : perspective canadienne. https://natural-resources.canada.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/perspective/pdf/report_f.pdf
- Gouvernement du Canada (2016). Cadre stratégique fédéral sur l'adaptation. 12 p. https://publications.gc.ca/collections/collection_2016/eccc/M4-133-2016-fra.pdf
- Gouvernement du Canada (2019). Le nouveau guide alimentaire. Santé Canada ; Bureau de la politique et de la promotion de la nutrition <https://www.canada.ca/content/dam/hc-sc/documents/services/canada-food-guide/resources/stakeholder-toolkit/canada-food-guide-presentation-fra.pdf>
- Gouvernement du Canada (2020). Vue d'ensemble du secteur agricole et agroalimentaire canadien. Agriculture et Agri-Food Canada. https://www.ourcommons.ca/content/Committee/431/AGRI/WebDoc/WD10701227/431_AGRI_reldoc_PDF/DepartmentOfAgricultureAndAgri-Food-f.pdf
- Gouvernement du Canada (2024). Stratégie pour une agriculture durable : Document de discussion. <https://agriculture.canada.ca/fr/ministere/transparence/recherche-opinion-publique-consultations/strategie-agriculture-durable/document#s7>
- Gouvernement du Canada (2024a). Impacts du changement climatique sur l'agriculture. <https://agriculture.canada.ca/fr/environnement/changements-climatiques/scenarios-climatiques-lagriculture>
- Gouvernement du Québec (2004). J'adopte la lutte intégrée : Pesticides agricoles moins et mieux. Cahier d'autoévaluation - canneberge. 1-36. https://www.agrireseau.net/petitsfruits/documents/canneberge_autoevaluation.pdf
- Gouvernement du Québec (2013). Stratégie d'adaptation aux changements climatiques 2013-2020. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/strategie-adaptation.htm>
- Gouvernement du Québec (2020). Plan pour une économie verte 2030. Politique-cadre d'électrification et de lutte contre les changements climatiques. <https://www.quebec.ca/gouv/politiques-orientations/plan-economie-verte/>
- Gouvernement du Québec (2021). Guide d'agriculture urbaine. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/agriculture-pecheries-alimentation/agriculture/agriculture-urbaine/GM_agriculture_urbaine_MAPAQ.pdf
- Gouvernement du Québec (2023). La financière agricole du Québec ; actualités. https://www.quebec.ca/nouvelles/actualites/details/pluies-abondantes-des-demieres-semaines-dans-plusieurs-regions-du-quebec-la-financiere-agricole-poursuit-lanalyse-et-les-actions-rapides-aupres-des-producteurs-agricoles-49832?utm_source=chatgpt.com
- Gouvernement du Québec (2024a). Plan de mise en œuvre 2024-2029 ; Plan pour une économie verte 2030. <https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/environnement/publications-adm/plan-economie-verte/plan-mise-oeuvre-2024-2029.pdf>

- Gouvernement du Québec (2024b). Action-Climat Québec.
<https://www.environnement.gouv.qc.ca/programmes/actionclimat/>
- Gouvernement du Canada (2025). Aperçu du secteur agricole et agroalimentaire canadien
https://agriculture.canada.ca/fr/secteur/aperçu?utm_source=chatgpt.com
- Grigorieva, E., Livenets, A., Stelmakh, E. (2023). Adaptation of Agriculture to Climate Change: A Scoping Review. *Climate*. 2023; 11(10):202. <https://doi.org/10.3390/cli11100202>
- Griffon, M. (2013). Qu'est-ce que l'agriculture écologiquement intensive ? Éditions Quæ. 227 pages.
https://open-library.cirad.fr/files/6/2298__Griffon_-_2013_-_Qu%27est-ce_qu%27une_agriculture_ecologiquement_intensive_-_Unknown.pdf
- Grubb. M., Jordan, N.D., Hertwich, E., Neuhoff, K., Das, K., Bandyopadhyay, K.R., Asselt, H., Sato M., Wang, R., Pizer W.A., Oh, H. (2022). Carbon Leakage, Consumption, and Trade. *Annual Review of Environment and Resources*. Page 1-43. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-120820-053625>
- Gunderson, L.H. (2003). Adaptive Dancing: Interactions between Social Resilience and Ecological Crisis.
[https://books.google.ca/books?hl=en&lr=&id=Y5FnAq9kxgC&oi=fnd&pg=PA33&dq=%09Gunderson,+L.H.+\(2003\).+Adaptive+Dancing:+Interactions+between+Social+Resilience+and+Ecolgical+Crisis,+p.+33-52.&ots=-w107hiv-T&sig=yeQDo1caM1QRZ4ZHTdX6x6ZuyTE#v=onepage&q&f=false](https://books.google.ca/books?hl=en&lr=&id=Y5FnAq9kxgC&oi=fnd&pg=PA33&dq=%09Gunderson,+L.H.+(2003).+Adaptive+Dancing:+Interactions+between+Social+Resilience+and+Ecolgical+Crisis,+p.+33-52.&ots=-w107hiv-T&sig=yeQDo1caM1QRZ4ZHTdX6x6ZuyTE#v=onepage&q&f=false)
- Hamilton, J.G., Dermody, O., Aldea, M., Zangerl, A.R., Rogers, A., Berenbaum, M.R. and Delucia, E.H. (2005). Anthropogenic Changes in Tropospheric Composition Increase Susceptibility of Soybean to Insect Herbivory. *Environmental Entomology*, 34, 479-485. <https://doi.org/10.1603/0046-225X-34.2.479>
- Himesh, S., Prakasa Rao, E.V.S., Gouda, K.C., Ramesh, K.V., Rakesh, V., Mohapatra, G.N., Kantha Rao, B., Sahoo, V., Ajilesh, P. (2018). Digital revolution and Big Data: a new revolution in agriculture. *CAB Rev*. 2018, 13, 1–7.
https://www.researchgate.net/publication/327572166_Digital_revolution_and_Big_Data_a_new_revolution_in_agriculture
- Holling, C.S., (1973). Resilience and stability of ecological systems, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, 2-23. <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/26/1/RP-73-003.pdf>
- Howden, S.M., Soussana, J.-F., Tubiello, F.N., Chhetri, N., Dunlop, M., Meinke, H. (2007). Adapting agriculture to climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 104, 19691-19696.
<http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0701890104>
https://www.researchgate.net/publication/5771975_Adapting_Agriculture_to_Climate_Change
- Huang, J.K., Wang, Y.J. (2014). Financing Sustainable Agriculture Under Climate Change. *Journal of Integrative Agriculture*, Volume 13, Issue 4, Pages 698-712. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(13\)60698-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(13)60698-X).
- IARC- International Agency for Research on Cancer (2015). Volume 114: Consumption of red meat and processed meat. IARC Working Group. Lyon; 6–13 September 2015. IARC Monogr Eval

