

Évaluation de stratégies augmentant potentiellement la résilience des cultures de soya québécoises
face aux changements climatiques.

Par
Thomas Brien-Brodeur

Essai présenté au Centre universitaire de formation en environnement et développement durable en
vue de l'obtention du grade de maître en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Michel Perron

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Mai 2023

SOMMAIRE

Mots clés : Résilience, changements climatiques, agriculture, soya, adaptation, atténuation, vulnérabilité, rendement, insécurité alimentaire.

L'objectif de cet essai est d'évaluer la performance de sept stratégies pouvant potentiellement contribuer à la résilience des cultures de soya québécoises face aux changements climatiques. Afin de bien saisir les enjeux entourant l'objectif, un portrait de l'agriculture au Québec, les conséquences du soya sur l'environnement et les effets directs et indirects des changements climatiques sur l'agriculture sont préalablement détaillés, servant du même coup de synthèse des savoirs.

L'évaluation est ensuite menée à l'aide de critères et est présentée dans une analyse multicritère. Les critères d'évaluation ont été choisis en fonction des principaux enjeux influençant la résilience du soya aux CC. Ils visent l'adoption des stratégies et des effets bénéfiques à court/moyen terme.

Les conclusions de l'évaluation mènent à la recommandation de mise en action à court/moyen terme de six stratégies sur sept, soit celles de se tourner vers l'agriculture biologique, d'implanter des cultures de couverture intercalaire en début de saison, de miser sur les technologies génétiques comme outil de sélection des variétés, d'adopter un marché du carbone en agriculture, de mettre en place un programme de valorisation monétaire des biens et services écologiques et finalement d'élargir l'accès au réseau électrique triphasé afin d'accélérer la transition énergétique. Seuls les résultats de la stratégie consistant à effectuer une migration des cultures de soya vers les régions nordiques du Québec se sont avérés négatifs à l'égard des critères d'évaluation, et n'est donc pas recommandé à court/moyen terme.

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier tous ceux qui ont été impliqué de près ou de loin à la rédaction de cet essai. Premièrement, merci à mon frère Xavier pour la révision complète du document, ainsi qu'à mes parents pour l'écoute et le support. Ensuite, je remercie Michel Perron pour son encadrement et ses conseils, en plus des belles discussions variées. Je souhaite finalement remercier mon employeur pour sa bienveillance et son indulgence lorsque mon temps et mon niveau d'énergie étaient plus limités.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
1. MISE EN CONTEXTE	5
1.1. Objectifs, portée et méthodologie de l'essai	5
1.2. Revue littéraire	6
1.3. La résilience climatique et ses enjeux	7
1.3.1. Vulnérabilité	8
1.3.2. Adaptation et atténuation des CC	8
1.3.3. Capacité d'adaptation	9
1.3.4. Atténuation des CC	9
1.4. Portrait de l'agriculture et du soya au Québec	10
1.4.1. Enjeux de gestion de la culture du soya	10
1.4.2. Superficie, rendement et production du soya québécois	10
1.4.3. Retombées économiques, prévisions et opportunités	12
1.4.4. Programmes de soutien, assurances et recherche	13
1.4.5. Exploitations agricoles et main d'œuvre	15
2. IMPACTS DE LA CULTURE DU SOYA QUÉBÉCOIS SUR L'ENVIRONNEMENT	17
2.1. Utilisation de pesticides	17
2.1.1. Suivi et contrôle des risques	18
2.1.2. Risques pour l'environnement et la santé	19
2.2. Fertilisation	21
2.3. Pertes et fragmentation des milieux naturels	22
2.3.1. Conséquences sur les pollinisateurs	24
2.3.2. Émissions et stockage de GES	25
2.4. Exploitation des sols	26

2.4.1.	Dégradation de la ressource	28
2.4.2.	Émissions et stockage de GES	29
2.5.	Besoins énergétiques	30
2.5.1.	Énergies fossiles	30
2.5.2.	Électricité	31
3.	EFFETS DIRECTS DES CC SUR LES CULTURES DE SOYA QUÉBÉCOIS	34
3.1.	Températures et dérèglements des saisons	34
3.1.1.	Saisons de croissance et périodes sans gel plus longues.....	35
3.1.2.	Fréquence, durée et intensité des températures extrêmes.....	36
3.2.	Précipitations	37
3.2.1.	Fréquence, durée et intensités des déficits hydriques.....	37
3.2.2.	Accroissement du nombre de jours de pluie de faible intensité	37
3.2.3.	Types de précipitations	38
3.3.	Concentration de CO2 atmosphérique	38
3.4.	Tempêtes et vents.....	39
3.4.1.	Érosion éolienne	39
3.4.2.	Érosion hydrique	40
4.	EFFETS INDIRECTS DES CC SUR LES CULTURES DE SOYA QUÉBÉCOIS.....	43
4.1.	Ennemis des cultures	43
4.1.1.	Insectes et invertébrés.....	43
4.1.2.	Mauvaises herbes	45
4.1.3.	Agents pathogènes	46
4.2.	Biodiversité et services écologiques	47
5.	DESCRIPTION DES STRATÉGIES CIBLÉES POUVANT AUGMENTER LA RÉSILIENCE AUX CC	49
5.1.	Se tourner vers l'agriculture biologique	49
5.2.	Implantation de cultures de couverture intercalaire en début de saison	50

5.3.	Miser sur les technologies génétiques comme outil de sélection des variétés	51
5.4.	Mettre en place des mesures incitatives et restrictives	52
5.4.1.	Adopter un MCA	52
5.4.2.	Mettre en place un Programme de valorisation monétaire des BSE.....	54
5.5.	Élargir l'accès au réseau électrique triphasé	55
5.6.	Effectuer une migration des cultures de soya vers le nord	56
6.	ÉLABORATION DE L'OUTIL D'ANALYSE	58
6.1.	Critères d'évaluation.....	58
6.2.	Échelle de cotation.....	60
6.3.	Pondération des critères.....	60
6.3.1.	Améliore la santé des sols.....	60
6.3.2.	Favorise la résistance aux événements météorologiques extrêmes	61
6.3.3.	Prend avantage du réchauffement du climat et des dérèglements des saisons	61
6.3.4.	Préserve ou enrichit la biodiversité et les services écologiques.....	61
6.3.5.	Réduit les vulnérabilités liées aux espèces nuisibles	62
6.3.6.	Atténue les sources de polluants et les impacts environnementaux attribuables à l'agriculture	63
6.3.7.	Offre des opportunités d'adaptation intéressantes et réalisables	63
7.	ANALYSE MULTICRITÈRE	64
7.1.	Tableau multicritère.....	64
7.2.	Interprétation des résultats	67
7.2.1.	Se tourner vers l'agriculture biologique	67
7.2.2.	Planter des cultures de couverture intercalaire en début de saison.....	72
7.2.3.	Miser sur les technologies génétiques comme outil de sélection des variétés.....	78
7.2.4.	Adopter un MCA	82
7.2.5.	Mettre en place un Programme de valorisation monétaire des BSE.....	88

7.2.6.	Élargir l'accès au réseau électrique triphasé afin d'accélérer la transition énergétique....	92
7.2.7.	Effectuer une migration vers les régions nordiques	96
RECOMMANDATIONS		103
CONCLUSION.....		108
RÉFÉRENCES.....		110
ANNEXE 1 - ÉMISSIONS NETS DE GES ANTHROPOGÉNIQUE ENTRE 1990 ET 2019		123
ANNEXE 2 - PROJECTION DE L'ÉVOLUTION DES RENDEMENTS AGRICOLES MONDIAUX.....		124
ANNEXE 3 - ÉVOLUTION DE LA DURÉE DE LA SAISON DE CROISSANCE AU CANADA		125

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1	Facteurs humains et biophysiques qui déterminent la vulnérabilité ultime des systèmes agricoles aux changements climatiques.....	8
Figure 2.1	Variation des indicateurs de risque pour l'environnement par type de pesticide, en pourcentage relatif à la période 2006-2008.....	20
Figure 2.2	Aspects physiques, chimiques et biologiques de la santé des sols.....	27
Figure 2.3	Variations de l'intensité en carbone selon le poste d'émission de 2000 à 2019.....	31
Figure 2.4	Réseaux de transport d'électricité du Québec.....	32
Figure 5.1	Schéma simplifié du marché réglementé du carbone au Québec.....	53
Figure 6.1	Étapes de la gestion intégrée des ennemis des cultures.....	62
Tableau 1.1	Rendements moyens des grains au Québec (t/ha).....	12
Tableau 1.2	Objectifs du Plan d'agriculture durable 2020-2030.....	14
Tableau 2.1	Émissions de CO2 par types de carburants fossiles.....	31
Tableau 3.1	Principaux changements climatiques prévus à l'horizon 2050 en fonction des indices thermiques pour toutes les régions agricoles du Québec.....	35
Tableau 3.2	Types d'érosion hydrique.....	41
Tableau 6.1	Description des critères d'évaluation.....	59
Tableau 6.2	Échelle de cotation.....	60
Tableau 6.3	Pondération des critères.....	60
Tableau 7.1	Analyse multicritère.....	65
Tableau 7.2	Analyse multicritère (suite).....	66

LISTE DES ACRONYMES, SYMBOLES ET SIGLES

ARLA	Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire
BSE	Biens et services écologiques
CC	Changements climatiques
CCI	Cultures de couverture intercalaire
EEE	Espèce exotique envahissante
FAO	Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture
FADQ	Financière agricole du Québec
GES	Gaz à effet de serre
CEROM	Centre de recherche sur les grains
CRAAQ	Commission agrométéorologie du Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GM	Génétiquement modifié
MAPAQ	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
MCA	Marché du carbone en agriculture
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques, de la Faune et des Parcs
NKS	Nématode à kyste du soya
OMAFRA	Ministère ontarien de l'agriculture, de l'alimentation et des affaires rurales
ONU	Organisation des Nations unies
SPEDE	Système de plafonnement et d'échange de droits d'Émission de gaz à effet de serre
UPA	Union des producteurs agricoles

INTRODUCTION

Selon les modélisations de l'Organisation des Nations unies (ONU), la population mondiale a officiellement dépassé les 8 milliards d'individus le 15 novembre 2022 (Le Monde, 2022), ce qui représente une hausse d'un milliard depuis 2011. L'ONU estime d'ailleurs que cette hausse atteindra 9,7 milliards d'humains sur Terre en 2050, et ce malgré une perte de vitesse de la croissance annuelle moyenne. L'accroissement démographique sera concentré dans les régions en développement, principalement en Afrique et en Asie (ONU, 2022). Au Québec, la population de 2022 s'élève à environ 8,7 millions d'habitants, et les projections pour 2050 sont estimées à 9,5 millions (ISQ, 2022). Conséquemment, la pression exercée sur les écosystèmes planétaires augmente en corrélation avec la hausse des populations. Les besoins sans-cesse grandissant en ressources naturelles et en espace détruisent ainsi peu à peu l'équilibre écosystémique acquise par suite de milliards d'années d'évolution (GIEC, 2022).

De plus, selon le plus récent rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) publié en 2022, les émissions mondiales des quatre principaux groupes de gaz à effet de serre (GES), soit le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O) et les gaz fluorés sont elles aussi en hausse. En effet, malgré une baisse des émissions liées aux énergies fossiles et aux industries, l'augmentation des émissions liées à la production de biens matériels, la production d'énergie, le transport, l'agriculture, l'immobilier et la perte de territoires naturels mène années après années les bilans de GES mondiaux à la hausse (GIEC, 2022). L'annexe 1 illustre d'ailleurs cette tendance. Ainsi, la hausse démographique combinée au mode de vie de consommation des habitants de la planète sont directement imputables aux quantités de GES rejetés dans l'atmosphère et s'avérant non-viable à long terme (Ouranos, 2015). Malgré la croyance que les pays asiatiques soient les principaux responsables, ce sont les Nord-Américains qui mènent au chapitre des émissions de GES par capita, et ce en dépit de l'accessibilité à l'information sur les répercussions actuelles et futures. Ils contribuent en effet à 12,1 % des émissions planétaires, soit deux fois plus que l'Europe de l'Est et l'Asie Ouest-Centrale (GIEC, 2022).

Ces hausses d'émissions de GES mènent à divers bouleversements climatiques observés partout dans le monde. Ce concept de bouleversements sera nommé **changements climatiques (CC)** tout au long de cet essai. Le plus documenté de ces bouleversements est le réchauffement planétaire. En effet, selon les estimations du GIEC :

« les activités humaines ont provoqué un réchauffement planétaire d'environ 1 °C au-dessus des niveaux préindustriels, avec une fourchette probable allant de 0,8 °C à 1,2 °C. Il est

probable que le réchauffement planétaire atteindra 1,5 °C entre 2030 et 2052 s'il continue d'augmenter au rythme actuel » (GIEC, 2018, p. 4).

Au cours des dernières décennies, l'évolution observée du climat a eu un impact sur tous les océans et sur les systèmes naturels et humains de tous les continents, ce qui témoigne de la sensibilité de ces systèmes au changement climatique (GIEC, 2014). Ces réchauffements sont observés plus fortement dans les régions continentales et nordiques. Les hausses de température en Arctique sont en effet trois fois supérieures à celles de la moyenne planétaire (GIEC, 2018). Le réchauffement dû aux émissions anthropiques mondiales qui ont eu lieu depuis l'époque préindustrielle sont la pierre angulaire des changements et bouleversements des systèmes climatiques. Il est toutefois improbable que ces émissions soient à elles seules en mesure de provoquer un réchauffement planétaire de 1,5 °C, mais que les réactions à la chaîne telle la perte d'écosystèmes sauvages, l'exploitation des ressources naturelles et la fonte du pergélisol soient des facteurs aggravants. Certaines conséquences du réchauffement climatique agissent en effet comme facilitateur, rendant les émissions de GES et ses conséquences exponentielles (GIEC, 2018). Les conséquences du réchauffement persisteront pendant des siècles à des millénaires et continueront de causer d'autres changements à long terme dans le système climatique tels que l'élévation du niveau de la mer, la fonte du pergélisol et la perte d'écosystèmes naturels avec des impacts associés à ces modifications (GIEC, 2018). Les risques sur les systèmes naturels et humains ne sont toutefois pas répartis uniformément. Ils sont généralement plus grands pour les populations et les communautés défavorisées de tous les pays, quel que soit leur niveau de développement (GIEC, 2014).

Face à ce défi mondial, les gouvernements à travers le monde se mobilisent afin d'atténuer les impacts des CC, mais aussi de s'y adapter. Le GIEC estime que :

« les risques futurs liés au climat seraient réduits par l'amplification et l'accélération de mesures d'atténuation des effets du changement climatique à grande échelle, multi-niveaux et transsectorielles et par la mise en œuvre d'une adaptation à la fois incrémentale et transformationnelle » (GIEC, 2018, p. 5).

Plus concrètement, une réduction forte et durable des émissions de gaz à effet de serre combinée à des mesures d'adaptation efficaces pourrait limiter les risques liés à ces changements (GIEC, 2014). Pour que les efforts déployés soient fructueux, il faut toutefois se doter d'outils appropriés et de structures de gouvernance adéquates, et renforcer nos capacités de réaction (GIEC, 2014). Au Québec, la *Programmation d'adaptation 2020-2025* (Ouranos, 2022) détaille les stratégies du gouvernement québécois pour faire face aux CC. Celui-ci s'articule autour de huit priorités d'adaptation fortement interreliées. Les voici :

- Économie du Québec
- Sécurité énergétique
- Disponibilité en eau
- Systèmes alimentaires
- Défis sociosanitaires
- Évènements extrêmes
- Milieux de vie
- Gouvernance climatique

Bien que tous extrêmement préoccupants, les défis entourant les systèmes alimentaires sont particulièrement inquiétants. En effet, la hausse démographique combinée aux conséquences des CC mettent encore plus à risque la sécurité alimentaire de la population mondiale, elle qui représente déjà un enjeu majeur dans plusieurs régions du monde (FAO, 2022). En plus de devoir nourrir une population sans cesse croissante, les systèmes agricoles mondiaux sont à risque de voir leur capacité de production diminuer dans les prochaines décennies. L'annexe 2 illustre l'évolution projetée des rendements des cultures à l'échelle mondiale prévoyant une diminution marquée dans la prochaine décennie (GIEC, 2014). Les CC entraînent des répercussions sur la productivité agricole et sur l'accès aux sources de nourriture traditionnelle (p. ex., gibier, petits fruits, champignons). Les risques sont directement liés à une incidence accrue des sécheresses, des inondations, des tempêtes et des vagues de chaleur, ainsi qu'à des changements dans le cycle de vie et la production des plantes, aux variations des aires de distribution des plantes et des animaux, à la fonte du pergélisol, à la propagation d'espèces envahissantes, et à l'émergence et à la propagation d'organismes nuisibles et de maladies (Gouvernement du Canada, s.d.).

* La somme des données correspondant à chaque période est de 100 %; le pourcentage des projections présentant une hausse des rendements par rapport à celles présentant une baisse des rendements est indiqué.

Au Québec, 13.1 % des québécois souffraient d'insécurité alimentaire en 2022, selon une étude de l'Université de Toronto (2022). Les conditions socioéconomiques sont les principaux responsables de ces difficultés au sein de la population (Bordeleau, 2022). Dans les prochaines années, les CC ne feront qu'exacerber le problème en causant des hausses de prix des marchés alimentaires, ce qui entraînera des conséquences sur la capacité de la population à bien se nourrir (GIEC, 2018). En effet, le marché de l'alimentation est fortement exposé aux aléas qui peuvent affecter les récoltes dans les principaux pays producteurs ou la demande chez les plus importants utilisateurs (MAPAQ, 2020b). Malgré les défis auxquels fait face le marché agricole québécois, certaines opportunités sont à sa portée. Les variations du

climat peuvent avoir des effets à la fois positifs et négatifs sur les différentes cultures et leurs rendements, et ce, en fonction des différentes régions agricoles du Québec (Saguez, 2020). Il est ainsi primordial que la communauté scientifique et les producteurs agricoles évaluent les solutions pour réduire la vulnérabilité alimentaire qu'apportent les CC.

En prenant en compte la situation géographique du Québec et son climat, le soya pourrait s'avérer une culture importante afin d'affronter les risques d'insécurité alimentaire au Québec, en plus de pouvoir potentiellement répondre à la demande croissante en protéines dans le monde (FAO, 2022). En effet, le soya est bien adapté au climat du Québec, en plus d'avoir une bonne capacité d'adaptation à différentes conditions (OMAFRA, 2017). De plus, le produit obtenu après la récolte est très polyvalent, pouvant être consommé comme protéine par les humains et les animaux, en plus de pouvoir être transformé en huile (Wallace & al., 2019). Elle est finalement la deuxième culture de grain en importance au Québec (Statistique Canada, 2022a). Le Québec possède donc déjà les installations et le savoir-faire pour tirer son épingle du jeu. Finalement, de nouvelles tendances alimentaires, dont la hausse de consommation des protéines végétales, pourraient augmenter la demande de grains pour la consommation humaine, au Québec comme ailleurs dans le monde. Il s'agit ainsi d'une opportunité pour le marché québécois de tirer son épingle du jeu et de bien se positionner dans le marché (Mordor Intelligence, 2023).

Conséquemment, le Québec pourrait dans le futur miser sur la culture du soya afin de participer à l'effort mondial contre l'insécurité alimentaire. Pour y arriver, les cultivateurs québécois, avec l'aide des instances supérieures et de la recherche scientifique, doivent assurer la résilience des cultures de soya face au CC, et ce sur une perspective à long terme. Cet essai vise ainsi le partage des connaissances et l'analyse des pratiques et stratégies pouvant augmenter la résilience du soya au Québec.

1. MISE EN CONTEXTE

Afin de réduire les risques d'insécurité alimentaire exacerbés par les CC, des actions mobilisatrices et le développement des connaissances sont impératives. Le domaine agricole se doit d'innover d'une façon proactive en s'inspirant notamment des technologies et des pratiques mises en œuvre dans des régions soumises actuellement aux conditions climatiques appréhendées pour le Québec (Ouranos, 2015). Le développement technologique et l'innovation offrent des opportunités intéressantes pour le domaine agricole québécois, mais nécessitent un apprentissage et un investissement en termes de temps et de coûts. Malheureusement, le transfert des connaissances demeure le maillon faible de la chaîne d'innovation du milieu agricole québécois (Producteurs de grains, 2019). Le présent essai agira donc à titre d'outil supplémentaire de partage de connaissances.

Une mise en contexte est en premier lieu impérative afin de bien cerner les enjeux agissant sur la résilience de la culture du soya au Québec. Le chapitre 1 comprend donc les objectifs et la méthodologie de l'essai, la définition des concepts de résilience aux CC et un portrait de l'exploitation du soya québécois.

1.1. Objectifs, portée et méthodologie de l'essai

L'objectif principal de cet essai est d'analyser et d'établir les actions à prioriser afin d'améliorer la résilience des cultures de soya québécois face au CC à l'aide d'un outil d'analyse, détaillé au chapitre 6. À partir de critères, une analyse multicritère permettra d'évaluer et d'accorder une note quantitative aux pratiques culturales basée sur leur capacité à augmenter la résilience. Les notes accordées ne seront que théoriques. De futures recherches devront être conduites pour déterminer l'efficacité pratique. De plus, la problématique est abordée majoritairement d'un point de vue écologique, plutôt qu'agronomique. La portée se limite à la culture du soya au Québec. Les stratégies seront analysées selon une mise en action à court/moyen terme et une efficacité à moyen/long terme, sans toutefois se limiter à des années précises. Le but étant d'améliorer la résilience dans le futur en sachant très bien que l'agriculture est une science en constante évolution. Ensuite, les résultats s'appliqueront aux cultures de soya de grandes surfaces. L'essai a finalement comme objectif secondaire d'être informatif, de servir de synthèse des savoirs et d'encourager les discussions concernant les CC et la culture du soya.

La division du travail est présentée dans le but de favoriser la compréhension et l'atteinte de l'objectif de départ. Premièrement, pour bien saisir la portée de l'étude, une mise en contexte détaillée est nécessaire. Celle-ci est divisée en trois sections : la présente explique les objectifs, la portée et la méthodologie de l'essai. La section 1.3 définit les concepts importants de la résilience, et la suivante fait le portrait de l'agriculture et du soya au Québec.

Deuxièmement, il est important de bien établir les liens entre l'agriculture québécoise et les CC. Le chapitre 2 détaille ainsi les impacts de la culture du soya sur l'environnement. Cette section est primordiale pour pouvoir ensuite évaluer des mesures d'atténuation des CC. Les chapitres 3 et 4 expliquent quant à eux les effets directs et indirects qu'ont les CC sur les productions de soya de la province et sur l'agriculture au sens plus large. Ces sections permettent de documenter les répercussions des CC sur la culture du soya, pour ensuite pouvoir analyser les mesures d'atténuation, la capacité d'adaptation et les vulnérabilités liées aux enjeux environnementaux, en plus de saisir les opportunités potentielles.

Troisièmement, avant de présenter l'analyse multicritère, la justification du choix des critères, de leur pondération et des stratégies à analyser est démontrée dans le chapitre 6

Quatrièmement, l'analyse multicritère présentée au chapitre 7 permet de faire ressortir les pratiques ayant le potentiel d'améliorer la résilience du soya au Québec. L'interprétation des résultats permet de justifier les cotes accordées à chaque critère.

Finalement, à la suite des résultats de l'analyse multicritère et de leurs interprétations, des recommandations sont émises. Celles-ci visent toujours l'objectif de départ, soit d'apporter des pistes de solutions pour améliorer la résilience des cultures de soya québécois face aux CC. Le processus d'adaptation et d'atténuation en lien avec la résilience est un défi de longue haleine. Les recommandations doivent donc pouvoir être applicables à court-moyen terme pour que ces bénéfices soient observables à plus long terme. Elles se doivent de plus de respecter la capacité d'adaptation des milieux agricoles.

1.2. Revue littéraire

Une revue littéraire élaborée a permis de synthétiser l'ensemble des enjeux impliqués dans la résilience du soya québécois face aux CC. Une attention particulière a été apportée à la crédibilité des documents consultés. Des sources de données fiables (*Agricultural and Environmental Science Database*, *Sofia*, *Google Scholar*, etc.) font donc partie des lieux de recherches priorisés afin de garantir que les ouvrages cités soient crédibles et révisés par les pairs. Finalement, la recherche des données les plus récentes possible est essentielle. Une attention particulière fût ainsi apportée aux dates de parutions des différents ouvrages.

La revue littéraire est divisée en trois parties distinctes. Pour débiter, le premier chapitre a pour objectif de recherche de dresser un portrait de la culture du soya au Québec. Les références consultées sont ainsi

majoritairement de source gouvernementale, telles que Statistiques Canada, le Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), la Financière agricole du Québec (FADQ) et l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). Les statistiques et données sur la production du soya au Québec, sur les programmes de soutien et les retombées économiques, ainsi que sur la main-d'œuvre proviennent donc majoritairement de ces sources. De plus, des compléments d'information proviennent d'organismes et d'unions tels que l'Union des producteurs agricoles (UPA), Équiterre et les Producteurs de grain du Québec.

Deuxièmement, les chapitres 2, 3 et 4, ayant pour objectif de détailler les impacts des cultures du soya sur l'environnement et les effets directs et indirects des CC sur l'agriculture, la provenance des sources se divise entre des documents gouvernementaux, des rapports d'études d'instituts de recherche, ainsi que des essais universitaires et professionnels. Subséquemment, en plus des sources énumérées dans le précédent paragraphe, plusieurs documents tirés du Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCC), du Ministère Ontarien de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales (OMAFRA) et de la Commission agrométéorologie du Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) ont été utilisés. Ouranos et le GIEC se sont aussi avérés particulièrement riches en informations portant sur les CC et ses prédictions.

Finalement, les chapitres 5 et 7 portant sur la description des stratégies et leur analyse reprend un grand nombre de données tirées des précédents chapitres, et donc des mêmes sources. Toutefois, des recherches agronomiques plus poussées ont été effectuées auprès des ressources accessibles pour les agriculteurs, tels que l'UPA, le CRAAQ et les Producteurs de grain. De plus, plusieurs documents de recherche, par exemple du Centre de recherche sur les grains (CEROM), de SoyGen et d'agronomes ont été consultés afin d'évaluer les stratégies et de suivre leur développement.