- Carcinog Risks Hum (sous presse). <https://www.cancer-environnement.fr/fiches/publications-du-circ/monographies-vol-114-cancerogenicite-consommation-viande-rouge-et-viande-transformee/#nbp1>
- ICRAF (2024). What is agroforestry? International Centre for Research in Agroforestry. <https://www.worldagroforestry.org/about/agroforestry-2>
- IFOAM (2009). The Principles of Organic Agriculture. In IFOAM. IFOAM, [En ligne]. http://www.ifoam.org/growing_organic/definitions/doa/index.html
- Ignaciuk, A. (2015). Adapting Agriculture to Climate Change: A Role for Public Policies. Documents de l'OCDE sur l'alimentation, l'agriculture et les pêcheries, n° 85, Éditions OCDE, Paris. <https://doi.org/10.1787/5js08hwvfnr4-en>
- Institut Climatique du Canada (2022). Combler le déficit d'adaptation du Canada. Éléments-clés d'une stratégie nationale d'adaptation. <https://institutclimatique.ca/wp-content/uploads/2022/05/Combler-le-deficit-d-adapation-du-canada.pdf>
- Ito, S. (2019). "The global dynamics of price hikes in food production increase – A reference to the climate change", 25th International Conference on the Unity of the Sciences (ICUS XXV): Environmental Health and the Quality of Human Life, Seoul, Korea, Session 2. <https://static1.squarespace.com/static/5b46613cfcf7fda7b7470977/t/5d82af943c6ce4136efb1a64/1568845718185/ICUS+2019-2.2-Presentation2.pdf>
- Jacobs, C., Berglund, M., Kurnik, B., Dworak, T., Marras, S., Mereu, V., et Michetti, M. (2019). Climate change adaptation in the agriculture sector in Europe. European Environment Agency (EEA). <https://www.eea.europa.eu/publications/cc-adaptation-agriculture>
- 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. <http://dx.doi.org/10.2134/agronj2013.0195>
- Johnston M., Hesseln H. (2012). Climate change adaptive capacity of the Canadian forest sector. *Forest Policy and Economics*, 2012/11/01, vol. 24, p. 29-34. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389934112001256>
- Jones R.D., Dettmann P., Park G., Rogers M., White T. (2007). The relationship between adaptation and mitigation in managing climate change risks: a regional response from North Central Victoria, Australia, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12, pp. 641-712. <https://research.fit.edu/media/site-specific/researchfitedu/coast-climate-adaptation-library/australia-amp-new-zealand/nsw-victoria-act/Jones-et-al.-2007.-Victoria-Relationship-btwn-Adaptation--Mitigation.pdf>
- Jordan, C.F. (2008). Can organic agriculture feed the world? In Spring Valley Ecofarms Incorporated. Spring Valley Ecofarms. org, [En ligne]. http://springvalleyecofarms.org/UserFiles/File/Can%20Organic%20Ag%20Feed%20the%20World_08132009.pdf

- Juroszek, P., Tiedemann, A. (2013). Plant pathogens, insect pests and weeds in a changing global climate: a review of approaches, challenges, research gaps, key studies and concepts. *The Journal of Agricultural Science*, 151(2), 163–188. doi:10.1017/S0021859612000500
- Kämpf, I., Hölzel, N., Störrle, M., Broll, G., & Kiehl, K. (2016). Potential of temperate agricultural soils for carbon sequestration: A meta-analysis of land-use effects. *The Science of the total environment*, 566-567, 428–435. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.067>
- Kandlikar, M. and Risbey, J. (2000). Agricultural impacts of climate change: If adaptation is the answer, what is the question? *Climatic Change*, 45: 529-539. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1005546716266>
- Kaye, J. P., Quemada, M. (2017). Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(1), 4. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0410-x>
- Keable, S. (2023). Le Québec se démarque des autres provinces canadiennes pour la production biologique ; selon les données du recensement de l'agriculture de 2021. Bioclips, actualité alimentaire. MAPAQ ; Direction des études et des perspectives économiques. https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/BioClips2023/Volume_31_no_2.pdf
- Kirkegaard, J. A., et al. (2021). Integrating cover crops into cropping systems: Benefits and challenges in the context of climate change. *Field Crops Research*, 265, 108062. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108062>
- Kobori, H., Dickinson, J. L., Washitani, I., Sakurai, R., Amano, T., Komatsu, N., Kitamura, W., Takagawa, S., Koyama, K., Ogawara, T., et Miller-Rushing, A. J. (2016). Citizen science: a new approach to advance ecology, education, and conservation. *Ecological Research* 31, 1-19. DOI 10.1007/s11284-015-1314-y <https://link.springer.com/article/10.1007/s11284-015-1314-y>
- Knolmayer, B., Jócsák, I., Taller, J., Keszthelyi, S., Kazinczi, G. (2024). Common Ragweed—*Ambrosia artemisiifolia* L.: A Review with Special Regards to the Latest Results in Biology and Ecology. *Agronomy* 2024, 14, 497. <https://doi.org/10.3390/agronomy14030497>
- Ladanyi, M., Horvath, L. (2010). A review of the potential climate change impact on insect populations - general and agricultural aspects. *Applied Ecology and Environmental Research* 8, 143-152. https://epa.oszk.hu/02500/02583/00019/pdf/EPA02583_applied_ecology_2010_02_143-152.pdf
- Lal, R., et al. (2020). Soil health and climate change: Perspectives on the role of soil management in mitigating global warming. *Soil Science Society of America Journal*, 84(1), 1-16. <https://doi.org/10.2136/sssaj2019.08.0302>
- Lamarre, V. (2014). La compaction des sols : Comprendre pour réduire l'impact des pratiques culturales. CRAAQ. Communication présentée au Colloque sur la pomme de terre, Lévis, Québec. https://www.agrireseau.net/documents/Document_89590.pdf
- Larocque, M., Meyzonnat, G., Ouellet, M. A., Graveline, M. H., Gagné, S., Barnetche, D. et Domer, S. (2015). Projet de connaissance des eaux souterraines de la zone de Vaudreuil-Soulanges - Rapport scientifique. Rapport déposé au ministère du Développement durable, de

- l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques. 202 p.
https://archipel.uqam.ca/8009/1/Rapport_final_PACES_Vaudreuil-Soulanges.pdf
- Laurent, F. (2015). L'Agriculture de Conservation et sa diffusion en France et dans le monde. *Cybergeo :European Journal of Geography*, Environnement, Nature, Paysage, document 747.
<http://cybergeo.revues.org/27284>
- Lavorel, V., Boulet, A. (2010). L'Agriculture Ecologiquement Intensive : un nouveau cap. *TRAME - Travaux et Innovations* - août/septembre 2010. <https://agriculture-de-conservation.com/L-Agriculture-Ecologiquement.html>
- Lazarev, G., (2009). La gouvernance territoriale et ses enjeux pour la gestion des ressources naturelles: Des approches novatrices pour lutter contre la désertification et la dégradation des terres et des eaux, in: UNCCD (dir.), 1er ed. Secrétariat de la Convention des Nations Unies sur la Lutte contre la Désertification, p.p. 64. https://catalogue.unccd.int/839_dddd3_fre.pdf
- Lefèvre C., Rejik, F., Alcantara, V., Wiese, L. (2017). Carbone Organique du Sol: une richesse invisible. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome, Italie. 1-90. ISBN 978-92-5-209681-8. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/68d398f3-fe09-4e4b-bb8e-f542970c20e2/content>
- Légaré, C.A. (2020). Les protéines végétales : un nouveau débouché pour l'industrie ? *Bioclips ; actualité alimentaire*. MAPAQ, Vol 28, n 16, septembre 2020.
https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/BioClips2020/Volume_28_no_16.pdf
- LégisQuébec (2022). Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables. chapitre Q-2, r. 35. <https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/pdf/rc/Q-2,%20R.%2035%20.pdf>
- Lepage, M.-P., Bourdages, L., Bourgeois, G.(2012). Interprétation des scénarios de changements climatiques afin d'améliorer la gestion des risques pour l'agriculture. Ouranos.
<https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2670199>
- Loboguerrero, A. M., Birch, J., Thornton, P. K., Meza, L., Sunga, I., Bong, B. B., Rabbinge, R., Reddy, M., Dinesh, D., et Komer, J. (2018). Feeding the World in a Changing Climate: An Adaptation Roadmap for Agriculture. Global Commission on Adaptation, 20p.
<https://gca.org/reports/feeding-the-world-in-a-changing-climate-an-adaptation-roadmap-for-agriculture/>
- Louvel, J., Lessard, C. (2012). Contexte d'adoption de la gestion intégrée des ennemis des cultures. *Eco ressources consultant- Union des producteurs agricoles*. 1-87.
https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/Rapport%20%C3%89coRessources_final.pdf
- Macrae, M. L., et Michaud, A. (2018). Managing subsurface drainage water to optimize crop productivity, nutrient use and water availability in contemporary and future climate. Quebec-Ontario Cooperation for Agri-Food Research. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.20432.48643>