1.3. La résilience climatique et ses enjeux

La résilience climatique est aussi nommée résilience environnementale. D'un point de vue écologique, le dictionnaire Larousse (2022) définit la résilience comme étant la « capacité d'un écosystème, d'un biotope ou d'un groupe d'individus (population, espèce) à se rétablir après une perturbation extérieure ». Ainsi, dans le contexte des CC, la résilience climatique se définit comme étant la capacité d'un milieu à survivre et à prospérer face à la réalité du nouveau climat et des impacts y étant associés (Gouvernement du Canada, s.d.). Le GIEC (2014) identifie deux voies possibles pour favoriser la résilience, soit par l'atténuation des CC et par son adaptation. La combinaison des deux approches permet de diminuer les niveaux de vulnérabilité qui déterminent directement les capacités de résilience du milieu (GIEC, 2014).

1.3.1. Vulnérabilité

Le GIEC définit la vulnérabilité climatique comme la « prédisposition à subir des dommages. La vulnérabilité englobe divers concepts ou éléments, notamment les notions de sensibilité ou de fragilité et l'incapacité de faire face et de s'adapter » (GIEC, 2014, p. 144). Tel qu'illustré dans la Figure 1.1, le niveau de vulnérabilité est déterminé par les impacts potentiels de l'exposition aux stressseurs et à la sensibilité du milieu. La capacité d'adaptation agit quant à elle sur l'aptitude de ce système à pallier les impacts potentiels. La relation entre ces deux variables permet ainsi d'établir le niveau de vulnérabilité d'un milieu. En d'autres mots, la vulnérabilité d'une exploitation agricole dépend à la fois des effets biophysiques des CC et des actions mises en place par le secteur agricole pour modérer ces effets (Pepin, 2020).

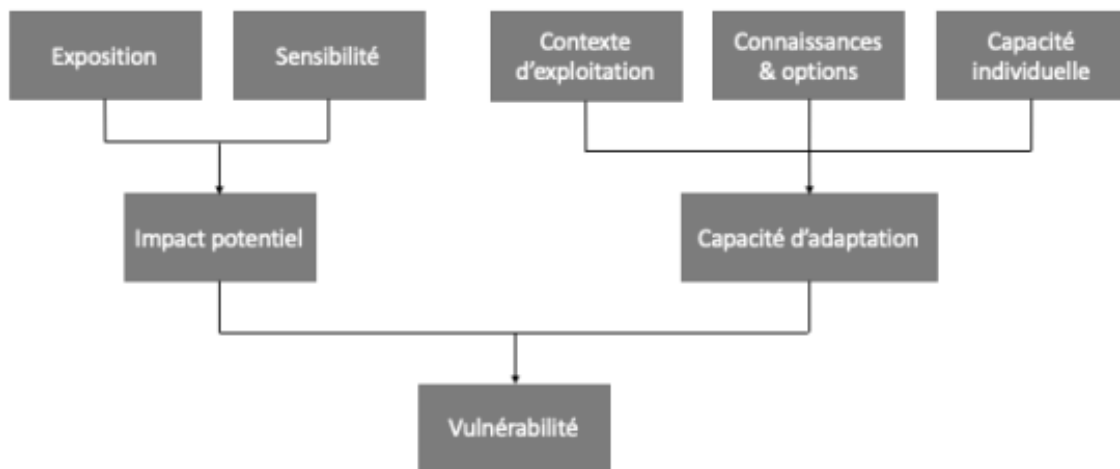


Figure 1.1 Facteurs humains et biophysiques qui déterminent la vulnérabilité ultime des systèmes agricoles aux changements climatiques (tiré de : Pepin, 2020, p. 26)

1.3.2. Adaptation et atténuation des CC

L'adaptation est ainsi un outil clé pour atteindre la résilience climatique. Le GIEC définit l'adaptation aux changements climatiques comme étant :

« une démarche d'ajustement au climat actuel ou attendu, ainsi qu'à ses conséquences. Pour les systèmes humains, il s'agit d'atténuer les effets préjudiciables et d'exploiter les effets bénéfiques. Pour les systèmes naturels, l'intervention humaine peut faciliter l'adaptation au climat attendu ainsi qu'à ses conséquences. » (GIEC, 2014, p. 132).

L'adaptation nécessite une transition des valeurs afin de donner la priorité aux investissements en temps, argent et travail immédiatement, pour éviter des pertes futures. Des changements graduels aux processus existants sont parfois suffisants pour assurer l'adaptation. Toutefois, il est parfois nécessaire d'apporter

un changement transformationnel du processus de prise de décision et d'établissement des priorités à toutes les échelles (Gouvernement du Canada, s.d.).

Dans le secteur agricole, l'adaptation se distingue de deux façons, soit par l'adaptation réactive et l'adaptation anticipative. L'adaptation réactive survient à la suite d'un événement perturbateur et vise un retour aux conditions initiales, lorsque c'est possible. Il est important de planifier des stratégies d'adaptation réactive pour affronter les événements plus difficiles à prévoir (Pepin, 2020). L'adaptation anticipative vise le long terme. Elle implique des prises de décision informées et tournées vers l'avenir, et ce, en trouvant des solutions créatives à des problèmes persistants. Pour se faire, elle doit se baser sur le partage de connaissances, les recherches et les expériences sur le terrain pour planifier des stratégies efficaces (Gouvernement du Canada, s.d.). Ainsi, afin de s'assurer d'avoir un plan d'adaptation aux CC efficace, les agriculteurs doivent considérer les deux types d'adaptation. Il est cependant important de garder en tête que rares sont les mesures d'adaptation qui éliminent complètement les effets négatifs des CC. Celles-ci se doivent donc d'être perçues comme des outils permettant d'amoinrir la gravité des conséquences qui se produiraient sans adaptation (Pepin, 2020).

1.3.3. Capacité d'adaptation

Tel que mentionné plus tôt, tous les systèmes ne possèdent pas la même capacité d'adaptation aux CC. Le GIEC définit l'enjeu ainsi : « Faculté d'ajustement des systèmes, des institutions, des êtres humains et d'autres organismes, leur permettant de se prémunir contre d'éventuels dommages, de tirer parti des opportunités ou de réagir aux conséquences » (GIEC, 2014, p. 133). Dans le contexte agricole, la capacité d'adaptation réfère à la disponibilité des ressources nécessaires (infrastructures, équipements, technologies, pratiques agricoles, capacité d'investissement, etc.) et la capacité de mobiliser ces ressources pour répondre efficacement à diverses conditions difficiles (Crawford et al., 2012). Conséquemment, des stratégies d'adaptation préventive, bien planifiées et coordonnées permettent d'améliorer la capacité d'adaptation du milieu, et donc sa résilience aux CC (Ouranos, s.d.).

1.3.4. Atténuation des CC

Aussi appelé mitigation des CC, l'atténuation implique de façon simplifiée les interventions humaines visant à réduire les sources de polluants ou à renforcer les puits de gaz à effet de serre (GIEC, 2014). Dans le milieu agricole, les mesures d'atténuation visent principalement les impacts directs et indirects des activités agricoles sur l'environnement, tels que les émissions de GES, la pollution de l'air et de l'eau, la conservation des écosystèmes et de la biodiversité, la santé des sols, etc. (Pepin, 2020).

1.4. Portrait de l'agriculture et du soya au Québec

Afin de bien saisir les défis actuels et futurs de la culture du soya au Québec, il est primordial de situer celle-ci dans son milieu. Pour se faire, la présente section met en lumière les enjeux techniques, géographiques, climatiques, économiques, sociaux et politiques qui s'y rattachent.

1.4.1. Enjeux de gestion de la culture du soya

Le soya est une légumineuse annuelle qui prospère dans les saisons chaudes et qui nécessite une longue saison sans gel (Wallace & al., 2019). Le *Guide agronomique des grandes cultures* OMAFRA est un outil détaillé présentant les conditions nécessaires à respecter pour cultiver le soya. Pour atteindre une productivité viable, le guide recommande une approche systémique intégrée. En d'autres mots, ceci implique que chaque champ possède des caractéristiques uniques et propres à son emplacement qui en influencent la gestion, les intrants et la rentabilité (OMAFRA, 2017). Les points suivants énumèrent les conditions non-négligeables de la production agricole :

- La gestion du sol (la texture et le travail du sol nécessaires);
- La rotation des cultures;
- La fertilité des champs;
- La gestion des éléments nutritifs (déchets);
- La gestion de l'eau;
- La protection des cultures;
- La gestion de la faune;
- La gestion du site;
- Le dépistage et la tenue de registres;
- La gestion du travail et du matériel;
- La consommation d'énergie;
- L'analyse des aspects économiques (p. ex. détermination des seuils d'intervention, des coûts de production et du rendement du capital investi).

(OMAFRA, 2017)

1.4.2. Superficie, rendement et production du soya québécois

En raison de son étendue géographique et de plusieurs régions hostiles, à peine 2 % du territoire québécois est consacré à l'agriculture (MAPAQ, 2020b). La majorité des cultures sont situées dans la vallée du Saint-Laurent où les terres sont fertiles et le climat est favorable (UPA, 2022). Les cultures de grains, dont le soya fait partie, occupent une grande part du territoire. En 2022, 39,5 % des 978 900 hectares de

terres québécois consacrés à la culture du grain appartiennent à la culture du soya, ce qui représente 386 800 hectares (Statistique Canada, 2022b). Parmi les autres types de culture de grain, soit l'orge, le canola, les céréales mélangées, l'avoine, le maïs-grain et le blé, seules les superficies accordées au soya et au blé ont augmenté dans les dernières années. En effet, les superficies ensemencées de soya ont subi une hausse de 186,5 % de 2002 à 2022, alors que l'augmentation pour l'ensemble des cultures de grain est seulement de 4,3 % pour la même période (Statistique Canada, 2022a). Finalement, le soya génétiquement modifié (GM) occupait 63 % des superficies de soya en 2022, ce qui représentait 74 % de la production totale. Le pourcentage de production GM est toutefois à 5 % inférieur à celui de l'ensemble du pays (Statistique Canada, 2022b).

Ensuite, la productivité des fermes canadiennes est à la hausse. En effet, les taux de rendement moyens pour la période 2014-2018 ont augmenté pour toutes les cultures de grain par rapport à la précédente période (Statistique Canada, 2022a). La figure 1.2 démontre les variations de rendement des différentes cultures de grain au Québec de 2009 à 2018. Le taux de variation du soya était de 7 % pour cette période, ce qui le place derrière le maïs-grain, le canola et le blé (MAPAQ, 2020b). L'apport du développement stratégique et technologique, combiné à certaines occasions favorables qu'offrent les CC expliquent en grande partie cette progression (Lepage et al., 2012a). L'écart de rendement avec l'Ontario est les États-Unis se rétrécit, mais demeure toutefois légèrement inférieur dû à la position géographique et au climat du Québec (Saguez, 2020). En 2022, la combinaison des meilleurs taux de rendement et des plus grandes superficies cultivées ont tout de même permis au Québec de produire plus de 2,5 fois les quantités de soya comparativement à 2002. La province est ainsi le troisième plus grand producteur de soya au Canada, derrière l'Ontario et le Manitoba (AAC, 2022). La production de maïs-grain reste toutefois la plus importante des cultures de grain au Québec. Malgré des superficies ensemencées similaires à celles du soya, la production de maïs est plus de trois fois plus élevées en 2022, et ce en raison de son taux de rendement largement supérieur à celui du soya (Statistique Canada, 2022a).

Tableau 1.1 Rendements moyens des grains au Québec (t/ha) (tiré de : MAPAQ, 2020b, p. 9)

	Moyenne 2009-2013	Moyenne 2014-2018	Variation
Orge	3	3,2	7 %
Canola	2,1	2,3	12 %
Maïs-grain	8,6	9,7	13 %
Céréales mélangées	2,6	2,7	6 %
Avoine	2,4	2,5	7 %
Soya	2,8	3	7 %
Blé	3	3,3	11 %

1.4.3. Retombées économiques, prévisions et opportunités

Au Québec, la production laitière est la plus importante du secteur agricole, regroupant 57 % des entreprises et 26 % des revenus (UPA, 2022). Les cultures végétales arrivent au second rang avec des recettes générées de 4 milliards de dollars en 2021 (Statistique Canada, 2022f). Dans ce type de production, les cultures de maïs-grain et de soya sont les plus lucratives et contribuent à 12 % des recettes agricoles totales de la province. Les régions de la Montérégie, de Chaudière-Appalaches et du Centre-du-Québec se partagent la majorité des recettes engendrées par la culture du soya (UPA, 2022). Ces revenus sont principalement issus de la transformation à des fins d'alimentation du bétail. En 2018, 85 % des recettes engendrées par le soya québécois provenaient en effet de la transformation (MAPAQ, 2020b). Finalement, le Québec exporte une quantité considérable de sa production de soya. Il est principalement exporté en Italie (25 %) et au Japon (11 %). La demande sur les marchés mondiaux influence donc grandement les profits engendrés (Gouvernement du Québec, 2022a).

Heureusement pour le Québec, la demande mondiale de sous-produits du soya pour la consommation humaine a augmenté dans les dernières années, et ce, en raison de la hausse du pouvoir d'achat des consommateurs dans les pays développés, l'amélioration de la productivité du soya et l'évolution des habitudes alimentaires (Mordor Intelligence, 2023). La sensibilisation sur les enjeux de santé et de mobilisation environnementale influence aussi les habitudes des consommateurs. À titre d'exemple, la plus récente mise à jour du Guide alimentaire canadien recommande de doubler la consommation de fruits, légumes, légumineuses et noix, en plus de réduire de 50 % la consommation d'aliments tels que la viande rouge, le sucre et les aliments ultra-transformés (Équiterre, 2022b). Celui-ci reconnaît que les protéines végétales, telles que celles contenues dans le soya, sont une alternative plus saine aux protéines animales. Le tofu et les boissons de soya enrichies figurent ainsi parmi la liste des aliments conseillés

(Santé Canada, 2019). Toutefois, malgré une meilleure compréhension des impacts qu'a l'industrie des protéines animales sur la santé des consommateurs et sur l'environnement, la demande de bétail, de bovins, de ruminants et d'autres animaux sur le marché mondial est, elle aussi, toujours à la hausse. La croissance exponentielle de la population mondiale, les disparités des systèmes de production et les différences culturelles expliquent la tendance (Strik, 2022). Ainsi, la demande d'huile, de tourteau et de farine de soya pour l'alimentation animale est aussi en augmentation puisque ceux-ci constituent une bonne alternative aux protéines de céréales (Mordor Intelligence, 2023). La polyvalence du soya lui permet donc de profiter de l'évolution des habitudes alimentaires dans certaines régions du monde, et du statu quo dans d'autres.






Finalement, en plus d'être fortement influencée par la demande du marché, l'économie du secteur agricole est aussi dépendante des prix de vente des productions et des intrants. Les agriculteurs sont ainsi à la merci des marchés financiers mondiaux. Les événements perturbateurs tels que les catastrophes climatiques, les pandémies et les guerres sont des gros vecteurs d'influence économique et entraînent des répercussions directes sur les finances des producteurs (MAPAQ, 2020b). Les agriculteurs devront d'ailleurs s'habituer à composer avec ce genre de situations problématiques qui seront de plus en plus fréquentes et violentes (Ouranos, 2015). À titre d'exemple, la crise sanitaire vécue dans les dernières années est responsable de grandes perturbations des marchés boursiers, menant en 2022 et 2023 à une inflation touchant tous les milieux, dont celui de l'agriculture. Conséquemment, en comparaison avec 2021, le prix des aliments au Québec a augmenté de 11 % en 2022 (Denis, 2022). La hausse des prix de vente des productions agricoles peut donc être perçue comme une opportunité pour les cultivateurs. Le FAO rappelle toutefois que, en plus de pouvoir freiner la croissance de la demande, « les gains tirés par les producteurs d'une augmentation des prix agricoles et alimentaires ne tardent pas à être résorbés par une rapide hausse des coûts des intrants » (FAO, 2022). Le soya bénéficie toutefois d'un avantage. En effet, malgré la hausse récente du prix des engrais, la plupart des producteurs de soya dégagent actuellement des marges d'exploitation positives relativement importantes. Ils ont moins besoin des engrais azotés, actuellement onéreux, et bénéficient tout de même du niveau élevé des prix de vente des productions (FAO, 2022).

1.4.4. Programmes de soutien, assurances et recherche

Plusieurs programmes et services appuyant l'innovation, l'agriculture durable, le développement des entreprises, la gestion des risques, le commerce et le développement des marchés sont offerts aux producteurs agricoles. Au Canada, Agriculture et Agroalimentaire Canada en liste 54 (AAC, 2023). Les

instances québécoises offrent aussi une panoplie de ressources afin de faciliter l'adaptation des exploitations agricoles aux CC et de mitiger leurs conséquences sur l'environnement (UPA, 2023b). Des actions significatives ont d'ailleurs été récemment réalisées au Québec. En effet, dans la dernière décennie, le gouvernement a versé plus de 23 millions de dollars en subventions pour la réalisation de quelque 242 projets en recherche et innovation (MAPAQ, 2020a). De ces investissements est né le *Plan d'agriculture durable 2020-2030* mis sur pied par le MAPAQ. Celui-ci vise à fournir les outils nécessaires à la responsabilisation des agriculteurs face aux engagements climatiques et de développement durable de la province, tout en fixant des cibles concrètes à atteindre d'ici 2030. Le tableau 1.1 énumère les objectifs, indicateurs et cibles à atteindre d'ici 2030 (MAPAQ, 2020a).

Tableau 1.2 Objectifs du *Plan d'agriculture durable 2020-2030* (tiré de : MAPAQ, 2020a, p. 10)

OBJECTIFS	INDICATEURS et cibles d'ici l'année 2030
 1. Réduire l'usage des pesticides et leurs risques pour la santé et l'environnement	1.1 Réduction de 500 000 kilogrammes de pesticides de synthèse vendus 1.2 Réduction de 40 % des risques pour la santé et l'environnement
 2. Améliorer la santé et la conservation des sols	2.1 75 % des superficies cultivées seront couvertes en hiver par des cultures ou par des résidus de cultures 2.2 85 % des sols agricoles auront un pourcentage de matière organique de 4 % et plus
 3. Améliorer la gestion des matières fertilisantes	3.1 Réduction de 15 % des apports de matières fertilisantes azotées sur les superficies en culture
 4. Optimiser la gestion de l'eau	4.1 Amélioration de l'indice de santé benthos des cours d'eau dégradés d'une classe ou de 15 unités 4.2 Réduction de 15 % de la concentration en phosphore total des cours d'eau
 5. Améliorer la biodiversité	5.1 Doubler les superficies agricoles aménagées (bandes riveraines élargies et haies brise-vent) favorables à la biodiversité

Afin d'assurer un soutien aux producteurs vers la réalisation de ces cibles, le MAPAQ offre de l'aide financière et de l'accompagnement via son programme *Prime-Vert*. Celui-ci cible des interventions admissibles à des bourses, en plus d'offrir des services-conseils. De plus, le programme donne l'opportunité aux producteurs de tester de nouvelles techniques directement sur leur ferme dans le but de s'y familiariser et de faciliter les transitions vers de nouvelles techniques et machineries (MAPAQ, 2022). En plus du MAPAQ, les cultivateurs québécois peuvent bénéficier de programmes de soutien gouvernementaux et d'appui au développement. La FADQ encourage par exemple le développement durable des entreprises agricoles à l'aide de prêts pour le démarrage d'entreprises non conventionnelles

et d'investissements pour la croissance de pratiques agroenvironnementales vertes et responsables. Elle offre finalement du soutien aux agriculteurs qui souhaitent entreprendre une transition vers l'agriculture biologique (FADQ, 2022a). Malgré tout, le niveau de subventions offertes aux producteurs agricoles québécois (5 %) est inférieur à celui de plusieurs pays occidentaux, tels que les États-Unis (8 %) et les pays de l'Union européenne (17 %) (UPA, 2022).

De plus, plusieurs programmes d'assurance récolte, de stabilisation des revenus et de couverture en cas d'événements climatiques causant des pertes existent, tant au fédéral qu'au provincial. Au Québec, selon les données de la FADQ, 97 % des indemnités versées pour dommage à la production de grains entre 2013 et 2018 étaient associées aux conséquences directes et indirectes des CC. (Producteurs de grain du Québec, 2019). Les services d'assurance agricole seront ainsi de plus en plus sollicités puisque les répercussions des CC ne cesseront de s'empirer dans le futur (Ouranos, 2015)

Finalement, des études en temps réel et des prévisions à plus long terme sont conduites par des firmes de recherche dans le but de mieux comprendre les enjeux auxquels font face les grandes cultures québécoises. Deux organisations majeures mènent les recherches de front au Québec, soit le CEROM et l'Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). Ces organisations développent différents projets de recherche en lien avec les changements climatiques, tel que l'élaboration d'outils d'aide à la décision (ex. modèles prévisionnels), la phytoprotection, les cultures de couverture, les bandes fleuries, la santé des sols, l'irrigation et drainage contrôlés, l'évaluation de l'adaptabilité et de la performance des plantes bio-industrielles dans un contexte de changements climatiques, etc. Ces sources de savoir sont des outils indispensables aux agriculteurs et au MAPAQ afin de planifier des stratégies d'adaptation efficaces. (CEROM, 2022b), (IRDA, 2022)

1.4.5. Exploitations agricoles et main d'œuvre

Une importante baisse du nombre de fermes canadiennes fut observée dans les 20 dernières années. En effet, un peu plus de 57 000 exploitations agricoles ont disparu au Canada depuis 2001, tous types de productions et cultures confondus. Les statistiques plus récentes suivent également cette tendance (Statistique Canada, 2022b). Cette consolidation dans l'industrie agricole s'explique par la concurrence (compétitivité et productivité) et l'apport de la technologie. Ce contexte favorise les fermes de plus grande taille et à plus forte intensité de capital (Zombre, U., 2019). La culture du soya est un des rares secteurs, avec le canola et le blé, dans lequel le nombre de fermes est en augmentation, et ce pour l'ensemble des provinces canadiennes. En 2021, le Québec comptait 2 518 exploitations cultivant le soya, plaçant la

province au deuxième rang canadien derrière l'Ontario qui elle en possédait 8 592. La progression des deux provinces fût comparable au cours des dernières décennies (Statistique Canada, 2022b).

En ce qui concerne la main-d'œuvre, le Québec est la seule province canadienne où une hausse des employés salariés du domaine agricole fût observée entre 2016 et 2021 (Statistique Canada, 2022b). La demande de main-d'œuvre reste toutefois largement supérieure à l'offre locale. L'âge moyen est en augmentation dans la province et la relève se fait plus rare (Statistique Canada, 2022c). Suite à un sondage conduit en 2018 auprès des employeurs agricoles de la province, 48 % d'entre eux déclaraient avoir été incapables de trouver suffisamment d'employés. De plus, selon le Conseil canadien pour les ressources humaines en agriculture, d'ici 2025, le bassin de travailleurs agricoles diminuera plus rapidement que le besoin de main-d'œuvre (CCRHA, 2021). La pénurie de travailleurs continuera donc de s'accroître d'année en année. Ainsi, le Québec et les autres provinces canadiennes font appel à des travailleurs étrangers temporaires pour pourvoir les postes vacants. Ils occupaient en effet 20 % de ces emplois en 2019 (Charron et al., 2019). Malgré tout, d'ici 2029, 27 % des emplois requis pour soutenir le secteur risquent de rester non pourvus si l'on ne parvient pas à trouver un nombre suffisant de travailleurs locaux et étrangers. (AgrilMT, 2021)

2. IMPACTS DE LA CULTURE DU SOYA QUÉBÉCOIS SUR L'ENVIRONNEMENT

De façon simplifiée, l'agriculture correspond à la modification des écosystèmes naturels par les humains afin de subvenir à leurs besoins alimentaires. Toutefois, ces interventions mènent inévitablement à des perturbations et à des déséquilibres dans l'équilibre écosystémique acquis grâce à des milliers d'années d'évolution (Ouranos, 2015). Peu importe les efforts d'atténuation des méfaits, les répercussions de l'agriculture sur l'environnement sont inévitables (Équiterre, 2022a). Cette section présente un compte-rendu rapide des effets néfastes de l'agriculture et plus précisément de la culture du soya sur l'environnement. Elle a comme objectif de cibler et d'expliquer les pratiques et ses conséquences sur l'environnement afin d'ultimement faciliter la mise en place de mesures d'atténuation. Ces informations seront aussi utiles à établir les critères, les pondérations et les résultats de l'analyse multicritère présentés dans le chapitre 6.

2.1. Utilisation de pesticides

Les cultures agricoles abritent et soutiennent une entomofaune constituée de diverses espèces animales, végétales, bactériennes, d'insectes et d'acariens. Certaines représentent des alliés pour les producteurs, par la pollinisation ou leur apport à la santé des sols. Les pollinisateurs sont des organismes assurant le transfert de pollen d'une fleur à l'autre, et ainsi la fertilisation des plantes (Santé Canada, 2021b). Les insectes (abeilles, guêpes, mouches, papillons, coléoptères, fourmis, etc.) sont les principaux acteurs responsables de la pollinisation. Ceux-ci font partie intégrante des milieux agricoles et naturels et sont indispensables dans la reproduction des espèces végétales comme le soya. Ainsi, ils contribuent à la préservation de la biodiversité et à la productivité des cultures. Ils sont d'ailleurs responsables de la pollinisation de près de 70 % des plantes cultivées (MAPAQ, 2022a).