- Mandard, S. (2020). Les chiffres noirs des ventes de pesticides « extrêmement dangereux ». Le Monde. https://www.lemonde.fr/planete/article/2020/02/20/les-chiffres-noirs-des-ventes-de-pesticides-extremement-dangereux_6030165_3244.html
- MAPAQ (2017). La lutte intégrée, une méthode à considérer. Mohammed Adli, agronome, Conseiller en relève agricole et production maraîchère, MAPAQ Montérégie. <https://groupeprepanier.com/wp-content/uploads/2023/04/MAPAQ-La-lutte-integree-explications-1.pdf>
- MAPAQ (2020). « Portrait-diagnostic sectoriel de l'industrie des grains au Québec », Annexe 6, 51 p. <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Monographiegrain.pdf>
- MAPAQ (2022). Guide pour l'élaboration d'un plan de développement d'une communauté nourricière. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. <https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/agriculture/industrie-agricole-au-quebec/protection-mise-en-valeur-territoire-agricole/developpement-communaute-nourriciere>
- MAPAQ (2024a). Prime-Vert 2023-2026. Fiche technique – Bandes riveraines élargies et bandes végétalisées en littoral (2023-2026). https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Formulaires/FI_bandes_riveraines_elandes_littoral.pdf
- MAPAQ (2024b). Réseau d'avertissements phytosanitaires (RAP). <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Productions/Protectiondescultures/Pages/reseau.aspx>
- Maréchal, G., Noël, J., Wallet, F. (2018). Les projets alimentaires territoriaux (PAT) : entre rupture, transition et immobilisme ? Pour, 2018/2 N° 234-235, pp. 261-270. <https://doi.org/10.3917/pour.234.0261>.
- Marquet, V., Salles, D. (2014). L'adaptation au changement climatique en France et au Québec. Constructions institutionnelles convergentes et diffusions contrastées. Critique internationale, 2014/1 N° 62. pp. 73-91. <https://doi.org/10.3917/criti.062.0073>.
- Martineau, I., Boivin, F., et Léger, É. (2013). À chacun sa bande : Guide des bandes riveraines en milieu agricole. Club-conseil Gestrie-sol. https://www.agrireseau.net/documents/Document_88852.pdf
- McCoy, R. E. (2024). The Role of Local Knowledge in Climate Change Research. Theses and Dissertations--Philosophy. 39. https://uknowledge.uky.edu/philosophy_etds/39
- McFadden, J., Njuki, E., Griffin, T. (2023). Precision Agriculture in the Digital Era: Recent Adoption on U.S. Farms. Economic Research Service, Economic Information Bulletin Number 248. 1-52. <https://www.ers.usda.gov/webdocs/publications/105894/eib-248.pdf>
- MELCCFP (2023). Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2021 et leur évolution depuis 1990. Gouvernement du Québec, 60 pages. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2021/inventaire-ges-1990-2021.pdf>
- MELCCFP (2022). Cadre de référence de la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE). 53 p. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/cadre-referance-gire.pdf>

- MELCCFP (2023). Politique de protection des sols et de réhabilitation des terrains contaminés - Plan d'action 2023-2029. ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs.
<https://www.environnement.gouv.qc.ca/sol/terrains/politique/plan-action-2023-2029-politique-protection-sols-rehab-terrain.pdf>
- MELCCFP (2023a). Plan Stratégique 2023-2027 » du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques. <https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/environnement/publications-adm/plan-strategique/plan-strategique-2023-2027-melccfp.pdf>
- MELCCFP (2024). Programme Climat municipalités - Phase 2.
<https://www.environnement.gouv.qc.ca/programmes/climat-municipalites2/index.htm>
- Michaud, A., Gombault, C., Cyr, J.-F., et Côté, H. (2012). Implications des scénarios climatiques futurs sur la gestion des sols et de l'eau à la ferme. Ouranos.
https://www.craaq.qc.ca/documents/files/comites/comagr/pagr0106_final.pdf
- Michaud, A., Gasser, M.-O., Blais-Gagnon, A., Tremblay, M.-È., et Huertas, W. (2020). Comparaison de la culture annuelle à la culture en fin de saison d'engrais vert de légumineuses pour augmenter la résilience du sol et fournir un apport suffisant de N dans un contexte climatique défavorable. Rapport final. IRDA. 76 pages plus Annexes.
https://irda.blob.core.windows.net/media/5634/michaud-et-al-2020-comparaison_de_la_culture_annuelle_a_la_culture_en_fin_de_saison_dengrais_vert_de_legumineuses_pour_augme.pdf
- Milan (2015). Pacte de Milan de politique alimentaire urbaine. 15 octobre 2015.
https://www.milanurbanfoodpolicypact.org/wp-content/uploads/2020/12/Milan-Urban-Food-Policy-Pact-and-Framework-for-Action_FR.pdf
- Moreno, M., Lobo, F., & Pérez, C. (2021). Semis directs et pratiques culturales simplifiées: Adaptation au changement climatique et gestion durable des sols. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 300, 97-106. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106995>
- Moser, S. C., & Ekstrom, J. A. (2010). A framework to diagnose barriers to climate change adaptation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(51), 22026-22031.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1007887107>
- Moss, R.H., Brenkert, A.L., Malone, E.L. (2001). Vulnerability to climate change: a quantitative approach. Richland (Etats-Unis): Pacific Northwest National Laboratories. 70 p.
<https://www.semanticscholar.org/paper/VULNERABILITY-TO-CLIMATE-CHANGE-A-Quantitative-Moss-Brenkert/56cdfdd9106a9d2264dd8a40990a9611c8c7a97c>
- National Geographic Society (2008). Xpeditions. How Human Actions Modify the Physical Environment. www.nationalgeographic.com/xpeditions/standards/14/index.html.
- Nasielski, J., Furze, J.R., Tan, J., Bargaz, A., Thavathasan, N.V., Isaac, M.E. (2015). Agroforestry promotes soybean yield stability and N₂-fixation under water stress. *Agronomy for Sustainable Development* 35: 1541-1549. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0330-1>

- Neset T.-S., Wiréhn L., Opach T., Glaas E., Linnér B.-O. (2019). Evaluation of indicators for agricultural vulnerability to climate change: the case of Swedish agriculture. *Ecological Indicators*, 2019/10/01, vol. 105, p. 571-580. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.042>
- Nnadi, N.E., Carter, D.A. (2021). Climate change and the emergence of fungal pathogens. *PLoS Pathog* 17(4). <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1009503>
- Noack F., Engist, D., Gantois, J., Gaur, V., Hyjazie, B.F. (2024). Environmental impacts of genetically modified crops. *Science*, 2024, 385 (6712). <https://hal.science/hal-04787948v1>
- Noble, Ian & Huq, Saleemul & Anokhin, Y.A. & Carmin, J. & Goudou, D. & Lansigan, F.P. & Osman-Elasha, Balgis & Villamizar, Alicia & Patt, A. & Takeuchi, Kuniyoshi & Chu, Eric. (2015). Adaptation needs and options. https://www.researchgate.net/publication/316682864_Adaptation_needs_and_options
- OCDE (2009) Integrating Climate Change Adaptation into Development Cooperation: Policy Guidance OCDE. Parti 2. <https://www.oecd.org/environment/cc/44887764.pdf>
- OCDE (2016). Gestion des risques de sécheresse et d'inondation dans l'agriculture : Enseignements pour les politiques publiques, Études de l'OCDE sur l'eau. Éditions OCDE, Paris. <https://doi.org/10.1787/9789264254459-fr>
- OCDE (2023a), Politiques agricoles : Suivi et évaluation 2023 (version abrégée) : Adapter l'agriculture au changement climatique, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/9dae6a9d-fr>
- OCDE (2023b). Net Zero+: Climate and Economic Resilience in a Changing World, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/da477dda-en>.
- O'Neil, D. (2008). Human Adaptations to Environmental Conditions. https://www.palomar.edu/anthro/adapt/adapt_1.htm
- ONU (2020). Objectifs de développement durable. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>
- ONU (2024). World urbanisation prospects. <https://www.un.org/fr/desa/world-urbanization-prospects>
- Ouranos (2004). S'adapter aux changements climatiques. Québec, Consortium Ouranos: 83p. <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2052167?docref=BEdSk2L4czGwucc8aJ1sTw>
- Ouranos (2015). Vers l'adaptation : Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec. <https://www.ouranos.ca/sites/default/files/2022-12/proj-201419-synthese2015-rapportcomplet.pdf>
- Ouranos (2020). Science du climat et services climatiques : Programmation 2020-2025. <https://www.ouranos.ca/fr/programmation-2020-2025-scsc#projets-de-recherche---13>

- Ouranos (2024). Le système alimentaire québécois à l'ère des changements climatiques. https://www.ouranos.ca/fr/actualites/2024-09-25/systeme-alimentaire-quebecois-changements-climatiques?utm_source=chatgpt.com
- Ouranos, MELCCFP (2024). Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques - Guide pour les organismes municipaux. 138 pages. <https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/environnement/publications-adm/plan-economie-verte/outils/guide-elaborer-plan-adaptation-organismes-municipaux.pdf>
- Ouranos, MAMH et ministère de la Sécurité publique (2020). Adaptation aux changements climatiques : défis et perspectives pour les régions de Montréal et Laval. https://www.mamh.gouv.qc.ca/fileadmin/publications/amenagement_territoire/lutte_contre_changements_climatiques/fiches_syntheses_regionales/FIC_Ouranos_MontrealLaval.pdf .
- Owen G. (2020). What makes climate change adaptation effective? A systematic review of the literature. *Global Environmental Change*, 2020/05/01, vol. 62, p. 102071. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378019312026>
- Parent, S., Charlebois, S. (2018). « Les Canadiens de moins en moins carnivores, mais nos végétariens sont souvent des infidèles », *Radio Canada International*. <https://www.rcinet.ca/fr/2018/11/15/alimentation-viande-canadiens-vegetariens-enquete-sylvain-charlebois-universite-dalhousie/>
- Park S.E., Marshall N.A., Jakku E., Dowdd A.M., Howden S.M., Mendham E., Fleming A., (2012). “Informing adaptation responses to climate change through theories of transformation”, *Global Environmental Change*, vol. 22, n° 1, p. 115-126. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2011.10.003>
- Pigeon, S., Fortier, C., Coderre, F., Drolet, J.-Y. (2012). Travail réduit du sol - Fiche détaillée. Bureau de l'efficacité et de l'innovation énergétique. https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/fileadmin/medias/pdf/agroalimentaire_agricole/14-Travail_reduit_du_sol.pdf
- Plouffe, D., et Bourgeois, G. (2012). Modèles bioclimatiques pour la prévision des risques associés aux ennemis des cultures dans un contexte de climat variable et en évolution. *CRAAQ*, p. 1-13. https://www.agrometeo.org/help/modeles_bioclimatiques_ennemis_des_cultures.pdf
- Poore, J., Nemecek, T. (2018). Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.aaq0216>
- Prévoist, D. (2023). Les principaux capteurs optiques utilisés en agriculture. *INO*. <https://www.ino.ca/fr/blogue/principaux-capteurs-optiques-utilises-en-agriculture/>
- Producteurs de grains du Québec (2020). État des pratiques agricoles : semis direct et techniques culturales simplifiées. <https://pgq.ca/>

- Qaim, M. (2020). Role of new plant breeding technologies for food security and sustainable agricultural development. *Applied Economic Perspectives and Policy* 42, 129–150 (2020).
<http://dx.doi.org/10.1002/aepp.13044>
- Ray, D. K., Gerber, J. S., MacDonald, G. K., 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> . <https://www.nature.com/articles/ncomms6989>
- Resilience Alliance (s.d.). "Key concepts." <https://www.resalliance.org/key-concepts>
- Research and Assessment Systems for Sustainability Program (2001). Vulnerability and Resilience for Coupled Human-Environment Systems: Report of the Research and Assessment Systems for Sustainability Program 2001 Summer Study. 29 May - 1 June, Airlie House, Warrenton, Virginia. Research and Assessment Systems for Sustainability Program Discussion Paper 2001-17. Cambridge, MA: Environment and Natural Resources Program, Belfer Center for Science and International Affairs, Kennedy School of Government, Harvard University. https://www.pik-potsdam.de/avec/peyresq2003/talks/0915/schroeter/background_literature/schroeter_background_vuln_report.pdf
- Rickards L., Howden S.M. (2012). Transformational adaptation: agriculture and climate change. *Crop and Pasture Science*, vol. 63, n. 3, p. 240-250. <https://doi.org/10.1071/CP11172>
- Rioux, A.(2022). Le secteur biologique du Québec : Pour un meilleur partage de la prime environnementale. Filière biologique du Québec, Rapport annuel 2022, 36 pages.
<https://cdn.ca.yapla.com/company/CPYPStRBRbngX9I2mHmKlRrB/asset/files/Rapport%20annuel%202022%20FBQ.pdf>
- Roots Analyses (2024). Precision Farming Market: Industry Trends and Global Forecasts, Till 2035. <https://www.rootsanalysis.com/reports/precision-farming-market.html>
- Roy, P., Grenier, P., Barriault, E., Logan, T., Blondlot, A., Bourgeois, G., 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>
- Sanscartier, R. (2023). Les retombées économiques de l'industrie agroalimentaire québécoise en 202. Direction recherches et politiques agricoles Union des producteurs agricoles, 23 p.
https://www.upa.qc.ca/fileadmin/01_UPA_provincial/Centre_communications/Etudes/UPA_Retombees_2023_final.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Santo, R., Palmer, A., Kim, B. (2016). Vacant Lots to Vibrant Plots, A Review of the Benefits and Limitations of Urban Agriculture. Johns Hopkins University.
<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.25283.91682>
- Schimmelpfennig, D (2016). Farm Profits and Adoption of Precision Agriculture. ERR-217, U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service. 1-46.
<https://www.ers.usda.gov/webdocs/publications/80326/err-217.pdf?v=4266>