Cependant, quelques espèces sont considérées comme des ravageurs pouvant causer des pertes de rendement, justifiant ainsi l'intervention des producteurs (Gagnon, Roy, & Roy, 2018). La gestion des ennemis naturels (prédateurs, parasitoïdes) constitue ainsi un enjeu majeur dans l'agriculture de grandes surfaces telle que celle du soya. Pour y faire face, les agriculteurs font appel à diverses méthodes de lutte physiques, mécaniques, biologiques ou chimiques, et ce de façon préventive ou répressive. Ces différentes méthodes peuvent être envisagées individuellement ou combinées entre elles (Saguez, 2020). Malgré ses effets négatifs observés sur les écosystèmes, notamment par la contamination des eaux de surface et souterraines (MAPAQ, 2022b), et les quantités importantes d'émissions de CO₂ dans l'atmosphère que cause leur fabrication (Boutin et al., 2011), l'application de pesticides tels que les herbicides, les insecticides et les fongicides est une stratégie vastement utilisée par les producteurs de soya québécois

puisqu'elle représente une solution rapide et efficace aux ennemis des cultures (OMAFRA, 2017). Les herbicides sont les plus utilisés au Québec avec 65 % des ventes de pesticides à des fins agricoles, suivi des fongicides à 14 % et des insecticides à 8 %. Les chiffres sont toutefois à la baisse dans les dernières décennies (MELCC, 2020). Il est important de noter que la majorité des données datent du dernier rapport du MELCC *Bilan des ventes de pesticides au Québec* paru en 2020. Certaines d'entre elles pourraient donc avoir évoluées au cours des deux dernières années (MELCC, 2020).

2.1.1. Suivi et contrôle des risques

Le suivi et le contrôle de l'utilisation des pesticides sont à la fois régis par des instances fédérales et provinciales. Au fédéral, l'Agence de réglementation de la lutte antiparasitaire (ARLA) de Santé Canada a comme responsabilité d'homologuer les pesticides permis, d'appliquer des restrictions d'utilisation et la révocation de certaines méthodes. Elle impose aussi des exigences à respecter en termes de dose d'application et de techniques d'atténuation, telles que les zones tampons et bandes riveraines (Santé Canada, 2021b). Au Québec, le MELCC a le pouvoir d'imposer des normes plus sévères que celles prescrites par l'ARLA. Il publie d'ailleurs annuellement le *Code de gestion des pesticides* servant d'outil de référence pour les agriculteurs (MELCC, 2016). De plus, *L'indicateur de risque des pesticides du Québec* (IRPeQ) sert de référence afin de déterminer les facteurs de risque que représentent les pesticides autorisés. Il s'agit d'un « outil de diagnostic et d'aide à la décision conçu pour évaluer le risque pour la santé et l'environnement découlant de l'utilisation des pesticides et en optimiser la gestion » (INSPQ, 2007). Santé Canada collabore aussi activement avec plusieurs organisations internationales afin d'apporter des améliorations à l'évaluation des risques et aux mesures d'atténuation pour les pollinisateurs (Gouvernement du Canada, 2021). Cependant, ces outils ne prennent pas en compte l'amplification des effets causée par la présence de plusieurs composés chimiques dans un même environnement, qui pourtant est un enjeu important à considérer (Relyea, 2009).

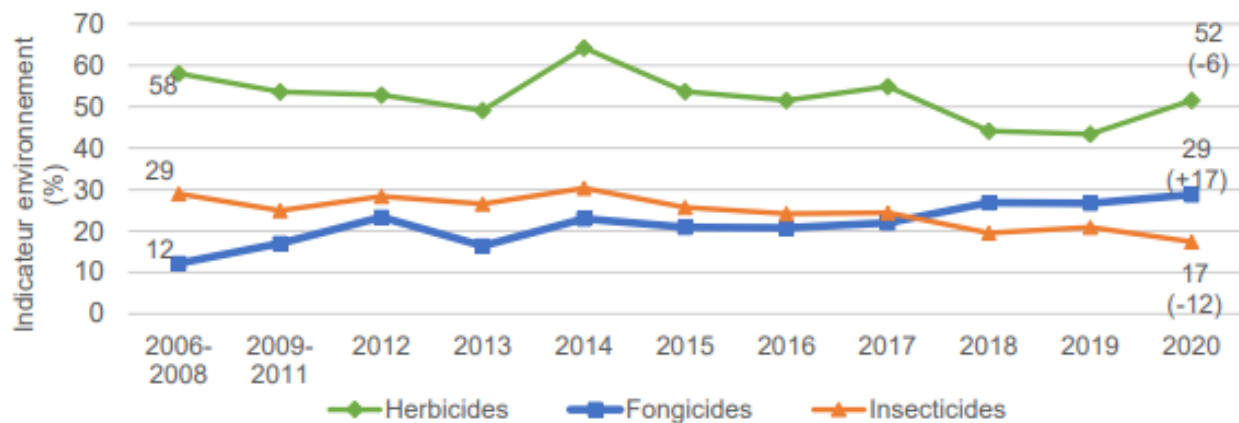
Afin d'assurer un suivi sur l'ensemble du territoire québécois, la présence de pesticides en eaux de surface s'avère un critère révélateur de la contamination causée par l'agriculture. L'Atlas de l'eau du Québec permet d'illustrer l'ampleur de la problématique avec sa carte interactive. Celle-ci démontre que les cours d'eau de la vallée du Saint-Laurent, là où l'agriculture est la plus concentrée, sont les plus contaminés par les pesticides. Les analyses d'eau de plusieurs tributaires du fleuve Saint-Laurent du sud-est de la province (en amont du fleuve) contiennent en effet plus de 21 types de pesticides différents. Le nombre de pesticides présents dans l'eau diminue à mesure que l'on remonte le fleuve vers l'aval, mais reste tout de même préoccupant. (MELCC, 2022a)

Le MELCC assure aussi le suivi des concentrations de pesticides présents dans les cours d'eau à proximité de certaines cultures ciblées en raison des vastes superficies traitées ou de l'intensité d'utilisation des pesticides à l'hectare. Les cultures de soya figurent d'ailleurs parmi celles-ci. Le critère de vie aquatique chronique (CVAC) est « la concentration la plus élevée d'une substance qui ne produira aucun effet néfaste sur les organismes aquatiques (et leur progéniture) lorsqu'ils y sont exposés quotidiennement pendant toute leur vie » (MAPAQ, 2023). Ce critère est utilisé comme indicateur de concentration des contaminants. De 2015 à 2017, des dépassements ont été observés pour treize pesticides, soit neuf insecticides et quatre herbicides, tous utilisés à différents degrés dans la culture du soya (MELCC, 2019b).

Finalement, des analyses d'eau souterraines fréquentes sont importantes afin de faire le suivi des concentrations de contaminants attribuables aux activités agricoles. En plus d'être indispensable à l'irrigation des cultures « Les eaux souterraines représentent l'unique source d'alimentation en eau potable pour près du cinquième de la population québécoise, dont 90 % de cette fraction vivent dans une région rurale » (MELCC, 2023b). Son suivi et les stratégies d'atténuation des méfaits causés par les pesticides sont ainsi des enjeux importants.

2.1.2. Risques pour l'environnement et la santé

La composition chimique des pesticides représente un risque pour la biodiversité. Ceux-ci affectent généralement plusieurs espèces d'animaux et d'insectes en influençant leur diversité et leur population totale. Les risques sont notamment élevés pour les insectes pollinisateurs. En effet, leur sensibilité particulière à la présence de ces contaminants dans l'environnement, combinés aux effets des CC (section 4.2), mettent une grande pression sur les populations d'insectes pollinisateurs partout dans le monde (Borenstein, 2022). La contamination liée aux pesticides met aussi à risque la santé de certaines espèces de poissons, d'oiseaux et d'invertébrés terrestres (MAPAQ, 2022b). Finalement, une amplification des effets sur les chaînes trophiques se fait sentir lorsque des herbicides et des insecticides se retrouvent dans un même milieu, et ce, même à de faibles concentrations (Relyea, 2009). Connaissant l'importance des services écologiques rendus par les écosystèmes sauvages et la biodiversité, il est pressant de cibler les pratiques et les substances contribuant à leur déclin direct. Ainsi, le MELCC illustre la variation des facteurs de risque pour l'environnement par type de pesticides, présentée en Figure 2.1.



* Les données de la figure ont été arrondies. Ces variations ont été calculées avec les données brutes et correspondent aux vraies valeurs.

Figure 2.1 Variation des indicateurs de risque pour l’environnement par type de pesticide, en pourcentage relatif à la période 2006-2008 (tiré de : MELCC, 2020, p.25)

Des trois types de pesticides, ce sont les herbicides qui représentent les facteurs de risques les plus élevés. Leur utilisation demeure malgré tout sensiblement stable depuis 2006 (Giroux, 2019). Le glyphosate et autres produits de la même famille sont les herbicides les plus appliqués au Québec (MELCC, 2020). En raison de l’accroissement de son utilisation dans les cultures de maïs et de soya génétiquement modifiés, ce produit a connu une augmentation importante depuis le début des années 2000. Afin de limiter le développement de la résistance des mauvaises herbes au glyphosate, d’autres herbicides tels que le S-métolachlore et l’atrazine doivent aussi être utilisés en complément ou en combinaison avec le glyphosate (Giroux, 2019). En 2018 et 2019, des règlements ordonnant la prescription de cinq herbicides jugés à grand risque pour l’environnement et la santé ont été instaurés par le MELCC, le glyphosate et l’atrazine en faisant partie. Conséquemment, pour une troisième année consécutive, on observe une baisse importante des ventes d’atrazine, soit une réduction globale de 96 % depuis la mise en œuvre de la justification agronomique. Leur présence dans l’environnement est ainsi est à la baisse. Par exemple, par rapport à 2019, des réductions de 80 % à 90 % d’atrazine sont observées dans les bassins versants de la rivière Yamaska, la rivière Chaudière, la rivière Saint-François et la rivière Nicolet (MELCC, 2020). Toutefois, une augmentation des ventes de produits de remplacement plus à risque (S-métolachlore, le MCPA, la métribuzine et le linuron) est observée. Ainsi, en 2020, l’herbicide S-métolachlore était pour une deuxième année consécutive l’ingrédient actif contribuant le plus à l’indicateur de risque pour la santé (12,1 %), suivi de l’herbicide bromoxynil (6,7 %) et du glyphosate (6,6 %). Le S-métolachlore est également l’ingrédient actif qui contribue le plus à l’indicateur de risque pour l’environnement (8,5 %), suivi des herbicides métribuzine (4,5 %) et imazéthapyr (4,2 %). Le constat par rapport aux potentiels produits de

remplacement demeure probant : la diminution des ventes d'atrazine et de glyphosate sur trois années reste supérieure au remplacement par d'autres pesticides (MELCC, 2020).

Ensuite, les fongicides se classent au deuxième rang des facteurs de risque parmi les pesticides. Les indicateurs sont d'ailleurs en constante augmentation depuis 2006 (Giroux, 2019). Les fongicides sont utilisés afin de lutter contre les champignons microscopiques responsables de certaines maladies s'attaquant aux plants de soya. L'utilisation de manière préventive est répandue dans la culture du soya. Toutefois, bien que le soya québécois doive composer avec différentes maladies pathologiques telles que la pourriture à sclérotas et le nématode à kyste du soya (NKS), sa nécessité est contestée. Les fongicides sont en effet utilisés même en l'absence d'un risque d'infection fongique significatif (Gutman, 2019). De plus, plusieurs maladies du soya affectent peu ou pas le rendement, et certaines d'entre elles n'ont aucun fongicide homologué pouvant les traiter (RAP, 2019). Ainsi, les recherches démontrent que les traitements fongicides dans le soya ne sont rentables que dans des cas spécifiques, et ne sont donc pas nécessaires dans la plupart des cas (Faucher, 2016). Les risques des fongicides sur les écosystèmes sont principalement dus à leur persistance environnementale très élevée et leur potentiel de lessivage important. Ainsi, sa dispersion dans les écosystèmes aquatiques affecte plusieurs espèces de poissons et d'invertébrés aquatiques d'eau douce. La toxicité sur ces organismes est considérée comme extrêmement élevée et présente un potentiel de bioaccumulation important (Gutman, 2019).

Finalement, les insecticides présentent les niveaux de risques moindres, en plus de voir ses indicateurs diminuer significativement. Ceux-ci agissent sur le système nerveux des insectes. Ils sont largement utilisés à titre préventif pour enrober les semences de soya afin de les protéger des ravageurs des semis. Ils sont cependant reconnus pour avoir des effets nocifs sur la santé des pollinisateurs. Ceux-ci se trouvent exposés via la pulvérisation des gouttelettes de pesticides, la poussière dégagée par les activités agricoles et la contamination du pollen, du nectar et de l'eau (MAPAQ, 2022b). En plus des impacts sur les pollinisateurs, les insecticides peuvent altérer les fonctions immunitaires de certains animaux. En effet, ils peuvent être responsables d'une réduction de la croissance et du taux de reproduction chez certaines espèces d'oiseaux et de poissons. Sur les invertébrés terrestres, comme les vers de terre, les effets vont de la modification du comportement à la mortalité (MAPAQ, 2022b).

2.2. Fertilisation

Les engrais ont aussi des impacts négatifs sur la qualité des cours d'eau. Selon Patoine (2017), la majorité des rejets de phosphore et d'azote dans les milieux aquatiques se retrouvent dans les bassins versants, là où les activités agricoles dominent (Massez-Cantin, 2022). Premièrement, la teneur en phosphore dans le

soya est élevée par rapport à ce que l'on retrouve dans le maïs et le blé. L'ajout de surplus fertilisants est ainsi nécessaire (Pioneer, s.d.). Une application est recommandée à l'automne ou au printemps (OMAFRA, 2017). Une application sur un sol dénudé augmente toutefois les risques de ruissellement du phosphore vers les cours d'eau avoisinants. En effet, les surcharges minérales dans les cours d'eau sont principalement dues au lessivage des engrais et au ruissellement influencés par l'intensité et l'abondance des pluies ainsi que leur avènement à la suite de l'ajout d'éléments nutritifs au sol. Les propriétés du sol ont aussi une incidence sur les quantités de nutriments lessivés (Rasouli et al., 2014). Conséquemment, le niveau de concentration des nutriments, principalement le phosphore, agit sur le processus d'eutrophisation des plans d'eau (Massey-Cantin, 2022). « La présence excessive de ces nutriments dans le milieu engendre plusieurs problèmes tels que la diminution de l'oxygène disponible, la réduction de la pénétration de la lumière et l'augmentation des matières en suspension (MES) » (Hudon-Voyer, 2021, p. 18). Tous ces effets entraînent ensuite des répercussions sur la santé des espèces fauniques et floristiques qui habitent le milieu. De plus, une augmentation des émissions de CH₄ est associée à l'accélération du processus d'eutrophisation (CAC, 2022). Le MELCC établit ainsi des charges tolérables (capacité de support) pour limiter les surcharges et les conséquences associées (Hudon-Voyer, 2021). Toutefois, les cartes interactives à jour de *l'Atlas de l'eau du Québec* démontrent que de grandes quantités de phosphore sont étendues sur les terres agricoles dans la vallée du Saint-Laurent. Les sols de ces régions sont donc considérablement saturés par le nutriment, réduisant ainsi leur capacité de rétention. Conséquemment, les cours d'eau environnants présentent des fréquences de dépassement des normes du MELCC très élevées. Plusieurs sont d'ailleurs en excès pour 100 % des échantillonnages (MELCC, 2022b).

De plus, des niveaux d'azote et de soufre élevés sont aussi observés dans les cours d'eau du sud de la province (MELCC, 2022b). Ces concentrations excessives sont majoritairement imputables à l'épandage massif d'engrais azotés sur les grandes cultures végétales (Massey-Cantin, 2022). Toutefois, puisque les légumineuses possèdent la capacité de fixer l'azote dans l'air, les plants de soya n'ont généralement pas besoin d'engrais azotés ni de soufre pour offrir un bon rendement. Les conséquences de l'utilisation de ces types de fertilisants sur l'environnement attribuable à la culture de soya sont donc négligeables (Vanasse & al., 2022).

2.3. Pertes et fragmentation des milieux naturels

Les milieux naturels et sauvages ont une valeur importante d'un point de vue écologique. Ils fournissent en effet des biens et services écologiques (BSE) essentiels au maintien de l'équilibre écosystémique, en

plus d'avoir de l'influence sur le climat. Ils contribuent par exemple à réguler les températures, les cycles hydriques, les émissions de GES, en plus d'offrir des obstacles physiques au vent et au soleil (CAC, 2022). Ils influencent aussi la qualité de l'eau, les cycles des nutriments, ou encore la diversité génétique et spécifique. Ils sont dynamiques, interactifs et constitués d'une mosaïque d'habitats au sein desquels se déroulent de nombreux processus écologiques. L'équilibre interne et relationnel de ces écosystèmes est principalement maintenu par la présence d'une biodiversité riche et variée, issue de nombreuses années d'adaptation. Celle-ci favorise d'ailleurs la résilience du milieu et sa protection face aux événements perturbateurs. Les pertes de milieux naturels et leur fragmentation, deux concepts intimement liés, mettent ainsi à risque l'équilibre écosystémique et ses BSE (Favorel, 2016).

La fragmentation se définit comme étant :

« des changements de configuration impliquant la réduction et le morcellement d'un habitat continu en plusieurs unités ou parcelles de tailles plus petites et plus ou moins isolées les unes des autres, séparées par un milieu environnant peu favorable que l'on qualifie de matrice » (Favorel, 2016, p. 5).

En plus du morcellement des habitats sauvages, la présence de barrières physiques telles que les routes et les infrastructures agit aussi sur la connectivité des milieux. La connectivité écologique est essentielle au déplacement des différentes espèces sur le territoire et leur permet de bénéficier d'une diversité d'habitats pour leur développement (Rayfield et al., 2021).

En plus de l'urbanisation et de l'exploitation forestière industrielle, l'agriculture contribue à l'évolution du territoire de la province. En effet, « les paysages agricoles québécois sont maintenant caractérisés par des mosaïques formées de cultures intensives entre lesquelles s'insèrent des parcelles d'habitats naturels et semi-naturels » (Chagnon, 2008, p. 26). Les hausses de superficies accordées aux cultures de soya au Québec détaillées dans la section 1.4.2, contribuent d'ailleurs à ces changements d'utilisation des sols (Statistique Canada, 2022a). Conséquemment, les modifications apportées au territoire perturbent l'équilibre des milieux et leurs fonctions, affectant ainsi la résilience des écosystèmes face au climat et aux événements météorologiques. En effet, les milieux naturels se voient plus fortement affectés par les perturbations externes telles que les vents, les précipitations, les feux et les températures. Les perturbations de l'équilibre interne des écosystèmes, en plus des modifications physiques du paysage augmentent la vulnérabilité et la capacité d'adaptation des habitats sauvages, mais aussi des exploitations agricoles. Finalement, en plus des conséquences sur la biodiversité et la résilience des milieux de vie sauvages, le cycle naturel d'émissions et de stockage des GES est aussi bouleversé (CAC, 2022).

2.3.1. Conséquences sur les pollinisateurs

Les pertes de milieux naturels et leur fragmentation affectent grandement les espèces bénéfiques à l'agriculture, plus particulièrement les insectes pollinisateurs. En effet, depuis le début des années 2000, le niveau de mortalité hivernale des colonies d'abeilles domestiques a pratiquement doublé au Québec. La perte d'habitats et de biodiversité florale fait partie des nombreux facteurs expliquant la surmortalité des pollinisateurs observée dans la plupart des pays industrialisés (MAPAQ, 2022a).

Premièrement, plusieurs espèces dont de nombreux insectes pollinisateurs exigent une diversité d'habitats pour leur développement, tels que différents endroits pour la nidification, l'alimentation et la reproduction. Les pertes d'écosystèmes sauvages tels que les forêts, les milieux humides et les prairies limitent l'abondance de ces habitats et du même coup les services et les ressources alimentaires qu'ils offrent (Chagnon, 2008). En plus de la destruction de ces milieux, leur fragmentation augmente l'effet de lisière. Des conditions écologiques spécifiques sont présentes dans l'écosystème de lisière par rapport à la zone centrale : l'ensoleillement, le régime des vents ou encore le régime de température vont varier. Ces conditions exercent une influence sur la faune et la flore présentes au centre, en plus de son niveau de résistance aux intempéries (Ouimet, 2008). Les services, les ressources et la protection offerts aux pollinisateurs par certains milieux peuvent ainsi être modifiés. Ensuite, la fragmentation restreint la connectivité entre les espaces sauvages, pourtant essentielle à la survie des pollinisateurs. En effet, afin d'assurer le renouvellement génétique, les pollinisateurs maintiennent une structure de métapopulation, c'est-à-dire un ensemble de populations séparées dans l'espace, mais interconnectées par des flux d'individus. Les couloirs continus en ressources alimentaires sont ainsi essentiels afin d'assurer leur déplacement et migration. Une réduction de l'accès à des corridors de ressources florales peut perturber et même freiner les contacts avec des populations sources qui permettraient une recolonisation et un renouvellement génétique. Les effectifs réduits et l'uniformité génétique qui en résultent rendent ainsi ces espèces plus sensibles aux conditions extérieures. En conséquence, on observe des taux de surmortalité élevés et des niveaux de reproduction à la baisse chez plusieurs pollinisateurs (Chagnon, 2008). Des études menées en collaboration avec le MELCC prévoient que la connectivité écologique devrait continuer de décliner dans les Basses terres du Saint-Laurent au cours du prochain siècle, ce qui exacerbera la problématique et augmentera les risques d'extinction de certaines espèces (Rayfield, et al., 2021).

Deuxièmement, les pertes de territoires sauvages occasionnent une diminution de la diversité spécifique et un changement de la composition des communautés d'espèces fauniques et floristiques. Les

changements dans la composition florale et dans la disponibilité des fleurs influencent les ressources alimentaires disponibles pour les pollinisateurs. En plus de la destruction de milieux riches en diversité floristique, la culture de champs agricoles généralement monospécifiques limite la variété florale, et ce malgré la rotation des cultures. En conséquence, les ressources alimentaires des pollinisateurs sont réduites. En effet, le pollen étant leur seule source de protéines, ils dépendent uniquement des fleurs pour répondre à leurs exigences alimentaires. Ainsi, en raison des besoins spécifiques des variétés d'espèces locales et de l'accroissement de la compétition, des ressources nutritives limitées créent des disparités chez les différents pollinisateurs. Certains se voient en effet plus fortement désavantagés que d'autres, réduisant ainsi la diversité spécifique des pollinisateurs. Comme les relations plantes-pollinisateurs sont bidirectionnelles, des populations d'insectes moins nombreuses et diversifiées mènent à une réduction de la pollinisation des plantes, et donc à une diminution de leur production de fruits. Le retrait du milieu d'un des deux partis entraînera inévitablement l'extinction de l'autre. Il s'agit ainsi d'un cercle vicieux. (Chagnon, 2008)

2.3.2. Émissions et stockage de GES

En plus d'assurer la biodiversité, les milieux naturels font partie intégrante de la régulation des GES dans l'atmosphère en agissant à la fois comme réservoirs et comme puits. De ce fait, les **forêts** sont le deuxième réservoir naturel de dioxyde de carbone en importance sur la Terre, après les océans. Elles contiennent plus de CO₂ qu'il ne s'en trouve actuellement dans l'atmosphère (CCMF, 2023). Le cycle de vie des forêts comprend un processus dynamique de croissance, de décomposition, de perturbation et de renouvellement. Lors de leur croissance, les forêts saines extraient du CO₂ de l'atmosphère et l'emmagasinent sous forme de carbone organique dans la fibre du bois. Toutefois, la destruction de ces écosystèmes peut accélérer ou même freiner ce processus. Le cycle naturel du carbone est ainsi perturbé, ce qui peut entraîner le déséquilibre entre la captation et les émissions de CO₂. Les forêts voient non seulement leur rôle d'atténuation des GES limité, mais deviennent aussi une source d'émissions (CCMF, 2023).

Les statistiques dévoilent que, de 2001 à 2021, le Québec a perdu 8.14Mha de couverture arborée, ce qui équivaut à une diminution de 10 % de la couverture arborée depuis 2000. Ces pertes de couvertures forestières sont majoritairement observées dans les régions nordiques de la province, et ce, en raison de l'exploitation forestière industrielle et des enjeux naturels tels que les feux (Global Forest Watch, 2023). Une proportion significative de ces changements d'affectation des sols est toutefois aussi visible dans le sud du Québec. Cette fois, l'urbanisation et l'expansion agricole sont les principaux coupables (Rayfield,

et al., 2021). À titre d'exemple, la région de la Montérégie, où les exploitations agricoles sont nombreuses, a vu la superficie de ses territoires forestiers diminuer de 1 282 ha/an entre les années 2000 et 2017 (Géomont, 2018). Les pertes de territoires forestiers observées au Québec dans les dernières décennies, auxquelles la culture du soya participe, contribuent donc à la hausse de CO₂ atmosphérique.

En plus des couverts forestiers, les milieux humides québécois sont aussi menacés par l'agriculture. Puisqu'ils sont considérés comme des obstacles à l'expansion, ils sont souvent drainés et soustraits aux inondations afin de favoriser l'agriculture (Chagnon, 2008). Toutefois, en plus d'offrir des écosystèmes riches en biodiversité, de contribuer à la bonne qualité de l'eau de surface et d'offrir une protection contre certains événements climatiques, les milieux humides comme les tourbières et les lacs séquestrent des quantités massives de carbone, ce qui contribue à diminuer les concentrations atmosphériques de GES (MELCC, 2023a). La rétention du carbone dans leurs sédiments permet en effet son maintien hors de l'atmosphère pendant de très longues périodes (sur une échelle de 10000 ans ou plus). De plus, les rivières et ruisseaux servent de canaux entre les cycles du carbone océanique et terrestre. Conséquemment, la conversion des sols dans les bassins versants peut mener au relâchement du carbone contenu dans les sédiments, en plus de bouleverser son mode transport vers de potentiels puits (CAC, 2022).

Finalement, les prairies naturelles sont des territoires de choix pour la conversion en champs agricoles (Chagnon, 2008). Celles-ci participent aussi à la séquestration du carbone dans la matière organique du sol. Toutefois, le travail du sol qu'implique leur transformation en champs exploitables favorise le relâchement des gaz stockés. Bien que le soya capte aussi le CO₂, son exploitation ne serait pas suffisante à compenser les émissions causées par le changement de fonction du sol (CAC, 2022).