- Saiz-Rubio, V., Rovira-Más, F. (2020). From Smart Farming towards Agriculture 5.0: A Review on Crop Data Management. *Agronomy* 10, no. 2: 207. <https://doi.org/10.3390/agronomy10020207>
- Seguin, B. (2010). Impact du changement climatique et adaptation de l'agriculture. INRA, Avignon. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/071/45071195.pdf
- Shafer, S. R., Walthall, C. L., Franzluebbers, A. J., Scholten, M., Meijs, J., Clark, H., Reisinger, A., Yagi, K., Roel, A., Slattery, B., Campbell, I. D., McConkey, B. G., Angers, D. A., Soussana, J.-F., et Richard, G. (2011). Emergence of the Global Research Alliance on Agricultural Greenhouse Gases. *Carbon Management*, 2(3), 209-214. <https://doi.org/10.4155/cmt.11.26>
- Silvertown, J. (2009). A new dawn for citizen science. *Trends in ecology & evolution* 24, 467-471. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2009.03.017>
- Simonet, G. (2016). De l'ajustement à la transformation : vers un essor de l'adaptation? Développement durable et territoires [En ligne], Vol. 7, n°2, juillet 2016, mis en ligne le 28 juillet 2016. <http://journals.openedition.org/developpementdurable/11320> ; DOI : 10.4000/developpementdurable.11320
- Smit, B., I. Burton, R.J.T. Klein, and Wandel, J. (2000). An anatomy of adaptation to climate change and variability. *Climatic Change*, 45: 223–251. <https://doi.org/10.1023/A:1005661622966>
- Smit, B., Skinner, M. W. (2002). Adaptation options in agriculture to climate change: A typology. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 7(1), 85-114. http://www.norsemathology.org/longa/classes/ClimateChange/Smit_and_Skinner_2002.pdf
- Smith, J.B., Klein, R.J. et Hug, S. (2003). *Climate Change, Adaptive Capacity and Development*. Singapour : Imperial College Press, 325 p. https://www.researchgate.net/profile/Richard-Klein-6/publication/303411482_Climate_Change_Adaptive_Capacity_and_Development/links/606e31694585150fe98fe6a3/Climate-Change-Adaptive-Capacity-and-Development.pdf
- Smith, L. et al. (2019). The greenhouse gas impacts of converting food production in England and Wales to organic methods. *Nature Communications*, vol. 10/1, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12622-7>
- Smith, P., Olesen, J. E. (2010). Synergies between the mitigation of, and adaptation to, climate change in agriculture. *The Journal of Agricultural Science*, 148(5), 543-552. <https://doi.org/10.1017/S0021859610000341>
- Soto, I., Barnes, A., Balafoutis, A., Beck, B., Sánchez, B., Vangeyte, J., Fountas, S., Van der Wal, T., Eory, V., et Gómez-Barbero, M. (2019). The contribution of precision agriculture technologies to farm productivity and the mitigation of greenhouse gas emissions in the EU. doi:10.2760/016263 <https://core.ac.uk/download/pdf/187763575.pdf>
- Swanson, D. (2010). Seven tools for creating adaptive policies. *Technological forecasting and social change* 77, 924-939 <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040162510000727>
- Swart, R., Biesbroek, R., Lourenço, TC. (2014). Science of adaptation to climate change and science for adaptation. *Frontiers in Environmental Science*. <http://dx.doi.org/10.3389/fenvs.2014.00029>

- Tabi M., Tardif, L., Carrier, P., Laflamme, G., Rompré, M. (1990). Inventaire des problèmes de dégradation des sols agricoles du Québec. Rapport Synthèse. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec. Publication no 90-130156. 65 pages.
https://irda.blob.core.windows.net/media/4431/rap_synt.pdf
- Taiz, L., Zeiger, E. (2002). Plant physiology, third edition. Sinauer Associates, inc, Sunderland, Massachusetts.
<https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/PlantPhysiologyTaiz2002.pdf>
- Tamini, L.D., Clerson, F., Doyon, D., Debailleul, G. (2014). Changements climatiques et position concurrentielle: le cas de l'agriculture du Québec. CREATE, cahier de recherche, 2014-5.
<https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2392939>
- Teasdale, J. R., et al. (2021). Reduced tillage and its role in improving soil health in no-till systems. Soil and Tillage Research, 212, 105049. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105049>
- Tesso G. (2013). Individual level vulnerability to climate change impact among crop dependent communities of western Ethiopia. Journal of Agricultural Economics and Development, September 2013, vol. 2, n. 9, p. 356-370.
<http://academeresearchjournals.org/download.php?id=285679605024510851.pdf&op=1&type=application/pdf>
- Tremblay, N., Michaud, A. (2014). Azote à taux variable : Plus de rendement avec moins d'engrais Agri-Réseau. CRAAQ - Colloque Fertilisation, agriculture de précision et agrométéorologie.
<https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/91613/azote-a-taux-variable-plus-de-rendement-avec-moins-d-engrais>
- Trumble, J., Butler, C. (2009) Climate change will exacerbate California's insect pest problems. California Agriculture 63, 73-78. <http://dx.doi.org/10.3733/ca.v063n02p73>
- Trnka, M., Muska, F., Semerádová, D., Dubrovský, M., Kocmánková, E., Zalud, Z. (2007). European Corn Borer life stage model: regional estimates of pest development and spatial distribution under present and future climate. Ecological Modelling 207, 61-84.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.04.014>
- Tubiana, L., Gemenne, F., Magnan, A. (2010). Anticiper pour s'adapter : Le nouvel enjeu du changement climatique, Pearson Education France, ISBN : 978-2-7440-6424-1, 204 pages.
<https://doi.org/10.4000/vertigo.10361>
- UNFCCC (2010). «The Mechanisms under the Kyoto Protocol: Emissions Trading, the Clean Development Mechanism and Joint Implementation». United Nations Framework Convention on Climate Change. <https://unfccc.int/process/the-kyoto-protocol/mechanisms>
- UNFCCC (2020). Amendement de Doha au Protocole de Kyoto.
https://unfccc.int/files/kyoto_protocol/application/pdf/kp_doha_amendment_french.pdf
- Union des producteurs agricoles - UPA (2022). Portrait des pratiques d'agriculture durable des fermes du Québec.
https://www.upa.qc.ca/fileadmin/01_UPA_provincial/Prod_Outils_ressources/UPA_Portrait_pratiques_agriculture_durable_Quebec_V04.pdf

- Union des producteurs agricoles -UPA (2023). Laboratoire vivant - Racines d'avenir 2023-2028. <https://www.upa.qc.ca/producteur/outils-et-ressources/agroenvironnement/laboratoire-vivant-2023-2028>
- Union des producteurs agricoles -UPA (2024). La réglementation. Les bandes riveraines du Québec. <https://www.upa.qc.ca/producteur/outils-et-ressources/agroenvironnement/bandes-riveraines/je-protege/la-reglementation> <https://www.upa.qc.ca/producteur/outils-et-ressources/agroenvironnement/laboratoire-vivant-2023-2028>
- Vanasse, A. (2017). Méta-analyse sur la contribution des cultures de couverture à la dynamique de l'azote, à la qualité des sols et aux rendements des grandes cultures. https://www.agrireseau.net/documents/Document_101324.pdf
- Veum, K. S., Zuber, S. M., Ransom, C., Myers, R. L., Kitchen, N. R., Anderson, S. H. (2022). Reduced tillage and rotational diversity improve soil health in Missouri. *Agronomy Journal*, 114, 3027–3039. <https://doi.org/10.1002/agj2.21156>
- Vijayakumar, S., Behzad Bazrgar, A., Thimmanagarib, M., Deenc, B., Schneiderc, K., Lauzonia, J., Voroneya, P., Thevathasan, N. (2024). Soil organic carbon and C changes when annual crops are replaced with perennial biomass crops in southwestern Ontario, Canada. *Canadian Journal of Soil Science* 105:1-12. <http://dx.doi.org/10.1139/cjss-2024-0033>
- Ville de Montréal (2021). Stratégie d'agriculture urbaine 2021-2026. <https://montreal.ca/articles/strategie-dagriculture-urbaine-sadapter-aux-changements-climatiques-18674>
- Vincent, L.A., Zhang, X., Brown, R.D., Feng, Y., Mekis, E., Milewska, E.J., Wan, H. et Wang, X.L. (2015). Observed trends in Canada's climate and influence of low-frequency variability modes. *Journal of Climate*, vol. 28, pp. 4545–4560. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00697.1>
- Walker, B., Holling, C.S., Carpenter, S.R., Kinzig, A. (2004). Resilience, adaptability, and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society* 9 (2) art. 5 [online], URL: <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art5>
- Walker, W., Harremoës, P., Rotmans, J., Sluijs, J., Asselt, M.B.A., Janssen, P., Kraus, M.P. (2003). Defining Uncertainty: A Conceptual Basis for Uncertainty Management in Model-Based Decision Support. *Integrated Assessment*. https://www.researchgate.net/publication/46641920_Defining_Uncertainty_A_Conceptual_Basis_for_Uncertainty_Management_in_Model-Based_Decision_Support/citation/download
- Walthall, C.L., J. Hatfield, P. Backlund, and al. (2012). *Climate Change and Agriculture in the United States: Effects and Adaptation*. USDA Technical Bulletin 1935. Washington, DC. 186 pages. https://www.researchgate.net/publication/269474231_Climate_change_and_agriculture_in_the_United_States_Effects_and_adaptation
- Watson, R. T., Baste, I. A., Larigauderie, A., Leadley, P., Pascual, U., Baptiste, B., Demissew, S., Dziba, L., Erpul, G., Fazel, A., Fischer, M., Hernández, A. M., Karki, M., Mathur, V., Pataridze, T., Pinto, I. S., Stenseke, M., Török, K., & Vilá, B. (2019). Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Service (p. 58). IPBES secretariat. <https://doi.org/10.1111/padr.12283>