2.4. Exploitation des sols

Pour toutes les cultures, la santé du sol est un facteur prédominant. En effet, la vie du sol joue un rôle important dans les processus biologiques qui bonifient le sol pour en faire une source de rendement élevé (Wallace & al., 2019). Ce qui définit un sol en santé est très spécifique à sa localisation et à sa fonction (Équiterre, 2022a). Il s'agit donc d'un système complexe qui se doit d'être traité avec soin pour le maintien de son équilibre et de ses fonctionnalités (Doucet, 2006). Une approche globale et personnalisée est donc nécessaire pour chaque entreprise agricole (Équiterre, 2022a). En bref, voici certains points déterminant la santé d'un sol :

- La structure du sol : Une bonne structure permet une circulation adéquate de l'air et de l'eau. Un sol bien drainé, peu compacté et qui résiste à l'encroutement favorise la pénétration des racines,

et mène donc à de meilleurs rendements. Elle réduit aussi la vulnérabilité du sol à l'érosion éolienne, hydrique et causée par le travail du sol.

- L'activité des organismes vivants élevés : La présence d'activité microbienne, bactérienne et les champignons contribuent à l'humification et la minéralisation du sol. Les vers, insectes et petits mammifères augmentent l'aération du sol.
- Un bon taux de PH (entre 6,0 et 7,5 pour le soya)
- Une teneur en éléments nutritifs optimale
- De bons niveaux de phosphore et d'azote

(OMAFRA, 2017), (Wallace & al., 2019)

L'image en Figure 2.2 illustre l'ensemble des facteurs à considérer afin de préserver un sol en santé. La disposition des bulles démontre bien que les aspects physiques, chimiques et biologiques sont tous interreliés entre eux. Un déséquilibre dans ce système complexe mène généralement à des conséquences environnementales et à des pertes de rendement (Wallace & al., 2019).

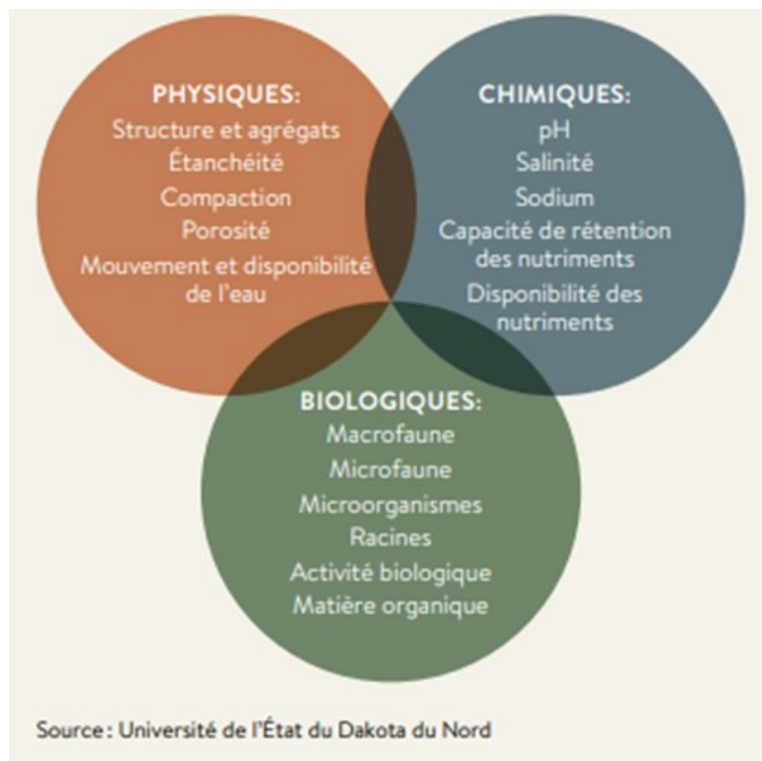


Figure 2.2 Aspects physiques, chimiques et biologiques de la santé des sols (tiré de : Équiterre, 2022a, p.

6)

2.4.1. Dégradation de la ressource

L'exploitation agricole influe sur la stabilité physique, biologique et biochimique de ce système et des milieux naturels avoisinants, qui peuvent en ressentir les répercussions (Perreault, 2012). La dégradation des sols est un enjeu majeur dans l'agriculture de grandes surfaces dont le soya fait partie. Dans le sud du Québec, l'épaisseur moyenne de la couche supérieure fertile est de 100 cm. Dans les dernières années, les pertes d'épaisseur varient entre 1 et 4 cm par an. La durée de vie de ces terres serait donc de 25 à 100 ans (Université Laval, 2019). Un processus de causes à effets explique comment et à quel rythme la ressource se dégrade. Des baisses de fertilité marquées et des conséquences environnementales non négligeables en sont les principales conséquences (Archambeaud, 2008). Les paragraphes suivants expliquent les étapes du processus de dégradation des sols.

En premier lieu, certaines pratiques agricoles mettent à risque l'activité biologique des sols. Les pratiques jugées plus invasives, telles que le labour en profondeur, les interventions mécaniques répétées et l'emploi d'outils rotatifs, augmentent d'ailleurs les perturbations biologiques. Ultiment, elles peuvent en effet mener à l'élimination de certaines espèces et des perturbations dans la structuration dynamique, les cycles de fabrication de l'humus et de contrôle naturel des ravageurs. Ces conséquences agissent comme un cercle vicieux, forçant les agriculteurs à compenser par davantage de travail du sol, de fertilisants et de produits phytosanitaires. (Archambeaud, 2008)

Ensuite, la compaction causée par la machinerie agricole compromet l'aération et la fragmentation de l'horizon superficiel, menant ainsi à une minéralisation de l'humus supérieure à sa capacité de formation. L'absence de couverture de protection et la pauvreté des rotations culturales peuvent amplifier ce phénomène. Ainsi, en raison de la diminution de matière organique évoluée (l'humus) et de minéraux, la structure de l'horizon superficiel du sol se voit fragilisée. Celle-ci est donc plus vulnérable aux agressions climatiques telles que l'érosion et le lessivage et impacte sa capacité de circulation de l'eau et de redistribution des éléments minéraux nécessaires aux cultures. De plus, toujours en raison de la disparition de l'humus et la perturbation de la vie du sol, la stabilité structurale du sol diminue. Il est ainsi plus sensible à la compaction. Progressivement, le sol se stratifie horizontalement, réduisant la réserve utile potentielle de matière organique et le volume exploitable par les racines. (Archambeaud, 2008)

Finalement, la stratification du sol réduit considérablement sa capacité de rétention et d'infiltration des eaux. Les risques d'inondations et de contamination des cours d'eau via le ruissellement de surface sont ainsi aggravés. (Archambeaud, 2008)

2.4.2. Émissions et stockage de GES

En 2019, la gestion des sols représentait 31,5 % des émissions de GES dues à l'activité agricole de la province (MELCC, 2019). Les principales sources de GES émis par la gestion des sols sont le N₂O et, en moindre proportion, le CO₂. En premier lieu, 79 % des émissions de **N₂O** dans le secteur agricole proviennent de la gestion des sols. De 1990 à 2019, les émissions de N₂O produites par la gestion des sols agricoles ont augmenté de 24,4 %, passant de 2,0 à 2,5 Mt éq. CO₂ (MELCC, 2019). Ce GES présente un potentiel de réchauffement planétaire de 298, ce qui en fait un gaz contribuant grandement à l'effet de serre. Le gros des émissions de N₂O résulte du processus de dénitrification, qui consiste en la transformation microbienne des nitrates en azote moléculaire. La présence de carbone organique en quantité suffisante et l'absence d'oxygène sont les deux conditions à la formation et l'émission de N₂O (Robert, s.d.). Ainsi, la compaction des sols contribue grandement à cet enjeu. Les conditions anaérobiques peu favorables qui en résulte contribuent à des modifications des propriétés hydrauliques du sol, comme l'infiltration, le drainage et la capacité de rétention en eau (Gasser et al., 2015). De plus, les échanges d'air sont limités dans un sol trop compact. Le mauvais drainage et une circulation d'air anaérobique sont les conditions idéales à la dénitrification et à l'émission de N₂O (Gasser et al., 2015). Ce phénomène est dupliqué par la présence d'engrais organiques et synthétiques azotés (Gagnon, Ziadi, Rochette, Chantigny et Angers, 2011). Cependant, tel que mentionné précédemment, l'utilisation de fertilisants azotés dans les cultures du soya est négligeable.

En plus des émissions liées à la structure du sol, le soya est directement responsable de relâchement de N₂O dans l'atmosphère. Étant une légumineuse travaillant en symbiose avec des bactéries fixant l'azote dans le sol, des quantités de N₂O sont donc stockées dans les nodules des racines. Leur décomposition entraîne donc l'émission de l'azote stocké. Il est cependant difficile d'évaluer les quantités d'émissions de N₂O qui y sont associées (Cai & al., 2015).

En second lieu, la grande majorité des émissions de **CO₂** dues à l'exploitation des sols agricoles résultent du chaulage et de l'application d'urée et d'engrais (MELCC, 2019). Au Québec, les sols sont généralement acides en raison du climat, de l'action des microorganismes et de la respiration des racines. L'application de chaux dans les champs agricoles est donc une pratique répandue afin d'atteindre des taux de pH optimaux à de bons rendements (Bulletin des agriculteurs, 2020). Plusieurs études démontrent toutefois que les réductions d'émissions de CO₂ causées par le bon pH du sol seraient supérieures à celles imputables à l'application de chaux. La pratique ne serait donc pas à condamner (Caulus, 2020).

2.5. Besoins énergétiques

Les exploitations agricoles dépendent des sources énergétiques pour leurs activités. En 2019, bien que l'agriculture représentait seulement 2 % de la consommation d'énergie totale du Québec, le secteur était responsable de 9 % des émissions de GES liées à la consommation énergétique de la province, et ce, en excluant le transport des productions (Whitmore & Pineau, 2022). Entre 1990 et 2019, malgré une diminution des émissions de GES par unité produite de -11,7 % expliquée par l'amélioration de la productivité, les émissions globales des activités agricoles ont augmenté de 12 %. La situation s'explique par une forte augmentation de la demande énergétique (+70,6 %), propulsée notamment par une hausse de la production au Québec (Bordeleau, 2023). La Figure 2.3 illustre les différents postes d'émission de GES en agriculture et leur variation depuis 2000. Il est évident que l'alimentation en énergie à la ferme est un enjeu prioritaire, avec une hausse de +54,6 % (Bordeleau, 2023).

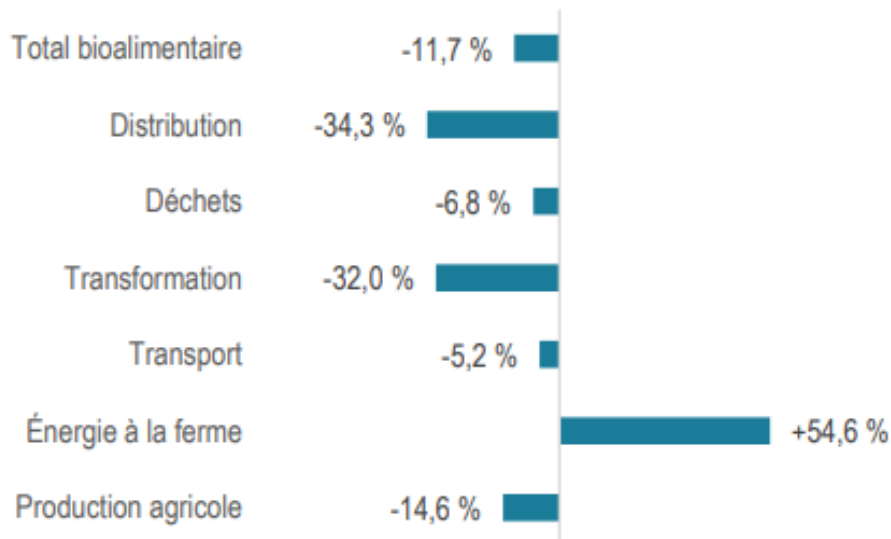


Figure 2.3 Variations de l'intensité en carbone selon le poste d'émission de 2000 à 2019 (tiré de : Bordeleau, 2023, p. 2)

Le poste Énergie à la ferme comprend l'ensemble de l'énergie nécessaire au fonctionnement des complexes agricoles, dont l'utilisation de la machinerie, le fonctionnement des équipements, le chauffage, l'éclairage et autres. En 2019, 60 % de l'énergie de ce domaine provenait des énergies fossiles, contre seulement 21 % de l'électricité et 19 % du gaz naturel liquide et non liquide (UPA, 2019).

2.5.1. Énergies fossiles

Les produits pétroliers raffinés sont majoritairement utilisés pour le fonctionnement des machineries, les équipements et le chauffage. La dépendance à ce type d'énergie polluante est toujours très forte au

Québec, et même à la hausse. En effet, de 2000 à 2019, « la consommation de carburant moteur (diesel et essence) a plus que doublé (+100,8 %), comparativement à une augmentation plus modeste (+40,0 %) pour les autres sources d'énergie (électricité, gaz naturel, mazouts légers, propane, etc.) » (Bordeleau, 2023). L'utilisation de tracteurs plus lourds et puissants, le recours à certaines pratiques agricoles nécessitant plus de travail au champ et de machineries, et l'augmentation de la production ont pu favoriser l'utilisation de combustibles fossiles (Bordeleau, 2023). De plus, le chauffage des bâtiments agricoles se fait encore régulièrement avec des systèmes à l'huile, propane et mazout (UPA, 2019). En conséquence, le recours massif aux énergies fossiles dans les cultures du soya québécois mène à de grandes quantités de CO₂ émis dans l'atmosphère (Whitmore & Pineau, 2022). Le Tableau 2.1 illustre les quantités d'émissions associées aux différents types de carburants fossiles utilisés dans les fermes de soya québécoises.

Tableau 2.1 Émissions de CO₂ par types de carburants fossiles (tiré de : Association canadienne du propane, 2017)

Type de carburant	Kg de CO ₂ par million de BTU
Gaz naturel	53.06
Gaz Propane	62.30
Éthanol (E85)	66.70
Gazoline	70.88
Kérosène	72.31
Diesel	73.15
Huile lourde	78.80
Charbon bitumineux	93.46

2.5.2. Électricité

Plusieurs étapes de la production de soya requièrent l'utilisation d'électricité. Celle-ci est utilisée pour le fonctionnement de machineries fixes et, dans une moindre mesure, l'opération de véhicules mobiles. De plus, la plupart des équipements de ferme, tels que les outils, l'éclairage, le chauffage, etc. utilisent l'électricité. Finalement, compte tenu des conditions climatiques du Québec, le séchage du grain à l'aide

d'équipements électriques est souvent nécessaire, ajoutant ainsi à la demande en énergie (Producteurs de grains du Québec, 2019). Au Québec, 94 % de l'électricité produite et distribuée provient de ressources hydroélectriques et est considérée comme une source d'énergie verte et renouvelable (MEIE, 2023). Toutefois, il est important de noter que les répercussions environnementales liées à sa production ne sont pas absentes. En effet, la construction de barrages peut premièrement entraîner une perturbation des écosystèmes locaux, la submersion de terres et la perte de biodiversité. Ensuite, l'augmentation de la sédimentation et l'accélération de la décomposition de matière organique entraînent la dégradation de la qualité de l'eau, en plus d'être responsables de quantités considérables d'émissions de GES tels que le CH4 et le CO2. Ces conséquences tendent à s'amoinrir après plusieurs années (Brusa-Pasqué, 2020).



Figure 2.4 Réseaux de transport d'électricité du Québec (tirée de : Hydro-Québec, 2023)

Ensuite, le transport de l'électricité se fait majoritairement via des lignes électriques à haute tension. Au Québec, 34 000 km de lignes de transport, dont le tiers est à très haute tension, assurent la distribution sur le territoire. Le tracé de celles-ci se doit d'être le plus linéaire possible. « En raison notamment du coût et des défis techniques que pose un réseau souterrain, le réseau de transport d'Hydro-Québec est presque entièrement aérien » (Hydro-Québec, 2019, p. 15). La Figure 2.4 démontre d'ailleurs que plusieurs de ces lignes haute tension traverse le sud de la province, là où les cultures de soya sont majoritairement concentrées (Hydro-Québec, 2023b). En conséquence, elles sont responsables de fragmenter plusieurs habitats sauvages offrant des BSE importants à la production de soya (Lesmerises et al., 2013).

Malgré tout, bien qu'elle ait un plus grand impact sur le territoire, l'hydroélectricité demeure un mode de production d'énergie beaucoup moins dommageable que ceux à base d'énergies fossiles. Elle se démarque par des émissions de GES extrêmement réduites et un rendement sur investissement énergétique nettement supérieur (Sabourin, 2021). De plus, la réduction de la demande en électricité par les consommateurs, principalement en période de pointe, contribuent à diminuer la pression sur le réseau d'Hydro-Québec, à réduire les importations d'électricité et de permettre à l'offre hydroélectrique actuelle d'être suffisante pour les besoins de la province. De cette façon, les risques que la société d'État considère la construction de nouveaux barrages sont amoindris (Hydro-Québec, 2023a).

3. EFFETS DIRECTS DES CC SUR LES CULTURES DE SOYA QUÉBÉCOIS

Comme l'agriculture dépend du climat, un déséquilibre de la stabilité climatique cause de sérieux défis aux producteurs. En effet, on estime que « le climat est responsable d'environ un tiers de la variabilité des rendements mondiaux des cultures, principalement en raison des variations de températures et de précipitations » (Ray & al., 2015) Les agriculteurs devront toutefois apprendre à composer avec des conditions climatiques qui ne cesseront d'évoluer (Ouranos, 2015).

À l'échelle mondiale, les CC mèneront à l'augmentation de la température moyenne dans la plupart des régions continentales et océaniques, des chaleurs extrêmes dans la plupart des zones habitées, des épisodes de fortes précipitations dans plusieurs régions, la probabilité de sécheresses et de déficits de précipitations dans certaines régions et la hausse des dommages créés par les tempêtes météorologiques (GIEC, 2018). Ces menaces sont déjà visibles au Québec et les prédictions démontrent qu'elles doivent être prises au sérieux dès maintenant pour assurer un contrôle des impacts futurs (Lepage et al., 2012a). La présente section met en lumière les effets directs des CC susceptibles d'exercer une influence sur les cultures de soya québécois et sur sa résilience.

3.1. Températures et dérèglements des saisons

La croissance des plantes est directement influencée par la température et les saisons. (Lepage et al., 2012a). Toutefois, les CC viennent déséquilibrer des variables auparavant plus stables et prévisibles. De ce fait, dans les 30 à 40 dernières années, on observe une augmentation des températures quotidiennes de 0,2 à 0,4 °C par décennie dans le sud du Québec (Lepage et al., 2012a). De plus, Ouranos prévoit que les températures annuelles à l'échelle mondiale se réchaufferont de 2 à 4 °C pour la période 2041-2070 et de 4 à 7 °C pour la période 2071- 2100 (Ouranos, 2015). Au-delà de la hausse des températures moyennes, différents bouleversements viennent mettre au défi les productions agricoles. Une synthèse des prévisions pour 2050 est illustrée dans le Tableau 3.1 et prend en compte les différents enjeux liés aux températures et aux saisons. Chacun de ces enjeux et ses conséquences sur les productions de soya québécois sont détaillés dans les prochaines sous-sections.

Tableau 3.1 Principaux changements climatiques prévus à l’horizon 2050 en fonction des indices thermiques pour toutes les régions agricoles du Québec (tiré de : Pepin, 2020, p. 13)

INDICES THERMIQUES		CHANGEMENTS À L’HORIZON 2050
Saison de croissance	Date de début et de fin de la saison de croissance	<ul style="list-style-type: none"> – Date de début de la saison de croissance plus hâtive – Date de fin de la saison de croissance plus tardive
	Longueur de la saison de croissance	Allongement et réchauffement de la saison de croissance
Températures extrêmes	Fréquence de températures > 30 °C	<ul style="list-style-type: none"> – Augmentation significative du nombre de jours où la température sera supérieure à 30 °C en été dans l’ensemble du Québec agricole, mais de façon plus marquée dans le sud du Québec. – Augmentation de la fréquence, de la durée et de l’intensité des extrêmes de chaleur
	Température minimale annuelle	– Diminution de la fréquence, de la durée et de l’intensité des extrêmes froids
Degrés-jours	Cumul durant la saison de croissance	– Augmentation du nombre de degrés-jours
Unités thermiques maïs (UTM)	Date de début et de fin de cumul des UTM	<ul style="list-style-type: none"> – Date de début de cumul des UTM plus hâtive – Date de fin de cumul des UTM plus tardive
	Cumul des UTM	– Hausse du cumul des UTM
Risques de gel	Date du dernier gel printanier	– Date du dernier gel printanier plus hâtive
	Date du premier gel automnal	– Date du premier gel automnal plus tardive
	Longueur de la saison sans gel	– Allongement de la saison sans gel

3.1.1. Saisons de croissance et périodes sans gel plus longues

La longueur de la saison affecte l’aptitude moyenne des cultures (Mimee et al., 2014). La durée de la saison de croissance ainsi que les périodes sans gel sont à la hausse au cours des dernières décennies, et les prédictions démontrent la même tendance dans le futur. En effet, des hivers moins froids et plus courts mènent à un dégel du sol plus hâtif au printemps. À l’inverse, une saison estivale plus longue mène à un gel tardif du sol (Ouranos, 2015). L’Annexe 1 démontre d’ailleurs la hausse du nombre de jours sans gel observée au Canada au cours des dernières décennies et les prédictions jusqu’à 2080. Ces deux phénomènes réduisent considérablement la proportion de temps où le sol est gelé durant l’année (Ouranos, 2015). Ces dérèglements sont une opportunité en or pour les espèces nuisibles et les maladies, abordées dans la section 4.1 (Mimee et al., 2014). De plus, les conditions hivernales plus clémentes mènent à une baisse de l’endurcissement au froid des plants, et donc à des taux de mortalité plus élevés lors de périodes de froid. Ces périodes de redoux favorisent finalement la perte du couvert de neige qui

agit comme isolant et protège le sol contre l'érosion. Le soya étant une plante annuelle, il subit moins les conséquences pouvant affecter la protection des racines des plantes vivaces (Pépin, 2020).

Les périodes de croissances plus longues pourraient représenter une occasion favorable bénéfique pour les agriculteurs québécois. En effet, une augmentation de la température dans une région donnée pourrait accroître le potentiel agronomique d'une culture requérant une longue saison de croissance, tel que le soya. Ainsi, en présence de sols fertiles, il pourrait être possible d'étaler au fil des années les cultures de soya québécoises plus au nord de la province. (Lepage et al., 2012a). En effet, Ouranos prédit que « l'augmentation des températures et l'allongement de la saison de croissance permettront une expansion potentielle de la zone de culture vers le nord et l'est du Québec » (Mimee et al., 2014, p.1). Cette situation représente donc une opportunité considérable pour revitaliser l'agriculture dans plusieurs régions actuellement moins choyées. En conséquence, la position du Québec comme producteur de soya en Amérique devrait se bonifier. Ces modifications majeures du milieu agricole québécois présentent cependant des risques significatifs pour l'environnement. De plus amples études devront être faites pour évaluer cette possibilité. (Mimee et al., 2014)

3.1.2. Fréquence, durée et intensité des températures extrêmes

Le déséquilibre climatique augmente significativement la fréquence, la durée et l'intensité des températures extrêmes (GIEC, 2019). Les périodes de chaleurs extrêmes (+ de 30°C) en saison estivale peuvent occasionner des pertes puisqu'elles accentuent les risques de stress thermiques des cultures, particulièrement lors des périodes de développement des grains (Atlas agroclimatique du Québec, 2012). La pollinisation est d'ailleurs un des stades les plus sensibles aux températures élevées (Ouranos, 2015). Parmi ces stress, les risques d'insolation à la chaleur sont fréquents (IRIS, 2022). Au Québec, l'extrême sud du territoire pourrait être concerné par cette situation, advenant que les scénarios de réchauffement les plus élevés se réaliseraient puisqu'il y fait déjà plus chaud (Ouranos, 2015). La réaction des cultures à ces épisodes de chaleur dépend fortement de l'espèce, de la variété, du stade de développement de la culture et de l'humidité du sol. (Ouranos, 2015). Pour contrer ces pertes, beaucoup d'énergie est déployée à l'élaboration de variétés de soya mieux adaptées aux températures extrêmes. Les études de chercheurs de l'Université Auburn sur les rendements de maïs et de soya entre 1951 et 2017 dans l'est des États-Unis exposent des résultats mitigés. En effet, la tolérance à la chaleur et au manque d'eau a permis d'accroître le rendement de 20 % pendant cette période. Ce gain a toutefois été compensé par une productivité réduite sous des conditions normales. Au total, durant la période de l'expérimentation, les cultures de

soya mieux adaptées ont subi une baisse de rendement de 67 %. Les experts concluent que la solution réside donc dans des variétés de plantes adaptées à plusieurs climats. (Yu, Miao, & Khanna, 2021)

3.2. Précipitations

L'apport en eau est primordial à l'agriculture végétale. Toutefois, les CC sont responsables de modifications dans les bilans hydriques et les types de précipitations, forçant les cultivateurs à s'adapter. (Ouranos, 2015).

3.2.1. Fréquence, durée et intensités des déficits hydriques

Normalement, le bilan hydrique annuel est positif au Québec. Cela signifie que les précipitations sous forme de pluie et de neige surpassent la quantité d'eau utilisée par les végétaux ou évaporée dans l'atmosphère par évapotranspiration (Pepin, 2020). Il est normal que des déficits hydriques soient créés par la distribution saisonnière des précipitations et des températures. Ces déficits sont toutefois exacerbés par les CC (Michaud et al., 2012). Ainsi, les déficits de précipitations sont de plus en plus longs lors de la période de croissance du soya, causant un stress sur les plants (Pepin, 2020). Les risques de sécheresses sont causés par les déficits de précipitations, mais aussi par les hausses des températures et les températures extrêmes décrites dans la section 3.1 (Données climatiques Canada, 2022). L'effet des CC exercera d'ailleurs de plus en plus de pression sur l'approvisionnement en eau puisque les périodes estivales de faible débit des cours d'eau (étiages d'été) seront plus longues et plus sévères (Direction de l'expertise hydrique, 2018). Des conflits pourraient ainsi survenir parmi les différents usagers requérant l'irrigation de leurs champs. Finalement, la hausse des températures moyennes a pour effet d'amplifier l'évapotranspiration des plantes et ainsi d'accroître les risques de déficits hydriques et de stress hydriques des plantes (Pepin, 2020).

3.2.2. Accroissement du nombre de jours de pluie de faible intensité

Un accroissement du nombre de jours de pluie de faible intensité est observé au Québec dans les dernières décennies. Les quantités de précipitations restent relativement stables en été et à l'automne, mais elles augmentent au printemps et de façon plus marquée en hiver (Michaud et al., 2012). Les quantités de précipitations hivernales représentent une source de neige utile aux agriculteurs, elle qui agit comme un isolant pour le sol. Les quantités de neige reçues ont d'ailleurs augmentées dans le nord du Québec, mais diminuées dans le sud (Lepage et al., 2012a), où celles-ci ont de plus en plus tendance à tomber sous forme liquide. Ainsi, combinée avec des hivers plus chauds, la hausse des précipitations sous forme liquide accélère la fonte du couvert de neige, tel que mentionné dans la précédente section, en

plus de favoriser la formation de glace au sol (Ouranos, 2015). Ouranos prévoit d'ailleurs que ce phénomène continuera à se développer d'ici 2050.

3.2.3. Types de précipitations

Les prédictions climatiques indiquent que les précipitations auront tendance à tomber sous forme de pluies orageuses intenses et localisées. Lors de ce type d'événement, la capacité des sols à retenir l'eau n'est pas suffisante et ils sont vite saturés. Ce phénomène est décuplé lorsque les sols sont secs, ce qui réduit leur capacité de rétention de l'eau (Macrae et Michaud, 2018). Les fortes précipitations représentent donc un des principaux obstacles au travail des agriculteurs dans les champs, eux qui doivent limiter les interventions sur des sols très humides ou inondés (Données climatiques Québec, 2022). En plus des niveaux d'humidité extrêmes des sols menant parfois à des inondations, un niveau de précipitations élevé cause la hausse de l'érosion hydrique et du ruissellement de surface. Ces trois phénomènes combinés accentuent les risques de contamination des eaux de surface par le transfert d'éléments nutritifs et de pesticides (Pepin, 2020). L'érosion hydrique engendre aussi une réduction de la productivité, en plus d'accélérer les effets des CC par la perte de carbone organique et de nutriments stockés dans le sol (Gowda et al., 2018). Finalement, les tempêtes de pluie ou de grêle à la hausse (Ouranos, 2015) augmentent la vulnérabilité liée à l'intégrité structurale des plants de soya. En effet, celles-ci peuvent avoir comme conséquence des lacérations et déchirures aux feuilles, résultant en une baisse de production des gousses. Ces blessures offrent enfin une porte d'entrée pour le développement d'organismes secondaires (IRIIS, 2023).

3.3. Concentration de CO2 atmosphérique

Le *Laboratoire de surveillance mondiale* du National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) établissait la moyenne de CO2 dans l'atmosphère à 414.72 ppm en 2021, ce qui représente une hausse d'environ 94 ppm depuis 1960 (NOAA, 2022). Le GIEC estime que ce chiffre pourrait atteindre 600 ppm si rien n'est fait pour réduire drastiquement les émissions mondiales de GES (GIEC, 2018).

La teneur en CO2 dans l'atmosphère influence la croissance et le développement des plantes, tout en modifiant leur composition chimique (Gagnon, Roy, & Roy, 2018). Celle-ci agit en effet de stimulant à la photosynthèse. Une hausse en concentration permettrait une meilleure absorption de l'azote et de l'eau par la végétation, stimulant ainsi son développement. En ce qui a trait au soya, un niveau de CO2 élevé permet un indice de surface foliaire maximale augmenté. Ainsi, lorsqu'abordé uniquement à partir de ce point de vue, la hausse des concentrations de CO2 dans l'atmosphère pourrait favoriser la pousse du soya, mais aussi des autres plantes nuisibles aux cultures. La présence plus importante de mauvaises herbes

pourrait ainsi limiter les bénéfices sur le soya (Pepin, 2020). De plus, comme les CC sont un enjeu complexe et global, il est actuellement impossible d'établir un lien entre de meilleurs taux de rendement et le niveau de CO2 atmosphérique à la hausse. Finalement, la gravité des conséquences des hausses de GES dans l'atmosphère influence trop fortement l'équilibre climatique pour permettre l'augmentation du rendement des cultures de soya (Ainsworth, Rogers, Vodkin, & Schurr, 2006).

3.4. Tempêtes et vents

Le GIEC prévoit la hausse de fréquence et d'intensité des événements climatiques impliquant de grands vents et des épisodes d'averses intenses (GIEC, 2019). En plus des possibles dommages aux installations agricoles, l'augmentation prévue de ces phénomènes météorologiques extrêmes accentuera les problèmes existants attribuables aux érosions éolienne et hydrique et fera surgir de nouveaux problèmes (OMAFRA, 2023).

3.4.1. Érosion éolienne

Le processus d'érosion par le vent débute par les particules de sol se détachant de la structure, aussi nommée déflation. Il existe trois modes de déplacement des particules de sol suite à la déflation : le transport de particules de sols très fines sur de longues distances (suspension), le déplacement par petits bonds successifs de particules moyennes à fines sur de courtes distances (saltation) et le roulement de grosses particules à la surface du sol (roulement) (OMAFRA, 2023). Les sols sont particulièrement vulnérables à l'érosion par le vent dans ces conditions environnementales :

- Le sol est ameubli, sec et granulé, donc facilement érodable
- La surface du sol est lisse et offre peu de résistance au vent
- La vitesse du vent et la durée de l'épisode venteux
- Absence d'obstacles brise-vent
- Le couvert végétal ou les résidus de cultures sont insuffisants pour offrir une protection efficace (Boulay & Gélard, 2013) (OMAFRA, 2023)

L'érosion éolienne touche essentiellement les terres sableuses et les terres noires. Bien que les terres argileuses du sud du Québec offrent une certaine protection face à l'érosion par le vent, les cultures de soya exploitées dans cette région ne sont pas immunisées à ses effets néfastes (IRDA, 2023). L'abrasion du sol est la principale conséquence de l'érosion éolienne et a de nombreuses répercussions sur les cultures de soya. L'abrasion se produit lorsque la couche supérieure du sol est détériorée, exposant un nouveau sol plus susceptible à l'érosion. Celle-ci peut endommager, voir détruire les cultures en exposant

les plantules ou les plants repiqués à l'abrasion, en enterrant les plants ou les semences et en exposant les semences (OMAFRA, 2023). Ensuite, la perte de matière organique appauvrit le sol et modifie la texture du sol. En plus des effets sur le taux de croissance et de rendement du soya, la capacité de rétention d'eau des sols, un facteur de vulnérabilité à l'érodabilité, peut être bouleversée. La préservation d'une bonne structure de sol est ainsi importante afin de maintenir la résistance des agrégats en surface afin de réduire les risques d'abrasion (OMAFRA, 2023). Évidemment, les interventions telles que le labour et le désherbage compromettent l'intégrité structurelle du sol, et du même coup augmentent sa vulnérabilité à l'érosion par le vent (Boulay & Gélard, 2013).

Ensuite, les particules et les débris déplacés par les vents peuvent avoir des effets sur l'intégrité physique des plants de soya en altérant l'état des feuilles et des tiges. Tout comme les précipitations intenses, le vent peut causer des blessures aux feuilles et aux tiges des plantes, augmentant le niveau de stress infligé et le risque de maladies, causant des pertes de rendement (IRIIS, 2023).

Finalement, l'érosion éolienne est une source de pollution et de contamination. En effet, le soulèvement de la poussière augmente le taux de particules en suspension dans l'air, pouvant nuire à la santé humaine et compromettre la sécurité du public. De plus, l'érosion favorise la dispersion des contaminants tels que les pesticides et les engrais sur le territoire (OMAFRA, 2023).

3.4.2. Érosion hydrique

Plus grandes sont l'intensité et la durée d'un épisode de pluie, plus grand est le risque d'érosion. Bien que les conséquences des averses brèves et violentes soient plus facilement observables, les averses de longue durée et de moindre intensité peuvent entraîner des pertes de sols toutes aussi significatives (OMAFRA, 2023). Les présentes conditions environnementales augmentent la vulnérabilité des cultures face à l'érosion hydrique :

- Volume et débits d'eau ruisselé élevés
- Pente de terrain augmentant la vitesse de l'eau de surface
- Le sol est ameubli, sec et granulé
- Présence insuffisante de couvert végétal et/ou de résidus de culture
- Travail de sol perturbant sa structure

(OMAFRA, 2023) (AAC, 2020)

Plusieurs types d'érosion hydrique sont susceptibles d'entraîner des répercussions sur le rendement des cultures de soya québécois. Le tableau 3.2 les détaille.

Tableau 3.2 Types d'érosion hydrique (Inspiré de : OMAFRA, 2023 & AAC, 2020)

Types d'érosion hydrique	Définition et conséquences
Érosion en nappe	Un écoulement uniforme ou non concentré de l'eau. Son caractère diffus le rend difficilement détectable, mais il peut causer des pertes de sol importantes.
Ravinement au champ	Une vitesse élevée du ruissellement de surface peut créer des canaux d'écoulement avec un pouvoir important d'érosion du sol.
Mauvais drainage des dépressions	Cause des zones de dépressions augmentant la compaction du sol. Le drainage incontrôlé de celles-ci peut entraîner des problèmes de ravinement.
Résurgence d'écoulement hypodermique	L'écoulement hypodermique suit la pente du champ. L'eau peut refaire surface au fond des dépressions, augmentant les risques de compactations et de drainage incontrôlé.
Érosion aux confluences	Un débit d'eau important aux confluences de fossés, rigoles et raies de curage cause de l'érosion. La différence d'élévation entre le tributaire et l'émissaire augmente les risques.
Ravinement de berges	La concentration de ruissellement et la différence d'élévation entre les champs et les cours d'eau rendent les berges hautement vulnérables à l'érosion hydrique.

Un grand nombre de conséquences résultent de l'érosion hydrique. En premier lieu, les pertes de sol arable peuvent nuire à la qualité, à la structure, à la stabilité et à la texture du sol. La détérioration de la structure et la modification de la texture du sol causé par le morcellement des agrégats et son déplacement détériorent la capacité de rétention d'eau du sol, le rendant plus vulnérable aux conditions extrêmes telles que la sécheresse. De plus, une structure de sol plus faible facilite le déplacement des semences et des plants causé par le passage de l'eau de surface (AAC, 2020). Finalement, l'érosion hydrique mène à l'appauvrissement du sol en éléments nutritifs. La levée, la croissance et le rendement des cultures sont ainsi perturbés (OMAFRA, 2023).

En second lieu, hors du champ, l'érosion hydrique est responsable de l'accumulation de sédiment en bas de pentes, pouvant empêcher ou retarder la germination et enterrer les jeunes pousses. De plus, les

sédiments qui atteignent des cours d'eau peuvent accélérer l'érosion des berges, ensabler les fossés de drainage et les cours d'eau et envaser les réservoirs. Finalement, en plus des conséquences de l'apport sédimentaire sur les cours d'eau, l'érosion hydrique est la principale responsable de leur contamination par les pesticides et les engrais. (OMAFRA, 2023)

4. EFFETS INDIRECTS DES CC SUR LES CULTURES DE SOYA QUÉBÉCOIS

4.1. Ennemis des cultures

Les cultures agricoles abritent et soutiennent une entomofaune constituée de diverses espèces animales, végétales, bactériennes, d'insectes et d'acariens. Certaines représentent des alliés pour les producteurs, que ce soit par la pollinisation ou les bénéfiques qu'ils apportent à la santé des sols. Cependant, quelques espèces sont considérées comme des ravageurs pouvant causer des pertes de rendement, justifiant ainsi l'intervention des producteurs (Gagnon, Roy, & Roy, 2018). Les CC forcent toutefois les producteurs à s'adapter aux conditions changeantes qui augmentent la vulnérabilité des cultures face aux espèces nuisibles. Ces conditions s'avèrent bénéfiques pour plusieurs espèces indigènes, mais ouvrent aussi la porte à des espèces exotiques. En effet, les CC, combinés à l'augmentation des échanges mondiaux, amplifient le risque d'établissement de nouvelles espèces potentiellement envahissantes au Québec (Ouranos, 2015). « Des modélisations de la répartition actuelle et future de 40 espèces végétales en fonction d'un ensemble de scénarios climatiques démontrent que le risque d'invasion biologique augmenterait au Québec au cours des prochaines décennies » (Ouranos, 2015, p. 23).

Il est ainsi important d'assurer une surveillance des ennemis des cultures et de leurs impacts actuels, mais aussi de prévoir leur implication future dans un optique d'adaptation. Au Québec, le Réseau d'avertissements phytosanitaires (RAP) surveille l'évolution des ennemis des cultures de la province (MAPAQ, 2023). De plus, le MAPAQ et le CRAAQ offrent une référence nommée IRIIS phytoprotection à des fins de suivi et de projection (IRIIS, 2023).

4.1.1. Insectes et invertébrés

Une augmentation de la pression exercée par les insectes ravageurs est attendue et plusieurs facteurs sont en cause (Moiroux & al., 2014). Premièrement, les CC favorisent le taux de croissance des populations d'insectes, leur nombre de générations par saison et entraînent la diminution des mortalités causées par les temps froids (Hudon-Voyer, 2021). En conséquence, la majorité des modélisations climatiques projettent un accroissement de l'aire de répartition des insectes ravageurs ainsi qu'une densité de population plus élevée (Moiroux & al., 2014). Ouranos (2015) prévoit d'ailleurs que le réchauffement des régions nordiques attirera dans la province de nouvelles espèces de ravageurs en provenance du sud. Deuxièmement, le réchauffement du climat affecte le synchronisme entre le cycle biologique de certains insectes et celui de leurs ennemis naturels (Moiroux & al., 2014). Ainsi, le déséquilibre des relations prédateurs/proies peut mener à la hausse de population de certaines espèces déjà présentes sur le territoire et ainsi amplifier les effets néfastes dont elles sont responsables (Brodeur et al., 2013).

Finalement, les insectes ont une capacité d'adaptation supérieure à la plupart des organismes vivants. En effet, la grande diversité d'espèces, leur période de reproduction très courtes, leur niveau élevé d'hétérozygotie, leur nombreuses sous-populations dispersées, leur forte adaptation à leur environnement immédiat et leur petite taille sont tous des facilitateurs de leur capacité d'adaptation aux CC (Gagnon, Roy, & Roy, 2018).

Ensuite, l'augmentation du CO₂ atmosphérique peut modifier le pouvoir de résistance d'une plante face à un insecte herbivore en modifiant sa composition chimique. Celui-ci contribue à diminuer la concentration d'inhibiteurs de cystéine protéinase dans la plante, agissant comme répulsif des insectes herbivores. Ainsi, les études ont démontré que de plus fortes concentrations en CO₂ augmentent le niveau de vulnérabilité du soya face au scarabée japonais, à la chrysomèle des racines du maïs et au puceron du soya, entre autres (Gagnon, Roy, & Roy, 2018). De plus, le CO₂ favorise la production de volatiles par les plantes. Ceux-ci ont comme fonction de permettre aux insectes herbivores de localiser les plantes. Une production trop élevée de volatiles pourrait accentuer les épidémies d'insectes (Gagnon, Roy, & Roy, 2018). Enfin, la diminution en azote des tissus de la plante résultant de l'augmentation du CO₂ atmosphérique pousse les insectes à consommer plus de feuillage pour pallier le déficit alimentaire qui en résulte (Gagnon, Roy, & Roy, 2018).

Conséquemment, 21 organismes représentant un potentiel de dommage moyen et élevé sur le soya québécois ont été pointés en 2022 (IRIIS phytoprotection, 2022). Parmi celles-ci, deux inquiètent davantage les experts, soit la punaise marbrée et le ver de l'épi (Mimee et al., 2014).

La punaise marbrée monopolise déjà énormément d'énergie et de ressources chez les cultivateurs au sud de la frontière et de plus en plus en Ontario. Bien qu'elle ne soit pas un enjeu actuel au Québec, les travaux de modélisation de Ouranos révèlent que la punaise marbrée pourra s'établir sur la grande majorité du territoire à l'horizon 2041-2070. Les changements de températures prévus dans la province seront désormais compatibles avec le cycle de reproduction de cette espèce exotique envahissante (EEE). Elle aura donc des effets directs et néfastes sur les cultures, mais également sur la biodiversité. Puisqu'il s'agit d'une espèce hautement compétitive, elle risque d'avoir un impact négatif sur les populations de punaises indigènes au Québec. (Mimee et al., 2014).

Le ver de l'épi du maïs se retrouve actuellement au Québec au cours de l'été, chaque saison menant à l'arrivée d'individus adultes en provenance des États-Unis. Les larves laissées sur une majorité du territoire ne survivent toutefois pas à l'hiver québécois, mettant fin au cycle de reproduction. Une hausse des

températures et des saisons estivales plus longues, en plus d'hivers plus doux, pourraient cependant permettre au ver de l'épi de compléter son cycle de reproduction. De plus, une arrivée plus hâtive des espèces adultes entraînera aussi des répercussions négatives en lien avec l'EEE. En effet, les chenilles de vers de l'épi sont la réelle nuisance à la culture du soya. Ainsi, l'arrivée devancée des individus adultes lors des saisons estivales résulte à un développement plus hâtif des larves en chenilles. Les plants de soya moins développés seront donc plus sensibles aux chenilles. Étant en lien direct avec la maturation des plants de soya les prédictions concernant cet insecte sont très complexes. La modification des calendriers de récoltes pourrait à elle seule suffire à limiter les conséquences des chenilles sur les jeunes pousses. (Mimee et al., 2014)

4.1.2. Mauvaises herbes

La lutte aux mauvaises herbes représente aussi un aspect important de la protection des cultures. Pour être efficace, le plan de gestion des mauvaises herbes se doit d'être bien adapté aux enjeux du milieu et de l'espèce cultivée (Saguez, 2020). En raison du contexte climatique en évolution, des changements dans la croissance et le comportement des mauvaises herbes déjà présentes sur le territoire sont observés. Les modélisations climatiques prédisent la poursuite de cette tendance dans les prochaines décennies (Ouranos, 2015). En date de 2022, IRIIS phytoprotection (2022) identifie 38 plantes représentant un potentiel de nuisance moyen et élevé contre le soya québécois.

Les cycles de vie variables et la grande diversité génétique des mauvaises herbes leur permettent de s'acclimater plus facilement aux variations climatiques que les espèces plutôt homogènes dans leur diversité génétique (Gagnon, Roy, & Roy, 2018). Ainsi, la compétitivité des mauvaises herbes par rapport aux cultures serait avantagée par les modifications dans le régime des températures et des précipitations et par l'augmentation de la concentration de la teneur en CO₂ atmosphérique. Finalement, le réchauffement du climat favorise la migration d'espèces provenant du sud (Ouranos, 2015). En plus des perturbations écosystémiques qui en résulte, la présence de nouvelles variétés de mauvaises herbes compromet l'efficacité des techniques de contrôle adaptées aux espèces indigènes (Pepin, 2020).

En plus de la migration des espèces, d'autres enjeux liés aux CC peuvent compromettre les techniques de contrôle. En effet, en plus de favoriser le développement des mauvaises herbes, la concentration de CO₂ atmosphérique plus élevée cause une réduction de l'efficacité des herbicides. Le CO₂ est en effet responsable de modifications physiologiques et physiques de plusieurs plantes, interférant ainsi avec l'activité chimique et la capacité d'absorption des herbicides. Ainsi, les techniques de contrôle et les

herbicides autrefois privilégiées pourraient s'avérer moins efficaces si les mauvaises herbes et leur réseau racinaire se développent plus rapidement et aisément (Pepin, 2020).

4.1.3. Agents pathogènes

Les champignons, bactéries, virus et nématodes font partie intégrante de la biodiversité des sols (Wallace & al., 2019). Toutefois, certains peuvent causer des infections chez les plantes et entraînent des pertes de rendement. L'humidité et la température représentent les deux facteurs bioclimatiques d'importance pour prédire la réponse biologique d'un agent pathogène. Ainsi, les températures plus douces en hiver, plus chaudes en été et les saisons de croissances plus longues permettent l'expansion de l'aire de répartition des agents pathogènes, en plus d'augmenter la fréquence et l'intensité des infections (Gagnon, Roy, & Roy, 2018). Ensuite, la hausse de concentration de CO₂ favorisant l'accroissement de la biomasse et de la densité de canopée des plantes affectant indirectement la prolifération des pathogènes en augmentant l'humidité relative du sol (Gagnon, Roy, & Roy, 2018). La fréquence et l'intensité des précipitations peuvent aussi jouer sur l'humidité du sol. Ainsi, les CC amènent des modifications au niveau de la croissance, du taux de reproduction et de la survie des agents pathogènes (Ouranos, 2015). Finalement, la sensibilité de la plante hôte, la distribution géographique de l'hôte ou de l'agent pathogène et l'efficacité des méthodes de lutte contre les agents pathogènes influencent les conséquences possibles sur la santé des cultures (Gagnon, Roy, & Roy, 2018).

En 2022, IRIIS phytprotection a dénombré onze espèces de champignons et deux bactéries risquant de causer des dommages sur les cultures de soya québécois. (IRIIS phytprotection, 2022). Parmi ceux-ci, la rouille du soya préoccupe davantage les scientifiques. Ce champignon est l'une des principales maladies du soya dans les régions tropicales et subtropicales de la planète. Les épidémies les plus intenses se produisent lors de saisons avec des températures élevées et avec beaucoup de précipitations (Gouvernement du Canada, 2012). Ces conditions météorologiques sont de plus en plus courantes au Québec, augmentant ainsi la vulnérabilité des cultures de soya face à cet EEE (Ouranos, 2015).

Ensuite, le NKS est aussi préoccupant. Il a été observé au Québec pour la première fois en 2013 et est maintenant considéré comme une EEE émergente. Les températures actuelles permettent un plus grand nombre de générations se reproduisant chaque saison (de trois à quatre) (Mimee et al., 2014). De plus, la hausse des températures et les saisons estivales plus longues imputables aux CC permettraient dans un futur proche le développement d'une ou deux générations supplémentaires partielles ou complètes dans plusieurs régions du Québec. Le sud de la province est d'ailleurs un endroit où le climat et la connectivité favorise le plus l'augmentation du nombre de générations par saison. En effet, dans le futur, cette région

pourrait voir apparaître une sixième génération incomplète; le NKS pourra y atteindre le stade infectieux (Saguez, 2020).

4.2. Biodiversité et services écologiques

En plus des impacts directs de l'agriculture sur les écosystèmes, les effets indirects des CC affectent aussi la biodiversité et des BSE qu'elle offre. Plusieurs études témoignent d'une diminution importante de la biodiversité à l'échelle mondiale et de ses répercussions possibles sur l'agriculture (Ouranos, 2015). En agriculture, les pollinisateurs ont une importance capitale. Les CC agissent toutefois sur leur capacité à survivre, à proliférer et à remplir leurs fonctions écologiques.

Les conditions météorologiques et climatiques jouent un rôle prépondérant dans le contrôle des populations de pollinisateurs. Ainsi, toute modification dans les conditions abiotiques du milieu risque de perturber le mode de vie des pollinisateurs dans un écosystème. Ainsi, les CC mettent grandement à risque les pollinisateurs et leur apport à l'agriculture. Il est estimé que plus de 40 % des espèces d'insectes à l'échelle planétaire seraient menacées d'extinction, et les pollinisateurs les plus touchés seraient les papillons, les abeilles et les guêpes (MAPAQ, 2022a).

La température, la luminosité, le vent, l'humidité et la pluie influencent tous le développement des populations de pollinisateurs (Chagnon, 2008). Conséquemment, les bouleversements attribuables aux CC présentés dans le chapitre 3 affectent l'équilibre favorisant la survie des pollinisateurs et son apport à l'agriculture. De plus, l'écologiste Charlotte Outhwaite du University College of London mentionne que l'interaction entre la perte d'habitat et les changements climatiques exerce un effet aggravant. En effet, les deux enjeux peuvent souvent être pires que s'ils agissaient seuls, puisque l'un peut aggraver l'impact de l'autre et vice versa. Les pertes de couverts végétaux peuvent ainsi exacerber les conséquences de la chaleur, et l'absence de milieux humides celles des déficits en eau, par exemple (Borenstein, 2022). Les CC influencent aussi indirectement l'environnement des pollinisateurs. Plus précisément, les modifications qu'ils apportent à la biologie florale et la phénologie de la floraison impactent le développement des populations d'insectes bénéfiques à l'agriculture et aux écosystèmes. Les interactions entre les plantes et leurs pollinisateurs sont donc perturbées (Ouranos, 2015).

En effet, les CC sont responsables de modifications dans la biologie de certaines espèces florales. En premier lieu, les précipitations, l'humidité du sol et l'ensoleillement influencent directement la quantité et la concentration de nectar produites par les fleurs, en plus d'agir sur la sécrétion du pollen. Les bouleversements apportés par les CC affectent donc la capacité de production de nectar des fleurs,

menant à des changements dans les diversités d'espèces et les taux de fréquentation qu'elles attirent. Ainsi, les systèmes de reproduction des plantes et le brassage génétique sont directement affectés et des modifications dans la diversité d'espèces florales sont observées (Chagnon, 2008). En second lieu, afin d'attirer les insectes, les espèces florales misent sur différentes stratégies, telles que leur structure, leur couleur et leur odeur. Cependant, certaines de leurs méthodes d'attractions sont compromises ou modifiées par les CC. En effet, les recherches démontrent que lorsque les températures et l'aridité augmentent, l'odeur des fleurs change et l'efficacité de dispersion des émissions volatiles est compromise, menant ainsi à des niveaux de pollinisation plus faibles (Jaworski, 2017). Conséquemment, en plus d'avoir un impact direct sur la capacité de survie des insectes pollinisateurs, les modifications apportées à la biologie des fleurs agissent sur les taux de pollinisation essentiels aux cultures de soya (Chagnon, 2008).