- Wezel, A., Casagrande, M., Celette, F., Vian, J.F., Ferrer, A., Peigné, J. (2014). Agroecological practices for sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*.
https://www.researchgate.net/publication/257930369_Agroecological_practices_for_sustainable_agriculture_A_review
- Wolfe, D.W., Ziska, L., Petzoldt, C., Seaman, A., Chase, L., Hayhoe, K. (2008). Projected change in climate thresholds in the Northeastern U.S.: implications for crops, pests, livestock, and farmers. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 13, 555-575.
<http://dx.doi.org/10.1007/s11027-007-9125-2>
- Wolfe, D., DeGaetano, A. T., Peck, G. M., Carey, M., Ziska, L. H., Lea-Cox, J., Kemanian, A. R., Hoffmann, M. P., et Hollinger, D. Y. (2018). Unique challenges and opportunities for northeastern US crop production in a changing climate. *Climatic Change*, 146(1-2), 231-245.
<https://doi.org/10.1007/s10584-017-2109-7>
- Wood, S.A., Bowman, M. 2021. Large-scale farmer-led experiment demonstrates positive impact of cover crops on multiple soil health indicators. *Nature Food*, 2: 97–103.
<https://www.nature.com/articles/s43016-021-00222-y.epdf>
- Wreford, A., Ignaciuk, A., Gruère, G. (2017), « Overcoming barriers to the adoption of climate friendly practices in agriculture », Documents de l'OCDE sur l'alimentation, l'agriculture et les pêcheries, n° 101, Éditions OCDE, Paris, <https://doi.org/10.1787/97767de8-en>
- Yilai L., Feng, L., Xing, W., Hu, N., Noellemeier, E., Le Cadre, E., Minamikawa, K., Muchaonyerwa, P., Abdelrahman, M., Machado Pinheiro, E.F., De Vries, W., Liu, J., Chang, S.X., Zhou, Z., Sun, Z., Hao, W., Mei, X. (2024). Climate-smart agriculture: Insights and challenges. *Climate Smart Agriculture*, Volume 1, Issue 1, 2024, 100003, ISSN 2950-4090,
<https://doi.org/10.1016/j.csag.2024.100003>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2950409024000030>
- Yohe, G. et Tol, R.S. (2002). Indicators for Social and Economic Coping Capacity. Moving toward a Working Definition of Adaptive Capacity. *Global Environmental Change*, XII (1), p.25-40.
http://www.start.org/Projects/AIACC_Project/resources/ele_lib_docs/gyoheindicators.doc.pdf
- Zaatra, A. (2021). Vulnérabilité des exploitations agricoles et préférences d'adaptation au changement climatique dans le territoire du Pays Haut Languedoc et vignoble (PHLV). *Economies et finances*. Université Montpellier, France. https://theses.hal.science/tel-03548914/file/ZAATRA_2021_archivage.pdf
- Zanella, C. (2007). Les Techniques Sans Labour : Des pratiques culturelles en réponse à une agriculture plus durable. Master Professionnel « Espace Rural et Environnement », Université de Bourgogne, Faculté des Sciences, 22 pages. https://agriculture-de-conservation.com/sites/agriculture-de-conservation.com/IMG/pdf/non_labour_TSL_zanella.pdf
- Ziska, L.H. (2010). Elevated carbon dioxide alters chemical management of Canada thistle in no-till soybean. *Field Crops Research* 119, 299-303. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.018>

ANNEXES

Annexe 1

Prévisions des impacts des changements climatiques sur les insectes ravageurs au Canada et au Québec à partir de simulations climatiques.

Insectes ravageurs	Modèles	Paramètres bioclimatiques	Localisation	Horizons temporels	Principales conclusions	auteurs
Cécidomyie du chou-fleur (Contarinia nasturtii)	Bioclimatique : MidEmerge, DYMEM Climatique : aucun	Température Précipitations Humidité relative	Ontario et Québec	Non mentionné	Normal : 4 générations Avec C.C. : 5 générations	(Hallett et al., 2009)
Puceron bicolore des céréales Rhopalosiphum padi	Bioclimatique : Modèle d'interaction plante-ravageur Climatique : 2 GCM : HadCM3; CGCM2 [A1 à B2]	Température	Canada	2080	Expansion vers le nord	(Newman, 2006)
Criocère des céréales (Oulema melanopus) Méligèthe des crucifères (Meligethes viridescens) Charançon de la silique (Ceutorhynchus obstrictus) Criquet (Melanoplus sanguinipes)	Bioclimatique : CLIMEX Climatique : incrémentation de 1 à 7°C et de -60% à +60% de précipitations	Température Précipitations	Canada	2100	Changement de la distribution et l'aire de répartition et de leur abondance	(Olfert et Weiss, 2006 ; Olfert et Weiss, 2006)
Brûlure tardive de la pomme de terre (Phytophthora infestans)	Bioclimatique : CIPRA Climatique : 5 GCM: CGCM1;	Température Précipitations Humidité relative Humectation	Québec, CANADA	2025 2050 2075 2099	Brûlure tardive : pas de tendance en ce qui concerne le nombre de périodes favorables à l'infection. Tavelure:	(Bourgeois et al., 2004)

<p>Tavelure du pommier (Venturia inaequalis)</p> <p>Brûlure cercosporéenne de la carotte (Cercospora carotae)</p>	<p>ECHAM4; CSIRO-Mk2. CCSR/NIES; HadCM3. [+1%/an]</p>				<p>apparition plus hâtive et augmentation du nombre de périodes favorables à l'infection (sans calculer la conservation hivernale).</p> <p>Brûlure cercosporéenne : augmentation du nombre de périodes d'infection avec une décroissance pour les années 2075 et 2099, dues aux températures élevées.</p>	
---	---	--	--	--	--	--

Annexe 2

Stratégie de développement des services et de la recherche climatique adoptée par Ouranos et développée par le centre ESCER de l'UQAM (source : Ouranos, 2020)