Ensuite, la synchronisation entre la phénologie de la floraison et les activités des pollinisateurs est essentielle afin que leur relation fonctionne (Chagnon, 2008). Toutefois, les effets des CC sur les saisons mettent à risque cet équilibre. En effet, les périodes de croissance des plantes et des fleurs se présentent plus tôt dans la saison, et les prévisions confirment le maintien de cette tendance dans le futur (Ouranos, 2015). Les espèces de pollinisateurs ne pouvant s'adapter assez rapidement voient donc leur population diminuer drastiquement et sont à risque d'extinction. Comme les plantes dépendent de la pollinisation, les conséquences ont un effet boule de neige (Chagnon, 2008).

5. DESCRIPTION DES STRATÉGIES CIBLÉES POUVANT AUGMENTER LA RÉSILIENCE AUX CC

Les précédents chapitres ont fait ressortir les enjeux augmentant la vulnérabilité et compromettant l'adaptation du soya face au CC. En fonction de ces enjeux, des stratégies pouvant potentiellement avoir des apports bénéfiques ont été retenues. Ainsi, ce chapitre a pour objectif de détailler chacune de ces stratégies, toujours en les mesurant aux réalités du Québec, pour ensuite les soumettre à une évaluation dans l'analyse multicritère. Les deux premières stratégies visent principalement l'implication des producteurs de soya, alors que les cinq suivantes font appel aux instances gouvernementales et à la communauté scientifique.

5.1. Se tourner vers l'agriculture biologique

L'agriculture biologique est un système holistique basé sur des principes de santé, d'écologie, d'équité et de précaution. Elle requiert une approche systémique et à long terme. Son but premier est d'assurer la durabilité des systèmes agricoles et alimentaires. Pour y arriver, *le Guide de production biologique des grandes cultures* (2019) recommande les lignes directrices suivantes pour une bonne planification sur la ferme :

- Travailler avec la nature, plutôt que contre elle.
- Rechercher et favoriser les synergies entre les composantes de la ferme et les pratiques.
- Identifier les causes des problèmes plutôt que les symptômes.
- Tenir compte autant des effets à court terme que de ceux à long terme résultant des pratiques agricoles.
- Considérer les effets à petite et à grande échelle.

(Wallace & al., 2019).

L'Office des normes générales du Canada régule les conditions nécessaires à la certification des systèmes de production biologique (SPB). Au Québec, le Conseil des appellations réservées et termes valorisants (CARTV) accrédite et supervise les certificateurs de produits agricoles et alimentaires biologiques. Voici les pratiques exigées auxquelles les producteurs doivent se soumettre pour recevoir la certification :

- Adopter des pratiques durables de gestion des sols.
- Utiliser des rotations de cultures bien planifiées.
- Conserver des registres décrivant toutes les activités de production.
- Enregistrer tous les mouvements de produits certifiés.

En contrepartie, voici les pratiques interdites dans les SPB :

- L'usage d'herbicides synthétiques, de pesticides toxiques persistants, et de fertilisants synthétiques à base de macronutriments;
- L'emploi d'organismes génétiquement modifiés (GN), incluant les semences et inoculants;
- L'épandage de boues d'épuration comme amendement du sol;
- L'utilisation de produits, matériaux ou procédés dans lesquels le transfert de nanoparticules est intentionnel.

Finalement, certaines pratiques sont permises, mais soumises à des restrictions :

- L'épandage d'engrais solides ou liquides doit respecter un délai de sécurité avant la récolte.
- Le labour doit être réduit au minimum et pratiqué avec prudence.
- Certains amendements du sol sont permis pour corriger des carences documentées.
- L'usage de semences non biologiques, non traitées et non-OGM peut être permis sous certaines conditions précises.

(Wallace & al., 2019)

Le soya est relativement facile à faire pousser en mode biologique puisqu'il nécessite une quantité modérée de nutriments si on le compare à d'autres cultures (Wallace & al., 2019). Au Québec, pour le soya, la différence de rendement entre les SPB et les systèmes de production conventionnelle (SPC) est minime. Les rendements sont même parfois presque identiques.

La demande en soya biologique est en hausse au Québec, principalement pour la production de tofu et de lait de soya. La province compte d'ailleurs parmi les deux plus grands producteurs de soya biologique au Canada, avec l'Ontario. Plusieurs normes s'appliquent pour recevoir l'accréditation. L'utilisation de semences GM peut être difficile à respecter puisque beaucoup de variétés de soya offertes sur le marché sont GM. Les cultivateurs doivent de plus prendre des mesures pour réduire les risques de contaminations au GM. Des aménagements de zones tampons entre les cultures GM et biologiques et une décontamination des équipements doivent être faits lorsque les deux types de cultures cohabitent. (Wallace & al., 2019).

5.2. Implantation de cultures de couverture intercalaire en début de saison

Afin d'assurer un rendement élevé et un bon niveau de résilience, les rotations de cultures complexes sont primordiales pour la production de soya. Celles-ci sont en effet essentielles au maintien de la santé des sols et des écosystèmes et au contrôle des ennemis des cultures. Le soya réagit d'ailleurs très bien à la rotation puisqu'il crée facilement des liens symbiotiques avec les bactéries et les champignons.

Plusieurs options sont possibles quant au choix des espèces à insérer dans la rotation et aux périodes de croissance, tant dans un objectif de récolte que de couverture de sol. Les stratégies de gestion des sols dites conventionnelles sont d'ailleurs éprouvées et largement utilisées dans l'agriculture moderne. Toutefois, de nouvelles méthodes pouvant augmenter la résilience du soya et la santé des agroécosystèmes sont présentement à l'essai. (Vanasse & al., 2022)

L'implantation de cultures de couverture intercalaire (CCI) en début de saison représente une pratique prometteuse pouvant s'avérer un ajout bénéfique au plan de gestion de sol des agriculteurs de soya. La pratique consiste à planter des espèces qui pourraient être bénéfiques pour les plantes et le sol pendant la période de croissance (Vanasse & al., 2022). Le but principal de cette pratique est d'employer la portion souterraine de plantes couvre-sols afin de combler les étendues de terre vacantes. Elle permet ainsi de maximiser l'utilisation des ressources, telles que l'eau, les éléments nutritifs du sol et les rayons du soleil (Cadieux, 2022). Elle permet ainsi d'augmenter la biodiversité du sol et sa colonisation par des racines. Si le sol n'est pas travaillé à l'automne, la culture de couverture protège le sol en hiver et au printemps. Au Québec, plusieurs espèces de légumineuses vivaces telles que le trèfle peuvent être utilisées. Le seigle d'automne, le ray-grass annuel et la vesce velue sont aussi des options possibles. Il est cependant important de préciser que cette pratique ne doit pas agir seule dans le plan de rotations des cultures, mais bien à titre de complément (Vanasse & al., 2022).

5.3. Miser sur les technologies génétiques comme outil de sélection des variétés

Les facteurs environnementaux tels que la température, le nombre d'heures d'ensoleillement, les maladies, les stress hydriques et éoliens, le calendrier saisonnier et la qualité des sols agissent tous sur le taux de rendement du soya et son niveau de vulnérabilité (OMAFRA, 2017) (Bulletin des agriculteurs, 2022). En fonction de l'ensemble de ces facteurs, une sélection réfléchie doit être prise par les agriculteurs quant à la variété des espèces et des cultivars à planter. Le choix d'une sélection bien adaptée à son milieu permet de bonnes récoltes, en plus de favoriser la résilience des cultures. Toutefois, en contexte de CC, le domaine agricole se doit de rester proactif dans la recherche de solutions d'adaptation réactives et anticipatives (Ouranos, 2015). Pour se faire, les technologies génétiques telles que la sélection assistée par marqueurs, la prédiction génomique et la modification de génomes servent d'outils efficaces afin d'avancer les programmes d'amélioration génétique en identifiant les plantes ayant un potentiel élevé (CEROM, 2021).

Soygen (2022) reconnaît trois défis à relever afin de développer des variétés de soya qui favoriseront sa résilience au contexte climatique actuel et futur. Ceux-ci consistent à développer des variétés atteignant

la maturité et produisant des semences en un temps record, à rendre ces variétés plus résistantes aux ravageurs et aux maladies et à identifier les principaux obstacles à l'établissement de cultures de soya dans les régions plus nordiques du Québec (SoyGen, 2022). Le projet a plus récemment permis d'identifier les allèles de maturité présents dans environ 300 lignées canadiennes. L'information recueillie représente une opportunité d'effectuer des sélections informées de lignées avec une meilleure adaptation pour les régions nordiques. De plus, les études effectuées par le CEROM démontrent l'élimination possible des plants présentant des locis défavorables dès la deuxième génération. Ce tri rapide permet de prioriser seulement les lignées prometteuses au champ et assure une adaptation constante (CEROM, 2021).

5.4. Mettre en place des mesures incitatives et restrictives

Bien que l'enjeu des CC sur l'agriculture fasse beaucoup parler, les politiques et programmes récents en matière d'agriculture au Canada ont tendance à mettre l'accent sur la croissance économique plutôt que sur l'environnement et les considérations de développement rural et social. Les ressources dédiées aux incitations agroenvironnementales au Canada restent faibles. En fait, la recherche suggère que les États-Unis et l'Europe dépensent beaucoup plus d'argent que le Canada dans les programmes agroenvironnementaux en pourcentage des revenus agricoles (Équiterre, 2022b). De plus, les programmes d'assurance récolte incitent à convertir des terres marginales, des milieux humides, des prairies et des zones arborées, etc. en terres cultivées. Il y a donc des programmes actuels qui encouragent par défaut l'adoption de pratiques néfastes pour l'environnement et le climat (Équiterre, 2022b). Toutefois, au contraire, les gouvernements devraient encourager les productions agricoles à réduire leur impact environnemental, soit sur une base volontaire (incitatifs) et obligatoire (réglementation). De ce fait, les exploitations adoptant des pratiques durables devraient être récompensées, et celles qui souhaitent continuer dans la même voie devraient devoir compenser les torts causés. Ainsi, la présente section détaille deux outils axés sur des mesures incitatives et restrictives, soit l'adoption du Marché du carbone en agriculture (MCA) et la mise en place d'un programme de valorisation monétaire des BSE. C'est d'ailleurs ces deux stratégies qui sont évaluées dans l'analyse multicritère.

5.4.1. Adopter un MCA

Les statistiques présentées dans la section 2.5 indiquent qu'en 2019, 9,2 % des émissions de GES du secteur énergétique au Québec étaient attribuables aux activités agricoles (Whitmore & Pineau, 2022). Afin de mitiger ces impacts, et ainsi augmenter son niveau de résilience, le domaine agricole se doit de réduire ses niveaux d'émissions de GES. Pour y arriver, les gouvernements en place doivent encourager les exploitants à contribuer. L'adoption d'un marché du carbone réglementé applicable aux exploitations

agricoles offre une solution marchande au défi de la lutte contre les CC (Équiterre, 2022b). Au Québec, le Système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de gaz à effet de serre (SPEDE) est déjà en place, mais ne s'adresse qu'aux distributeurs d'énergies fossiles et aux grands émetteurs de GES (MELCC, 2023c). Seule la production porcine est dotée d'un protocole permettant de reconnaître les efforts de réduction des émissions de CO₂ (Producteurs de grains du Québec, 2019). Malgré qu'aucun marché réglementé spécifique à l'agriculture ne soit en place, les exploitants ont l'option de volontairement participer au SPEDE et d'en recevoir les bénéfices. La figure 5.1 illustre de façon simplifiée de quelle façon le milieu agricole s'implique dans le marché du carbone actuel au Québec, soit en étant promoteur de projets de compensation carbone. Les entreprises agricoles peuvent ainsi vendre des crédits carbone compensatoires aux plus grands émetteurs de GES (CERFO, 2022).

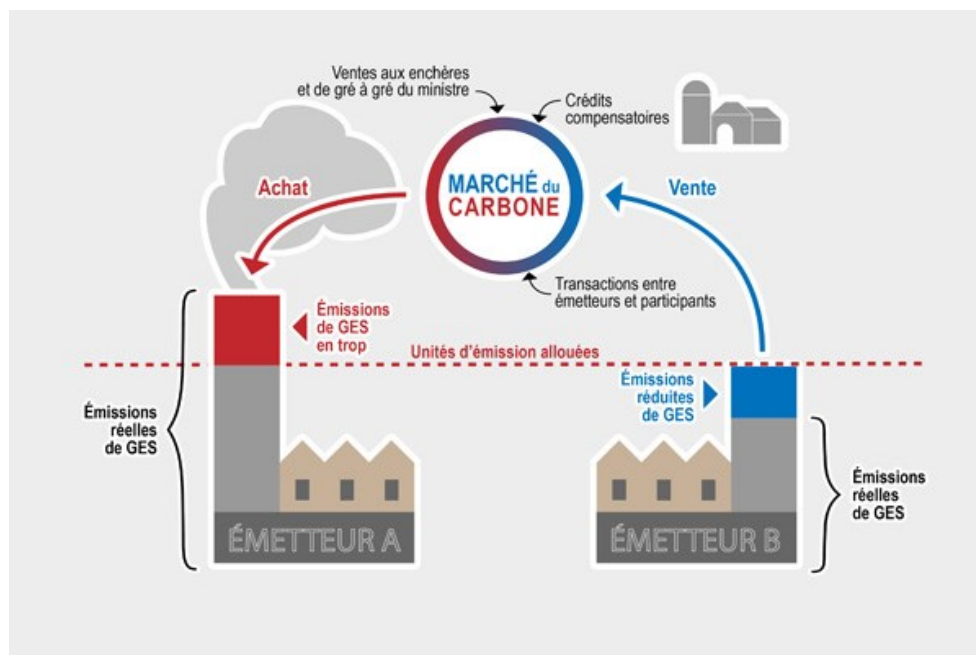


Figure 5.1 Schéma simplifié du marché réglementé du carbone (tiré de : CERFO, 2022, p. 3)

Ainsi, la présente stratégie d'instaurer un MCA vise la mise en place d'un protocole standardisé et reconnu par les instances compétentes en regard de la SPEDE qui permettra aux entreprises spécialisées, telles que les producteurs de soya, de faire reconnaître leur contribution à la réduction des GES et les incitera à adopter les pratiques pouvant en réduire davantage.

« Une approche de transition serait requise pour l'accompagnement des producteurs dans une stratégie à long terme qui favorise l'acquisition de nouvelles technologies de production, l'adoption de nouvelles techniques et la réduction du bilan des émissions de GES pour l'ensemble du secteur » (Producteurs de grains du Québec, 2019, p. 12).

Trois règlements sont présentement élaborés par le gouvernement du Québec :

1. Règlement visant la séquestration du carbone par le boisement ou le reboisement sur les terres privées
2. Règlement sur la biométhanisation des lisiers
3. Règlement sur l'amélioration des pratiques d'épandage des fertilisants agricoles

Toutefois, la mise en place d'un marché réglementé en agriculture devra aussi inclure d'autres secteurs d'émissions et/ou de compensation importants, tels que la gestion des sols, l'utilisation des pesticides, la gestion de l'énergie et la gestion des milieux naturels. Des protocoles et règlements devront ainsi être élaborés pour l'ensemble de ces enjeux. La réduction des émissions de GES liées au secteur agricole aura ainsi des effets positifs sur la résilience des cultures de soya au Québec (Lepage et al., 2012a).

5.4.2. Mettre en place un Programme de valorisation monétaire des BSE

Les différents services écologiques rendus par les écosystèmes indispensables à l'agriculture doivent être protégés (CAC, 2022). Toutefois, tel que décrit dans le chapitre 2, les cultures de soya affectent la santé des écosystèmes. Bien que le capitalisme soit souvent pointé du doigt par les environnementalistes, il peut s'avérer une bonne stratégie d'utiliser le système afin de conserver les BSE rendus par les écosystèmes. Selon la professeure au Département d'économique de l'École de gestion de l'UDS, Jie He, la plupart des processus décisionnels économiques ont tendance à ignorer la contribution de la nature, et plus précisément la valeur de l'environnement. Elle souligne ainsi que « la gratuité des services rendus par la nature cause souvent un problème de surutilisation dans notre société » (Dubois, 2017). Afin de remédier à cette problématique, l'adoption d'une approche valorisant les BSE rendus par les écosystèmes s'avère primordiale. En effet, la valorisation monétaire de la nature, en plus d'améliorer le processus décisionnel des consommateurs et des firmes, permet un usage plus stratégique des ressources publiques. Elle est premièrement utile afin d'évaluer le coût d'usage des services écosystémiques et, en conséquence, pour développer différents outils tels que des taxes et des standards d'exploitation afin d'en contrôler l'emploi. Ensuite, la fluctuation des prix à travers le temps aide à déterminer les priorités de conservation et de diriger des fonds vers la protection de certains écosystèmes spécifiques (Vivien, 2022).

Différents programmes de production et d'amélioration des BSE grâce à différents instruments fondés sur le marché existent déjà aux États-Unis, en Europe et au Canada. Par exemple, les programmes américains *Conservation Reserve*, *Wetland Reserve* et *Conservation Stewardship* encouragent les agriculteurs à faire

don de certaines terres à des organismes de bienfaisance accrédités, avec comme objectif de protéger le patrimoine environnemental (Baril-Gilbert, 2013). D'autres, tel que le programme canadien *Alternative Land Use Services* (ALUS) proposent des incitations annuelles aux agriculteurs afin qu'ils mettent en œuvre et maintiennent des activités pouvant mener à la production de BSE. Ces activités ciblent les opportunités environnementales locales et incluent le rétablissement de zones humides, le reboisement, la plantation de brise-vent, l'installation de zones tampons riveraines, la gestion de systèmes de drainage durables, la création d'habitats pour les pollinisateurs et elles ont comme objectif de protéger les terres sensibles (ALUS, 2023). Toutefois, bien qu'une valeur théorique soit attribuée aux milieux naturels et aux BSE, aucun de ces programmes n'est basé sur un système de valorisation monétaire précis.

De ce fait, l'attribution d'une valeur monétaire à la nature comme stratégie de protection sera évaluée. Ce concept économique propose de chiffrer la valeur monétaire des écosystèmes et des services qu'ils nous rendent. Les entreprises agricoles, y compris celles du soya, devraient ainsi déboursier en fonction de leur impact sur les différents écosystèmes, et ce selon les prix du marché. Des incitations annuelles pourraient aussi être accordées aux agriculteurs qui se démarquent par le respect des BSE. Le coût de production et des profits espérés tiendraient ainsi compte de la valeur des services écosystémiques (Dubois, 2017).

5.5. Élargir l'accès au réseau électrique triphasé

Tel que décrits à la section 2.5., les méfaits liés aux besoins énergétiques des exploitations agricoles, dont celles cultivant le soya, sont considérables. Les émissions de GES causées par l'utilisation d'énergies fossiles sont plus particulièrement préoccupantes (Whitmore & Pineau, 2022). Dans plusieurs secteurs, tels que les industries et le transport, la transition vers des sources d'énergie considérées plus durables s'opère. Dans ce sens, et comme le Québec bénéficie d'une source importante d'hydroélectricité, la substitution des machineries et équipements agricoles à essence au profit de matériels électriques est une stratégie de réduction d'émissions de GES envisagée. Cet effort représente une façon d'atténuer les CC, augmentant ainsi potentiellement le niveau de résilience des cultures de soya québécois (MELCC, 2023d). Toutefois, la plupart des équipements agricoles requièrent une puissance d'énergie accrue (UPA, 2019). Par exemple, suite à sa récolte, les grains de soya doivent être asséchés avant son entreposage, et ce à l'aide d'un séchoir à grain (OMAFRA, 2017). Au Québec, 80 % des séchoirs à grains sont alimentés au propane. Les émissions de GES liées au cycle de vie du propane sont environ 45 fois supérieures à celles générées par l'hydroélectricité. Ainsi, malgré l'impact environnemental qu'implique la modernisation des

équipements de séchage, son potentiel de réduction d'émissions à long terme demeure durable (MELCC, 2022c).

Cependant, seuls les réseaux triphasés peuvent offrir la puissance nécessaire à l'alimentation électrique des équipements agricoles tels que les séchoirs à grains (UPA, 2019). Malheureusement, en 2022, près de 60 % du réseau de distribution électrique était monophasé, et cette proportion est plus élevée encore en milieu rural, poussant ainsi les agriculteurs à avoir davantage recours aux énergies fossiles (Gouvernement du Québec, 2022b). Il est ainsi impératif pour la société québécoise d'étendre l'offre des réseaux d'alimentation triphasés sur un plus grand territoire, et donc à un plus grand nombre d'utilisateurs. Le *Plan pour une économie verte 2030* mentionne le désir d'étendre les réseaux, particulièrement en région rurale, sans toutefois établir des cibles à atteindre (Gouvernement du Québec, 2020). Toutefois, lorsqu'une demande d'alimentation nécessite le prolongement ou la modification d'une ligne de distribution, le client pourrait avoir à payer le coût des travaux (Hydro-Québec, 2019). Le Programme d'extension du réseau triphasé d'accès au réseau triphasé du gouvernement québécois vient pallier cette possibilité. Celui-ci a comme objectifs de fournir un accès au réseau électrique triphasé aux entreprises agricoles et agroalimentaires situées dans les milieux non desservis, en plus de réduire les émissions de GES et la consommation d'énergie fossile des entreprises agricoles et agroalimentaires situées en zone rurale (MERN, 2020).

5.6. Effectuer une migration des cultures de soya vers le nord

En contexte de CC et de dérèglements saisonniers, les conditions climatiques dans le Québec nordique sont de plus en plus propices à l'agriculture. En effet, une hausse des températures globales et l'allongement des saisons estivales constituent de nouvelles opportunités (Ouranos, 2015). Historiquement cultivées principalement à des fins de subsistances, les terres agricoles septentrionales représentent maintenant une ressource pouvant potentiellement augmenter la résilience du soya face aux CC. Actuellement, ce sont plus ou moins 200 000 hectares de terres nordiques qui servent à l'agriculture, soit environ 14 %. Les principales régions de culture sont le Saguenay-Lac-Saint-Jean, la Côte-Nord et l'Abitibi-Témiscamingue. L'Abitibi-Témiscamingue représente d'ailleurs la plus grande réserve de sols arables de la province. Finalement, les fermes bovines et de fruits dominent ces territoires. Les exploitations de grains suivent de près avec des augmentations annuelles constantes. La Côte-Nord demeure toutefois moins populaire pour les producteurs de soya puisque les températures et le calendrier des saisons y sont encore à ce jour peu propices (Pierre, 2015).

La présente stratégie vise donc à faire migrer les cultures de soya dans les régions nordiques du Québec, et ce afin de s'adapter aux conséquences des CC. La stratégie présente ainsi le potentiel d'augmenter le niveau de résilience des productions de soya de la province.

6. ÉLABORATION DE L'OUTIL D'ANALYSE

6.1. Critères d'évaluation

La sélection des critères d'évaluation est faite en fonction des précédents chapitres sur les impacts du soya sur l'environnement et les effets des CC sur sa culture (chapitres 2, 3 et 4). Les critères sélectionnés représentent tous un ou des enjeux qui nécessitent d'être traité afin d'augmenter la résilience du soya face aux CC. L'évaluation des pratiques et stratégies en fonction de ces critères permettront donc de déterminer l'importance de leur contribution à la résilience du soya. Le Tableau 6.1 énumère les critères et leur description.

Tableau 6.1 Description des critères d'évaluation

Critères d'évaluation : « Est-ce que la stratégie ... ? »	Descriptions
1. Améliore la santé des sols	Améliore la structure, la texture, le drainage et l'aération du sol Apporte de la matière organique Favorise l'activité des organismes vivants dans les sols Contribue aux bons niveaux d'éléments nutritifs.
2. Favorise la résistance aux événements météorologiques extrêmes	Réduit la vulnérabilité du soya face aux températures supérieures à 30 °C Atténue les risques d'inondation Diminue la vulnérabilité face aux déficits en eau et aux sécheresses contrôle de l'érosion Augmente la résistance aux tempêtes (érosion hydrique et éolienne, intégrité structurelle des plants) Permet une diminution des coûts liés aux événements climatiques
3. Prend avantage du réchauffement du climat et des dérèglements des saisons	Permet la mise à profit des saisons estivales plus longues Favorise l'adaptation aux saisons hivernales plus courtes, moins froides et au dégel hâtif des sols
4. Préserve ou enrichit la biodiversité et les services écologiques	Limite les pertes d'habitats naturels Réduit la fragmentation des espaces naturels Agit donc contre l'extinction des espèces bénéfiques à l'agriculture Atténue donc les risques liés aux contaminants sur les espèces aquatiques Favorise la biodiversité
5. Réduit les vulnérabilités liées aux espèces nuisibles	Contribue aux connaissances sur les ennemis des cultures Offre un meilleur niveau de protection Favorise l'adaptation anticipative Assure un meilleur suivi des champs Donne davantage d'outils d'adaptation réactive efficace et durable Permet une diminution des coûts liés à la gestion des espèces nuisibles
6. Atténue les sources de polluants et les impacts environnementaux attribuables à l'agriculture	Limite la pollution des eaux de surface et souterraines Diminue les quantités d'émissions de GES et autres polluants dans l'air Augmente la capacité de séquestration des GES Réduit les besoins énergétiques des exploitations de soya
7. Offre des opportunités d'adaptation intéressantes et réalisables	Contribue au bon rendement des exploitations de soya Représente une opportunité avantageuse pour les cultivateurs, entreprises et gouvernements Constitue une stratégie réalisable à court/moyen terme Est validée par la présence de documentation de recherches et d'expériences terrain Est acceptée socialement

6.2. Échelle de cotation

Afin de déterminer la performance de chaque pratiques et stratégies face aux critères d'évaluation, une échelle de cotation est nécessaire. Celle-ci s'étend de 2 à -2.

Tableau 6.2 Échelle de cotation

Cotes attribuées	Définitions
2	La pratique ou stratégie a un effet fort positif sur le critère
1	La pratique ou stratégie a un effet modérément positif sur le critère
0	La pratique ou stratégie n'a aucun effet sur le critère
-1	La pratique ou stratégie a un effet modérément négatif sur le critère
-2	La pratique ou stratégie a un effet fort négatif sur le critère

6.3. Pondération des critères

Des pondérations sont attribuées à chaque critère afin d'établir leur niveau d'importance à l'augmentation de la résilience des cultures de soya québécois face aux CC. L'échelle de pondération se situe entre 1 et 2. La valeur 0 est non-existante puisque tous les critères sélectionnés ont une importance.

Tableau 6.3 Pondération des critères

Pondération	Définitions
2	Le critère représente un niveau d'importance très élevé à l'augmentation de la résilience
1	Le critère représente un niveau d'importance élevé à l'augmentation de la résilience

6.3.1. Améliore la santé des sols

Pondération accordée : 2

La vie du sol joue un rôle important dans les processus biologiques qui bonifient le sol pour en faire une source de rendement élevé (Wallace & al., 2019). Il est à la base d'un bon niveau de résilience car sa bonne santé contribue à rendre meilleures la productivité, la fertilité et la biodiversité. Elle permet donc de bâtir des fermes prospères et résilientes ainsi que des agroécosystèmes pouvant être productifs à long terme. Des sols en santé réduisent considérablement la vulnérabilité des cultures de soya québécois face aux CC

et à ses conséquences, en plus d'offrir des opportunités d'atténuation et de stockage des GES (Équiterre, 2022a).

L'amélioration de la santé du sol est l'une des priorités qui requière une intervention en continu afin d'obtenir des résultats à long terme (Producteurs de grains, 2019). Elle exige une approche intégrée et systémique qui tient compte de tous les aspects de la production agricole et de l'agroécosystème (Équiterre, 2022a). Vu son importance sur la résilience du soya, tant sur les capacités d'adaptation que d'atténuation, une pondération de 2 est accordée à ce critère.

6.3.2. Favorise la résistance aux événements météorologiques extrêmes

Pondération accordée : 1

En raison des hausses de températures extrêmes et de l'évolution des précipitations, les sols québécois sont de plus en plus à risque de sécheresse. Le critère évalue donc si la pratique contribue à augmenter la résilience du soya face à la hausse des températures supérieures à 30 °C, déficits en eau et sécheresses, vents violents et fortes précipitations. Ces enjeux sont responsables de pertes de rendement importantes, mais ne surviennent que ponctuellement (Ouranos, 2015). Ce critère se concentre principalement sur l'adaptation anticipative et réactive. Une pondération de 1 lui est accordée.

6.3.3. Prend avantage du réchauffement du climat et des dérèglements des saisons

Pondération accordée : 1

L'augmentation des températures quotidiennes et les saisons de croissance plus longues pourraient accroître le potentiel agronomique du soya (Lepage et al., 2012a). Le critère évalue donc si la pratique prend avantage de ces changements, tout en limitant les possibles conséquences. Ce critère se concentre principalement sur l'adaptation et la capacité d'adaptation. Une pondération de 1 lui est accordée.

6.3.4. Préserve ou enrichit la biodiversité et les services écologiques

Pondération accordée : 2

Selon le GIEC, « la protection et la restauration des écosystèmes riches en carbone constituent la priorité absolue dans une perspective conjointe d'atténuation du changement climatique et de protection de la biodiversité » (GIEC, 2022). La protection, restauration, gestion et création des milieux naturels sont ainsi à prioriser afin de faire bénéficier la biodiversité. Un bon résultat dans ce critère mène à une réduction de la vulnérabilité des systèmes agricoles, à l'atténuation des CC et à des opportunités d'adaptation

intéressantes. Il obtient donc une pondération de 2 en raison de sa grande importance et bénéfices possibles.

6.3.5. Réduit les vulnérabilités liées aux espèces nuisibles

Pondération accordée : 1

La hausse des températures et le dérèglement des saisons augmentent la vulnérabilité des cultures de soya face aux espèces nuisibles (Mimee et al., 2014). Le présent critère évalue si la pratique permet de réduire la vulnérabilité des cultures du soya face aux insectes et invertébrés, aux mauvaises herbes et aux maladies parasitaires. L'évaluation prendra en compte l'adaptation anticipative et réactive. Il s'appuie principalement sur les pratiques de gestion intégrée des ennemis des cultures, déjà largement utilisées dans l'agriculture à grande échelle moderne. Ce mode de gestion, illustré en Figure 6.1, est une méthode décisionnelle mettant en œuvre l'ensemble des techniques nécessaires afin de réduire les populations d'organismes nuisibles (MAPAQ, 2011). Les stratégies augmentant l'efficacité de la gestion intégrée des ennemis des cultures obtiendront donc de bons résultats. Une pondération de 1 est accordée.

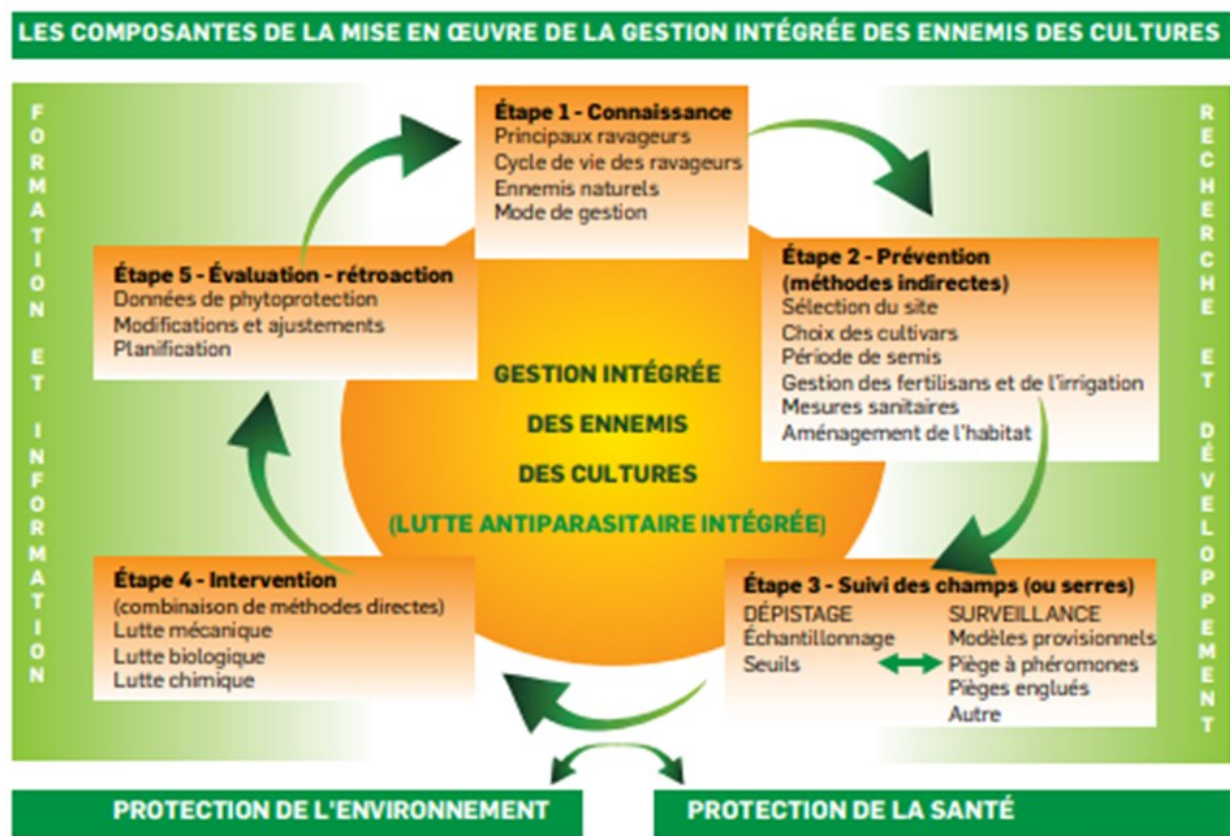


Figure 6.1 Étapes de la gestion intégrée des ennemis des cultures (tiré de : MAPAQ, 2022a)

6.3.6. Atténue les sources de polluants et les impacts environnementaux attribuables à l'agriculture

Pondération accordée : 1

Tel que détaillé dans le chapitre 2, les cultures de soya au Québec ont des répercussions sur différentes sphères environnementales, comme sur la qualité de l'eau et de l'air. L'atténuation des sources de polluants permet de réduire les conséquences directes sur les écosystèmes bénéfiques à l'agriculture, mais aussi de ralentir le processus des CC, augmentant du même coup le niveau de résilience du soya. Une pondération de 1 est accordée à ce critère.

6.3.7. Offre des opportunités d'adaptation intéressantes et réalisables

Pondération accordée : 2

Il est impératif que l'adoption des stratégies soit avantageuse pour les acteurs du soya. Elle se doit aussi d'être réalisable à court/moyen terme. Sans ce critère, il est impossible de mettre en place les stratégies pouvant contribuer à la résilience du soya. De ce fait, une pondération de 2 est accordée à ce critère.

7. ANALYSE MULTICRITÈRE

Ce chapitre présente en premier lieu les résultats de l'analyse multicritère, sous forme d'un tableau.

L'interprétation des résultats suit dans la section subséquente.

7.1. Tableau multicritère

Tableau 7.1 Analyse multicritère

Critères d'évaluation	Pondération des critères	Stratégies évaluées		
		Se tourner vers l'agriculture biologique	Planter des cultures de couverture intercalaires en début de saison	Miser sur les technologies génétiques comme outil de sélection
1. Améliore la santé des sols	2	4	4	0
2. Favorise la résistance aux événements météorologiques extrêmes	1	2	2	2
3. Prend avantage du réchauffement du climat et des dérèglements des saisons	1	1	1	2
4. Préserve ou enrichit la biodiversité et les services écologiques	2	2	4	2
5. Réduit les vulnérabilités liées aux espèces nuisibles	1	1	1	2
6. Atténue les sources de polluants et les impacts environnementaux attribuables à l'agriculture	1	2	1	1
7. Offre des opportunités d'adaptation intéressantes et réalisables	2	4	4	2
Résultats		16	17	11

Tableau 7.2 Analyse multicritère (suite)

Critères d'évaluation	Pondération des critères	Stratégies évaluées			
		Adopter un MCA	Mettre en place un Programme de valorisation monétaire	Élargir l'accès au réseau électrique triphasé	Effectuer une migration des cultures de soya vers les régions nordiques
1. Améliore la santé des sols	2	2	4	0	-4
2. Favorise la résistance aux événements météorologiques extrêmes	1	2	1	0	0
3. Prend avantage du réchauffement du climat et des dérèglements des saisons	1	1	0	0	1
4. Préserve ou enrichit la biodiversité et les services écologiques	2	4	4	4	-4
5. Réduit les vulnérabilités liées aux espèces nuisibles	1	1	1	1	1
6. Atténue les sources de polluants et les impacts environnementaux attribuables à l'agriculture	1	2	1	2	-2
7. Offre des opportunités d'adaptation intéressantes et réalisables	2	1	2	2	2
Résultats		13	13	9	-6

7.2. Interprétation des résultats

Pour donner suite aux résultats de l'analyse multicritère, cette section fait ressortir les points positifs et négatifs qui justifient les cotes attribuées aux stratégies pour chacun des critères d'évaluation. Leur interprétation est basée sur les concepts d'adaptation, d'atténuation, de durabilité et de vulnérabilité, et tient compte de la portée temporelle (court, moyen et long terme). Les chapitres 2, 3 et 4 agissent à titre de référence. Il est finalement important de noter que certaines stratégies ont des effets similaires sur les différents critères. Il est donc normal que des ressemblances soient observées dans leurs interprétations.

7.2.1. Se tourner vers l'agriculture biologique

Critère 1 : Améliore la santé des sols

- Des rotations de cultures bien planifiées, des pratiques durables de gestion des sols et un labour réduit, tous adoptés dans les SPB, contribuent à améliorer la structure, la texture, le drainage et l'aération du sol (Gagné & al., 2017).
- L'ensemble des pratiques augmente la biomasse, l'épaisseur de la couche arable et mène à une activité biologique du sol significativement plus élevée (Boutin et al., 2011).
- Une plus grande rétention de la matière organique contribue aux bons niveaux d'éléments nutritifs. Les sols des SPB présentent donc des concentrations plus élevées des principaux éléments chimiques (carbone, azote, et autres), en plus d'afficher un pH et une capacité d'échange cationique plus élevés (Boutin et al., 2011).

Puisque la présente stratégie a un effet fort positif sur l'ensemble des sous-critères, elle se voit attribuer une cote de 2 pour ce critère.

Critère 2 : Favorise la résistance aux événements météorologiques extrêmes

- Les sols sous régie biologique ont de meilleures propriétés physiques (densité, porosité, contenu en eau et teneur en matière humique). Une meilleure capacité de rétention d'eau réduit donc la vulnérabilité du soya face aux températures supérieures à 30 °C, à l'insolation et aux déficits en eau (Boutin et al., 2011).
- Les sols en SPB sont plus perméables et peuvent absorber une plus grande quantité d'eau avant d'être saturés. Ils contribuent donc à atténuer les risques d'inondation et ses conséquences sur les récoltes (Boutin et al., 2011).

- Une meilleure structure et composition des sols augmentent leur capacité de rétention d'eau et permet des réserves plus importantes. Le soya est ainsi moins vulnérable aux sécheresses (Boutin et al., 2011).
- Les normes encadrant les SPB du Québec exigent des cultivateurs qu'ils recourent à des pratiques culturales visant la prévention de l'érosion des sols. Les recherches démontrent d'ailleurs que les pratiques liées aux SPB offrent un fort potentiel de contrôle de l'érosion (Boutin et al., 2011).
- Pour les mêmes raisons, les SPB permettent d'augmenter la résistance des cultures de soya face aux tempêtes (érosion hydrique et éolienne, intégrité structurelle des plants) (Boutin et al., 2011).
- Le niveau de vulnérabilité moindre des SPB face aux événements climatiques extrêmes limite les pertes de rendement, en plus de réduire les dépenses liées aux méthodes de protection des cultures. Ceux-ci permettent donc une diminution des coûts reliés aux événements climatiques (Boutin et al., 2011).

Puisque la présente stratégie a un effet fort positif sur l'ensemble des sous-critères, elle se voit attribuer une cote de 2 pour ce critère.

Critère 3 : Prend avantage du réchauffement du climat et des dérèglements des saisons

- Les meilleures propriétés physiques des sols en SPB peuvent favoriser leur fertilité sur des saisons plus longues. Ils pourraient ainsi permettre une double récolte, ou limiter les interventions nécessaires afin de remettre le sol sur pied pour la saison suivante. Les SPB contribuent donc aux opportunités de mise à profit des saisons estivales plus longues s'offrant aux agriculteurs (Gagné & al., 2017).
- De bonnes propriétés physiques de sols contribuent à offrir une meilleure protection face aux périodes sans gel de plus en plus longues et à la présence écourtée du couvert enneigé (Gagné & al., 2017). Toutefois, aucune recherche ne démontre que les SPB favorisent l'endurcissement des plants de soya aux périodes de froid occasionnel. Les SPB offrent donc un niveau d'adaptation raisonnable aux saisons hivernales plus courtes et moins froides.

Puisque la présente stratégie a un effet fort positif sur le premier sous critères et modérément positif sur le second, elle se voit attribuer une cote de 1 pour ce critère.

Critère 4 : Préserve ou enrichit la biodiversité et les services écologiques

- Bien que les SPB visent à travailler en synergie avec les composantes naturelles, aucune exigence ou restriction ne s'applique à la protection des milieux naturels. Son adoption n'a donc aucune incidence directe sur les pertes d'habitats naturels (Wallace & al., 2019).
- Dans le même ordre d'idée, bien que l'idéologie des SPB vise la synergie des écosystèmes, aucune exigence ou restriction ne s'applique à la gestion du territoire agricole versus les milieux sauvages. Son adoption n'a donc aucune incidence directe sur la fragmentation des espaces naturels (Wallace & al., 2019).
- Les normes biologiques interdisant l'application de pesticides de synthèse réduisent la pression exercée sur les espèces pollinisatrices (Borenstein, 2022). De plus, les bienfaits des SPB favorisent l'activité microbienne, bactérienne, fongique et animale dans le sol, tous bénéfiques aux cultures de soya (Wallace & al., 2019). La stratégie agit donc contre l'extinction des espèces bénéfiques à l'agriculture.
- Ces mêmes normes concernant les pesticides limitent considérablement les risques sur les écosystèmes aquatiques. Les SPB atténuent donc les risques liés aux contaminants sur les espèces aquatiques (MAPAQ, 2022b).
- Les SPB ont une incidence positive sur la biodiversité. Bien que non exclusives à celle-ci, les pratiques suivantes favorisent la diversité floristique et faunique : l'absence de pesticides et d'engrais synthétiques, l'association de cultures végétales sur une même entreprise, des rotations de cultures complexes, une gestion des terrains bordant les superficies cultivées bénéfique à certaines espèces, ainsi que l'absence d'organismes génétiquement modifiés sur les exploitations biologiques (Boutin et al. 2011).

Puisque la présente stratégie n'a aucun effet sur les deux premiers sous-critères, des effets fortement positifs sur trois d'entre eux et modérément positifs sur un, elle se voit attribuée une cote de 1 pour ce critère.

Critère 5 : Réduit les vulnérabilités liées aux espèces nuisibles

- Les SPB misent sur la gestion intégrée des ennemis des cultures. Les études sur les ravageurs des cultures prennent donc en compte l'écosystème entier. Bien que cette vision ne soit pas exclusive aux SPB, il est probable qu'ils contribuent davantage aux connaissances sur les ennemis des cultures (MAPAQ, 2011).

- Les rotations de cultures complexes diminuent les vulnérabilités face aux ennemis des cultures et aux maladies en augmentant la diversité spécifique (Gagnon et al., 2018). De plus, la gestion intégrée offre une meilleure protection dans une vision à long terme et diminue les risques d'adaptation des ennemis face aux interventions préconisées (MAPAQ, 2011). De plus, l'adoption de stratégies de lutte biologique et culturelle adaptées au milieu est préconisée dans les SPB. Ceux-ci ont un fort potentiel d'efficacité (Cadieux, 2022). Finalement, la valorisation de la biodiversité permet d'établir un agroécosystème résilient face à l'arrivée des ravageurs et l'activité biologique accrue est une mesure de protection contre les maladies infectieuses pouvant s'attaquer au soya (Cadieux, 2022).
- La prévention est au cœur des SPB. Les registres remplis assidument permettent de faire un suivi des enjeux sur le territoire, mais aussi de se référer aux expériences vécues mondialement. Ce partage des savoirs favorise ainsi l'adaptation anticipative face aux futures espèces nuisibles, en plus d'assurer un meilleur suivi des champs (Wallace & al., 2019).
- Les SPB misent principalement sur des stratégies d'adaptation anticipative pour faire face aux ennemis des cultures, et peu sur l'adaptation réactive. De plus, puisque les pesticides de synthèse sont interdits, les solutions d'adaptation réactive efficaces sont limitées. Ils donnent donc peu d'outils d'adaptation réactive efficace et durable (Wallace & al., 2019).
- La lutte parasitaire intégrée dans les SPB condamne l'utilisation de pesticides synthétiques et privilégie la prévention et les interventions adaptées au milieu. Les coûts engendrés par une gestion préventive sont plus faibles qu'en gestion réactive, en limitant entre autres l'achat de pesticides onéreux. Les SPB permettent donc une diminution des coûts liés à la gestion des espèces nuisibles (Wallace & al., 2019).

Puisque la présente stratégie a des effets fortement positifs sur quatre sous-critères, et des effets négatifs sur un sous-critère, elle se voit attribuer une cote de 1 pour ce critère.

Critère 6 : Atténue les sources de polluants et les impacts environnementaux directs et indirects attribuables aux cultures de soya

- L'application d'herbicides synthétiques et de pesticides toxiques persistants étant la principale source de contamination des réseaux hydriques dans les SPC de soya québécois, les restrictions qui s'y appliquent en SPB limitent la pollution des eaux de surface et souterraines (Gagné & al., 2017). Toutefois, bien que significativement moins importants, les risques environnementaux liés

aux substances autorisées ne sont pas nuls. La stratégie permet donc de réduire les risques, mais pas de les éliminer complètement (Boutin et al., 2011). Ensuite, les SPB augmentent le taux de rétention des sols et ralentissent le lessivage, ce qui peut potentiellement réduire l'apport de phosphore dans les cours d'eau, et donc diminuer les risques d'eutrophisation. Les données restreintes sur le sujet ne permettent toutefois pas de confirmer l'hypothèse (Rasouli et al., 2014). Enfin, les pertes azotées et les contaminants des pesticides vers les eaux souterraines ou de drainage ont généralement tendance à être moins importants lorsque prévaut une gestion biologique (Boutin et al., 2011).

- Comparativement aux SPC, les SPB entraînent globalement une diminution des émissions de GES. En premier lieu, bien que l'utilisation directe d'énergie fossile pour le travail du champ en régie biologique soit généralement plus élevée qu'en SPC, les émissions globales de CO₂ sont moindres. En effet, la fabrication des pesticides et engrais de synthèse utilisés dans les SPC est une importante source d'émissions de CO₂. De plus, l'interdiction d'appliquer des pesticides de synthèse réduit considérablement la pollution de l'air et les risques de dérives aériennes (Boutin et al., 2011). Enfin, les taux de pH plus élevés des sols des SPB réduisent les besoins d'application de chaux, source considérable d'émissions de CO₂ (Bulletin des agriculteurs, 2020). En second lieu, les pertes d'azote sous forme de N₂O seraient plus faibles dans un agrosystème biologique (Gagné & al., 2017), (Gagné, 2021). Une bonne structure de sol permet une circulation d'air aérobique, ce qui limite la nitrification et l'émission du N₂O (Gasser et al., 2015). Finalement, une vulnérabilité réduite à l'érosion éolienne limite le soulèvement de particules en suspension et la dispersion des contaminants dans l'air (OMAFRA, 2023).
- Les besoins en énergie sont moindres en SPB, et ce principalement en raison de la consommation que nécessite la production des pesticides et engrais de synthèse appliqués dans les champs des SPC (Boutin et al., 2011).
- Les taux de matière organique élevés dans les sols constituent de grandes réserves en carbone (Boutin et al. 2011). Les apports des SPB à la santé des sols permettent donc une séquestration plus importante du CO₂ atmosphérique sous forme de carbone organique par l'entremise de la photosynthèse, et ce à des profondeurs plus importantes (Gagné & al., 2017).

Puisque la présente stratégie a un effet positif sur l'ensemble des sous-critères, elle se voit attribuer une cote de 2 pour ce critère.

Critère 7 : Offre des opportunités d'adaptation intéressantes et réalisables pour les cultivateurs

- La demande en soya biologique est en hausse au Québec et mondialement (MAPAQ, 2020b). De plus, le soya est relativement facile à faire pousser en mode biologique puisqu'il nécessite une quantité modérée de nutriments si on le compare à d'autres cultures. Les rendements sont ainsi similaires à ceux en SPC (Wallace & al., 2019). Finalement, les producteurs québécois reçoivent diverses primes pour les productions biologiques (CRAAQ, 2023). Les SPB représentent donc une opportunité avantageuse pour les cultivateurs.
- L'accès à plusieurs programmes d'aide financière, ressources techniques et formations permettent de faire de la transition vers la culture biologique une stratégie réalisable à court/moyen terme. Le MAPAQ offre par exemple le *Programme d'appui pour la conversion à l'agriculture biologique*, le *Programme Prime-Vert* et le *Programmes services-conseils*. La FADQ adapte aussi plusieurs programmes afin de mieux supporter les producteurs agricoles. (CRAAQ, 2023). Finalement, le Québec compte déjà sur une forte expertise de production biologique, ce qui favorise une transition complète à moyen terme (UPA, 2023a).
- Un nombre d'études vérifiables et crédibles sur les SPB est conduit partout dans le monde. La présente section en mentionne d'ailleurs plusieurs. Les informations mentionnées sont donc validées par la présence de documentation de recherches et d'expériences terrain. Toutefois, peu d'études récentes visant précisément la culture du soya sont disponibles. Les données recueillies sont donc majoritairement extrapolées au soya plutôt qu'appliquées directement.
- Les SPB ont bonne presse et sont acceptés socialement (UPA, 2023a).

Puisque la présente stratégie a un effet positif sur l'ensemble des sous-critères, elle se voit attribuer une cote de 2 pour ce critère.

7.2.2. Planter des cultures de couverture intercalaire en début de saison

Critère 1 : Améliore la santé des sols

- Les CCI bonifient globalement la santé du sol pendant que la culture principale y pousse. Elles permettent en effet d'améliorer la structure, la texture, le drainage et l'aération du sol. La présence d'une variété de racines et la protection qu'offre le couvert végétal en sont principalement responsables (Cadieux, 2022).
- Elles accentuent le contenu en matière organique en fournissant une biomasse racinaire additionnelle (Vanasse & al., 2022).

- Les CCI apportent une diversité végétale accrue dans l'agroécosystème favorisant une plus grande diversité de microorganismes terricoles (Cadieux, 2022).
- Les CCI contribuent aux bons niveaux d'éléments nutritifs, entre autres en augmentant la concentration en carbone organique (Vanasse & al., 2022).

Puisque la présente stratégie a un effet fort positif sur l'ensemble des sous-critères, elle se voit attribuer une cote de 2 pour ce critère.

Critère 2 : Favorise la résistance aux évènements météorologiques extrêmes

- Les CCI atténuent les extrêmes thermiques souterraines notamment en créant de l'ombre durant la saison de croissance. Ce phénomène se produit grâce aux feuilles de ces plantes, mais aussi à cause de leurs résidus laissés au sol après un fauchage ou une récolte (Cadieux, 2022). De plus, la capacité de rétention d'eau est accrue grâce à une meilleure structure de sol, réduisant les risques d'insolation (Vanasse & al., 2022). Les CCI réduisent donc la vulnérabilité du soya face aux températures supérieures à 30 °C.
- Encore une fois, les bienfaits des CCI sur la structure des sols permettent une meilleure perméabilité de l'eau et limite les risques de compactage (Vanasse & al., 2022). De plus, un couvert végétal plus dense limite les perturbations de la pluie sur les agrégats pouvant mener à l'encroustement et la battance des sols. Ceux-ci préservent donc plus facilement leur perméabilité, et ce même lors d'averses intenses (Cadieux, 2022). Les CCI atténuent donc les risques d'inondation.
- Le choix d'espèces de couverture avec de longues racines permet l'infiltration de l'eau en profondeur. La capacité de rétention de l'eau est ainsi plus élevée, assurant une plus grande réserve lors de déficits hydriques importants (Vanasse & al., 2022). La stratégie permet donc de diminuer la vulnérabilité face aux déficits en eau et aux sécheresses.
- Une meilleure structure et une agrégation plus importante protègent les sols contre l'érosion. De plus, un couvert végétal dense permet de protéger l'intégrité de sol et des racines lors d'épisodes de forts vents et d'averses (Cadieux, 2022). Les CCI ont ainsi le potentiel d'augmenter la résistance des cultures de soya face aux tempêtes.
- Conséquemment, une résistance accrue du soya face aux évènements météorologiques extrêmes permet une diminution significative des coûts reliés.

Puisque la présente stratégie a un effet fort positif sur l'ensemble des sous-critères, elle se voit attribuer une cote de 2 pour ce critère.

Critère 3 : Prend avantage du réchauffement du climat et des dérèglements des saisons

- La contribution des CCI aux propriétés physiques et au niveau de nutriments des sols peut favoriser leur fertilité sur des saisons plus longues. Ils pourraient ainsi permettre une double récolte, ou limiter les interventions nécessaires afin de remettre le sol sur pied pour la saison suivante (Gagné & al., 2017). Toutefois, le risque de saturation en azote pourrait compromettre cette option. Peu de documentation est encore disponible à ce sujet (Cadieux, 2022). Ainsi, les CCI pourraient potentiellement s'avérer une opportunité de mise à profit des saisons estivales plus longues. Les données limitées ne permettent toutefois pas de l'affirmer.
- La protection offerte par les résidus des CCI sur le sol, en plus des propriétés physiques améliorées, serait bénéfique lorsque le couvert de neige est moindre ou absent (Cadieux, 2022). Toutefois, aucune recherche ne démontre que les CCI favorisent l'endurcissement des plants de soya aux périodes de froid occasionnel. Ainsi, la stratégie améliore en partie l'adaptation aux saisons hivernales plus courtes et moins froides.

Puisque la présente stratégie a des effets modérément positifs sur les deux sous-critères et que les hypothèses ne sont pas encore confirmées par une étude sur le soya, elle se voit attribuer une cote de 1 pour ce critère. Elle présente toutefois un potentiel intéressant lorsque comparée aux études faites sur les cultures de couverture conventionnelles.

Critère 4 : Préserve ou enrichit la biodiversité et les services écologiques

- Bien que les CCI favorisent la biodiversité, elles sont incapables de remplir les fonctions des milieux sauvages. Elles ne peuvent donc pas compenser leur perte (CAC, 2022). Les CCI ne mettent toutefois pas en péril l'intégrité des espaces boisés, des milieux humides et des plaines sauvages (Vanasse & al., 2022). Leur influence sur les pertes d'habitats naturels est donc négligeable.
- Le choix judicieux des espèces à utiliser en CCI peut permettre la création de corridors continus en ressources alimentaires, essentiels au déplacement des pollinisateurs sur le territoire (Chagnon, 2008). La stratégie contribue ainsi considérablement à réduire les effets néfastes de la fragmentation des espaces naturels.

- Les CCI apportent une diversité végétale accrue dans l'agroécosystème (Vanasse & al., 2022). Celle-ci avantage grandement le maintien et la survie des espèces bénéfiques aux cultures de soya dans l'écosystème. Plus particulièrement, les insectes peuvent compter sur des sources de nourriture plus variées, favorisant du même coup la diversité spécifique des pollinisateurs (Chagnon, 2008). Ses bienfaits augmentent aussi l'activité microbienne, bactérienne, fongique et animale dans le sol, tous bénéfiques aux cultures de soya (Wallace & al., 2019). Les CCI agissent donc activement contre l'extinction des espèces bénéfiques aux cultures de soya.
- La meilleure capacité de rétention de l'eau des sols, combinée au ralentissement de la vitesse de ruissèlement des eaux de surface, limite des quantités de polluants attribuables aux cultures de soya étant relâchées dans les cours d'eau. De plus, la présence d'une diversité d'espèces dans les champs de soya pourrait agir comme filtre contre les pesticides et favoriser leur taux de rétention dans le sol (Vanasse & al., 2022). Les CCI ont ainsi le potentiel d'atténuer les risques liés aux contaminants sur les espèces aquatiques.
- Cette diversité est bénéfique à l'ensemble des BSE (Cadieux, 2022). De plus, elle permet de pallier les faiblesses agronomiques du soya sur une base individuelle dans l'interaction avec les organismes dans le sol (Vanasse & al., 2022). Elles favorisent ainsi la biodiversité.

Puisque la stratégie présente des effets considérablement positifs sur quatre des cinq sous-critères, elle se voit attribuer une cote de 2 pour ce critère.

Critère 5 : Réduit les vulnérabilités liées aux espèces nuisibles

- Les études en cours permettront d'en connaître davantage sur le comportement des ennemis des cultures face aux différentes options stratégiques offertes par les CCI. De plus, son adoption possible à plus grande échelle servira de laboratoire, où le partage des savoirs et l'adaptation seront importants (CEROM, 2022a). Les CCI ont donc un bon potentiel de contribuer aux connaissances sur les ennemis des cultures de soya.
- La diversité des espèces végétales permet un meilleur contrôle des ravageurs dans les cultures de soya, limitant ainsi sa vulnérabilité face aux ennemis des cultures dites spécialistes (Cadieux, 2022). De plus, l'activité biologique accrue est une mesure de protection contre les maladies infectieuses pouvant s'attaquer au soya (Gagnon & al., 2018). Toutefois, puisque l'étude de cette stratégie n'en est qu'à son début, les risques qu'une espèce utilisée en CCI devienne nuisible ou favorise la propagation d'organismes nuisibles pour le soya sont présents. Ces risques seront

mieux gérés à la suite nombreuses expériences terrain. La stratégie a donc le potentiel d'offrir une meilleure protection contre les espèces nuisibles déjà présentes.

- La diversité des espèces végétales permet une meilleure résilience du milieu en cas de perturbations (CAC, 2022). Toutefois, les recherches limitées sur les CCI limitent la capacité des systèmes agricoles à s'adapter de façon anticipative. Ainsi, les plans de gestion ne peuvent être basés que sur des données théoriques (Vanasse & al., 2022). Il est toutefois probable que la stratégie favorisera l'adaptation anticipative face aux espèces nuisibles dans le futur, lorsque les expériences terrain seront suffisantes.
- Bien que les CCI apportent des modifications aux plans de gestion des terres agricoles, son influence sur le suivi des champs est négligeable (Vanasse & al., 2022).
- Les CCI ne donnent aucun outil d'adaptation réactive efficace et durable.
- En supposant que les CCI constituent une stratégie anticipative efficace contre les ennemis des cultures, elles permettront de réduire l'utilisation de pesticides onéreux et de limiter les pertes de production (Vanasse & al., 2022). Elles seraient ainsi responsables d'une diminution des coûts liés à la gestion des espèces nuisibles.

Puisque la stratégie présente des effets potentiellement positifs sur quatre sous-critères, et des effets négligeables sur deux sous-critères, elle se voit attribuer une cote de 1 pour ce critère. De plus, malgré son fort potentiel, l'incertitude des résultats des études futures ne permet pas d'assumer que les CCI contribueront fortement à réduire les vulnérabilités des cultures de soya face aux espèces nuisibles.

Critère 6 : Atténue les sources de polluants et les impacts environnementaux attribuables aux cultures de soya

- Les CCI permettent de ralentir la vitesse de l'eau du ruissèlement de surface. La densité du couvert végétal influence ainsi l'érosion hydrique et les pertes de sédiments. Le transport de matières polluantes vers les cours d'eau en provenance des cultures de soya serait ainsi diminué (Cadieux, 2022). De plus, une meilleure structure et texture de sol limite les risques de contamination des eaux souterraines par les pesticides (MELCC, 2016). Finalement, l'apport supplémentaire de carbone fixé par les CCI peut réduire les besoins en fertilisant pour les cultures qui suivront celle du soya dans la rotation (Vanasse & al., 2022). Les CCI ont donc le potentiel de limiter la pollution des eaux de surface et souterraines.

- Une bonne structure et composition du sol favorise une circulation d'air aérobique, une des conditions limitant les émissions de N₂O (Gagné & al., 2017). Toutefois, l'utilisation des CCI dans les cultures de soya pourrait potentiellement augmenter le niveau de nitrates. En effet, la combinaison de deux espèces fixatrices d'azote augmente les risques d'en surcharger le sol. Celui-ci est donc plus susceptible d'émettre du N₂O (Vanasse & al., 2022). Il est donc important de faire un choix judicieux quant au type de culture utilisé avec le soya en CCI (Cadieux, 2022). Ensuite, une vulnérabilité réduite à l'érosion éolienne limite le soulèvement de particules en suspension et la dispersion des contaminants dans l'air (OMAFRA, 2023). Enfin, il est probable que les propriétés physiques améliorées et la gestion des ennemis des cultures plus efficace diminuent les interventions nécessaires dans les champs, réduisant ainsi les charges polluantes liées à l'application de pesticides et fertilisants, en plus d'alléger les niveaux d'émissions de CO₂ attribuables au fonctionnement de la machinerie agricole (Vanasse & al., 2022). Les CCI ont donc un potentiel considérable de diminuer les émissions de GES et autres polluants dans l'air, mais présentent tout de même un risque.
- En considérant l'utilisation d'un semoir adapté aux CCI, les dépenses énergétiques pour le semis resteront les mêmes. Toutefois, il est probable que les propriétés physiques améliorées et la gestion des ennemis des cultures plus efficace réduisent les interventions nécessaires dans les champs (Vanasse & al., 2022). Ainsi, la stratégie pourrait contribuer à réduire les besoins énergétiques, principalement ceux de combustibles fossiles alimentant la machinerie agricole.
- Les cultures de couvertures ont la capacité de séquestrer le carbone dans le sol, tout comme le soya. Il est cependant possible que, en présence de deux espèces possédant cette aptitude, que le sol devienne saturé, limitant ainsi les bienfaits possibles de la stratégie sur ce sous-critère.

Puisque la stratégie présente des effets potentiellement positifs l'ensemble des sous-critères, mais que le niveau d'incertitude demeure présent, la cote de 1 est attribuée pour ce critère.

Critère 7 : Offre des opportunités d'adaptation intéressantes et réalisables pour les cultivateurs

- Bien que l'implantation des CCI nécessite une gestion plus exigeante en temps et en ressources humaines, les bénéfices pour les producteurs de soya sont considérables. En plus de bénéficier d'un meilleur taux de rendement, la stratégie permet de sauver sur les coûts des additifs et des interventions mécaniques (Cadieux, 2022). S'il est bien appliqué, le système a un potentiel d'autorégulation plus élevé (Vanasse & al., 2022). Ensuite, les bienfaits se feront ressentir à plus

grande échelle. Les écosystèmes et la biodiversité du territoire seront positivement influencés. Les instances gouvernementales en verront ainsi les bénéfices. L'adoption des CCI représente donc une opportunité avantageuse pour les cultivateurs, les entreprises et les gouvernements.

- Les effets positifs des CCI sur la santé des sols et sur les BSE offrent le potentiel d'affecter positivement les taux de rendement du soya (Vanasse & al., 2022).
- L'utilisation des cultures de couvertures est répandue dans les cultures du soya. Les techniques et l'équipement nécessaire sont acquis pour la majorité des cultivateurs (Vanasse & al., 2022). Toutefois, les études limitées sur les CCI complexifient la gestion à court terme et le choix des espèces en fonction de leur complémentarité avec le soya (Cadieux, 2022). Son adoption s'avère donc une stratégie réalisable à moyen terme.
- Puisque l'adoption des CCI est une stratégie récente, les connaissances sur le sujet sont en plein développement. Au Québec, le CEROM le CETAB+ mène une étude de 2021 à 2023 ayant pour objectif d'évaluer les bénéfices des CCI sur la santé du sol et sa fertilité. Les résultats ne sont toujours pas disponibles (CEROM, 2022a). Ainsi, son potentiel est présentement basé en grande partie sur les bienfaits prouvés des cultures de couvertures en rotation. Les CCI sont donc validées partiellement par la présence de documentation de recherches et d'expériences terrain. Il est probable que des résultats positifs sur la culture du soya au Québec soient révélés par l'étude du CEROM.
- En consultant la multitude de documents portants sur les cultures de couverture au Québec, il est évident qu'elles sont perçues positivement par le public. Il est ainsi fort probable que les CCI seront elles aussi acceptées socialement.

Puisque la stratégie présente des effets positifs sur l'ensemble des sous-critères, une cote de 2 lui est accordée.

7.2.3. Miser sur les technologies génétiques comme outil de sélection des variétés

Critère 1 : Améliore la santé des sols

- Une sélection de variétés adaptée au type de sol puisse permettre d'améliorer la structure, la texture, le drainage et l'aération du sol (Gagné & al., 2017).
- Les effets de la stratégie sur la biomasse, l'épaisseur de la couche arable, l'activité biologique du sol et les niveaux d'éléments nutritifs sont négligeables (SoyaGen, 2022).

Puisque la présente stratégie a des effets positifs sur un seul des sous-critères, et aucun effet sur les autres, la stratégie se voit accorder la cote de 0.

Critère 2 : Favorise la résistance aux événements météorologiques extrêmes

- Les technologies génétiques ont un fort potentiel de réduire la vulnérabilité du soya face aux températures supérieures à 30 °C, et ce en sélectionnant des variétés plus résistantes à la chaleur, au rayonnement solaire, et donc aux risques d'insolation (SoyaGen, 2022).
- La possibilité de choisir des variétés de soya favorisant une bonne structure de sol pourrait potentiellement atténuer les risques d'inondation. La stratégie est toutefois plus efficace pour la sélection de variétés résistantes aux surplus en eau (SoyaGen, 2022).
- La sélection de variétés de soya présentant de moins grands besoins en eau dans les régions à risque de déficits hydriques permet de réduire les vulnérabilités du soya face aux sécheresses (SoyaGen, 2022). De plus, le potentiel apporté à la structure du sol permettrait une meilleure rétention de l'eau (Boutin et al., 2011).
- Une structure de sol améliorée, combinée à l'utilisation de variétés offrant plus de protection face aux vents et aux précipitations offre un fort potentiel de contrôle de l'érosion (SoyaGen, 2022).
- Les technologies génétiques peuvent permettre de sélectionner des variétés produisant des plants de soya présentant une structure plus solide (tige, feuilles et racines). La stratégie peut donc potentiellement augmenter la résistance des cultures de soya face aux tempêtes (SoyaGen, 2022).
- Les bénéfices obtenus dans l'ensemble des sous-critères permettent donc de diminuer les risques de pertes de rendement attribuables aux événements climatiques, et donc de ce fait les coûts reliés (Boutin et al., 2011).

Puisque la présente stratégie a un effet fort positif sur l'ensemble des sous-critères, elle se voit attribuer une cote de 2 pour ce critère.

Critère 3 : Prend avantage du réchauffement du climat et des dérèglements des saisons

- Des cultivars de plus en plus hâtifs pourraient donner la possibilité d'une double-récolte par saison, en plus de faciliter la migration des cultures de soya vers le nord de la province. La stratégie contribue donc aux opportunités de mise à profit des saisons estivales plus longues dans le sud,

et de bénéficier des saisons de moins en moins courtes au nord (Payette, 2022). SoyaGen (2022) identifie d'ailleurs l'établissement des cultures de soya dans les régions plus nordiques du Québec comme un défi auquel les technologies génétiques peuvent contribuer.

- La stratégie n'a aucun effet direct sur le niveau d'adaptation du soya aux saisons hivernales plus courtes et moins froides. Toutefois, dans le contexte d'une migration vers le nord, les technologies génétiques pourraient permettre de faciliter les choix de variétés de soya résistantes au froid hivernal, plus hâtif que dans les régions du sud (Payette, 2022).

Puisque la stratégie offre des opportunités pour les deux sous-critères, elle se voit attribuer une cote de 2 pour ce critère.

Critère 4 : Préserve ou enrichit la biodiversité et les services écologiques

- La stratégie n'a aucune incidence directe sur les pertes d'habitats naturels et sur leur fragmentation (SoyaGen, 2022).
- La potentielle diminution de recours aux pesticides agit contre l'extinction des espèces bénéfiques à l'agriculture tels que les pollinisateurs (Borenstein, 2022), en plus d'atténuer les risques liés aux contaminants sur les espèces aquatiques (MAPAQ, 2022b).
- Une meilleure protection des pollinisateurs favorise la diversification des espèces floristiques et a une incidence potentiellement positive sur la biodiversité (Boutin et al. 2011).

Puisque la présente stratégie n'a aucun effet sur les deux premiers sous-critères, mais des effets positifs sur les quatre suivants, elle se voit attribuer une cote de 1 pour ce critère.

Critère 5 : Réduit les vulnérabilités liées aux espèces nuisibles

- Un nouvel outil de diagnostic au champ développé par Soyagen pourrait permettre, entre autres, de mieux comprendre et de prévoir les comportements des espèces pathogènes dans différentes conditions. La stratégie contribue ainsi aux connaissances sur les ennemis des cultures (Payette, 2022).
- L'outil de diagnostic permet non seulement de mieux prévoir les comportements des espèces pathogènes, mais aussi de bien connaître le milieu dans lequel le soya est produit. La stratégie favorise ainsi l'anticipation et l'adaptation aux pressions exercées par les ennemis des cultures. La combinaison du développement des connaissances et d'une meilleure adaptation anticipative

contribueront de ce fait à offrir une meilleure protection face aux espèces nuisibles (Payette, 2022).

- La stratégie mise d'avantage sur un processus d'adaptation anticipatif. Bien que les besoins en interventions réactives soient potentiellement diminués avec l'aide de la génomique, elle n'offre aucune solution d'adaptation réactive (SoyaGen, 2022).
- À long terme, des variétés de soya plus résilientes face aux ennemis des cultures permettra de réduire les interventions au champ par les agriculteurs. La stratégie peut potentiellement mener à une diminution des coûts reliés à la gestion des espèces nuisibles, particulièrement par la réduction de l'emploi des pesticides (SoyaGen, 2022).

Puisque la stratégie a des effets positifs sur la majorité des sous-critères et qu'elle présente un fort potentiel de réduire les vulnérabilités du soya liées aux espèces nuisible, elle se voit attribuer la cote de 2.

Critère 6 : Atténue les sources de polluants et les impacts environnementaux directs et indirects attribuables aux cultures de soya

- Une diminution de l'utilisation des pesticides potentiellement possible grâce à la stratégie limite la pollution des eaux de surface et souterraines (Gagné & al., 2017), en plus de réduire les émissions de GES liées à leur production (Boutin et al., 2011).
- Les effets de la stratégie sur les besoins en énergie des productions de soya et leur niveau de séquestration des GES sont difficilement quantifiables, et potentiellement négligeables (SoyaGen, 2022).

Puisque la présente stratégie a des effets positifs sur la moitié des sous-critères, elle se voit attribuer une cote de 1 pour ce critère.

Critère 7 : Offre des opportunités d'adaptation intéressantes et réalisables pour les cultivateurs

- La stratégie mise sur une adaptation optimale des variétés de soya aux conditions environnementales du milieu dans lequel il est cultivé (CEROM, 2022a). De ce fait, les taux de rendement sont à la hausse lorsqu'une sélection juste est effectuée.
- Une bonne sélection génétique permet de réduire les efforts nécessaires à la gestion de la majorité des enjeux des précédents critères. Elle favorise une rentabilité en temps et en argent. La stratégie représente donc une opportunité avantageuse pour les cultivateurs.

- Bien que les méthodes de sélection génomiques soient toujours en développement, les informations recueillies au cours des dernières années permettent d'effectuer des sélections informées à court/moyen terme (CEROM, 2022a).
- La documentation et les recherches terrain sont aussi en développement. Suffisamment de données sont toutefois disponibles pour valider le potentiel de la stratégie (CEROM, 2022a).
- Peu d'études ont été conduites au sujet de l'acceptabilité sociale des outils de sélection génomiques. Il est pour l'instant difficile de déterminer la position de la population face à la stratégie.

Puisque la stratégie présente des effets positifs notoires sur la majorité des sous-critères, une cote de 2 est accordée pour ce critère.

7.2.4. Adopter un MCA

Critère 1 : Améliore la santé des sols

- Une bonne gestion des sols et de leur santé atténue leurs émissions de GES (Boutin et al., 2011). De plus, les sols peuvent agir à titre d'outil de séquestration du carbone, par exemple lorsque les cultures de couverture sont ajoutées au plan de gestion (Vanasse & al., 2022). Ainsi, un nombre de règlements et de protocoles du MCA devront aborder cet enjeu et les cultivateurs de soya devront se plier aux nouvelles exigences. La stratégie a donc le potentiel d'apporter des améliorations à la structure, la texture, le drainage et l'aération du sol, d'encourager les actions bénéfiques à l'apport en matière organique, de protéger l'activité des organismes vivants dans les sols et d'assurer de bons niveaux d'éléments nutritifs. Les émissions de GES imputables à la gestion des sols sont toutefois difficiles à comptabiliser (MELCC, 2019). Il est donc possible que les bénéfices financiers en lien avec la gestion des sols ne soient pas à la hauteur des efforts déployés par les cultivateurs.

En conséquence, il est difficile de prévoir l'importance des effets positifs qu'aura l'adoption d'un MCA sur la santé des sols. Il est toutefois fort probable qu'il y contribue. La stratégie se voit donc attribuer une cote de 1 pour ce critère.

Critère 2 : Favorise la résistance aux évènements météorologiques extrêmes

- De meilleures propriétés physiques des sols, résultants du respect des règlements et protocoles sur la gestion des sols, permettront potentiellement de réduire la vulnérabilité du soya face aux températures supérieures à 30 °C. La meilleure rétention a aussi le potentiel de diminuer la vulnérabilité des cultures de soya face aux déficits en eau et aux sécheresses.
- Encore une fois, les bienfaits potentiels sur la structure des sols permettront une meilleure perméabilité de l'eau et limiteront les risques de compactage (Vanasse & al., 2022). Les risques d'inondation seront ainsi atténués.
- Une meilleure gestion des sols favorise l'agrégation des particules, augmentant du même fait leur résistance à l'érosion hydrique et éolienne (Cadieux, 2022).
- Finalement, des effets positifs sur l'ensemble des sous-critères précédent limitent les risques de pertes de production de soya liées aux évènements climatiques extrêmes, et donc une diminution des coûts reliés.

Bien que la stratégie ait des effets positifs sur l'ensemble des sous-critères, la résistance aux évènements météorologiques extrêmes ne fait pas partie de ses objectifs. Les bienfaits sont ainsi indirects. Pour cette raison, la stratégie se voit attribuer une cote de 1 pour ce critère.

Critère 3 : Prend avantage du réchauffement du climat et des dérèglements des saisons

- Encore une fois, les effets positifs de la pratique sur les propriétés physiques et le niveau de nutriments des sols peuvent favoriser leur fertilité sur de plus longues périodes (Gagné & al., 2017). Il n'est toutefois pas dans ses objectifs de mettre à profit les saisons estivales plus longues.
- Dans le même ordre d'idée, des propriétés physiques de sol améliorées et l'utilisation des cultures de couverture augmentent le niveau de protection lorsque le couvert de neige est moindre ou absent (Cadieux, 2022). Toutefois, l'adaptation aux saisons hivernales plus courtes et moins froides ne fait pas partie des objectifs de la stratégie.

Bien que la stratégie ait des effets positifs sur l'ensemble des sous-critères, le contrôle des impacts du réchauffement du climat et des dérèglements des saisons ne fait pas partie de ses objectifs. Les bienfaits sont ainsi indirects et limités. Pour cette raison, la stratégie se voit attribuer une cote de 1 pour ce critère.

Critère 4 : Préserve ou enrichit la biodiversité et les services écologiques

- Les milieux naturels sont des écosystèmes complexes, ce qui en fait des puits de carbone très efficaces et impossibles à recréer de façon artificielle. Ils ont donc une grande valeur pour l'objectif d'atténuer les émissions de GES dans l'atmosphère (CAC, 2022). Des règlements visant leur préservation seront donc inclus dans le MCA. Ceux-ci permettront du même coup de limiter les pertes d'habitats naturels importants pour la biodiversité. De plus, bien que l'obtention d'un écosystème complexe suite au reboisement prenne du temps, ses capacités de stockage du carbone sont considérables. Le reboisement pourrait donc mener à la création de nouveaux habitats naturels qui se développeront de façon naturelle au fil des années (Chagnon, 2008).
- La préservation des corridors naturels, combinée au boisement et reboisement d'endroits stratégiques pourrait contribuer à réduire considérablement la fragmentation des espaces naturels (Chagnon, 2008). Bien que l'objectif de la stratégie demeure la réduction et la séquestration des GES, le potentiel de bienfaits sur ce sous-critère est important.
- Comme conséquence indirecte, la préservation des milieux naturels et le boisement contribuent à offrir des habitats diversifiés et riches en ressources pour les espèces bénéfiques aux cultures de soya. Plus particulièrement, les insectes peuvent compter sur des sources de nourriture plus variées, favorisant du même coup la diversité spécifique des pollinisateurs (Chagnon, 2008). De plus, les bienfaits sur la santé des sols peuvent potentiellement favoriser les activités microbienne, bactérienne, fongique et animale dans le sol, toutes bénéfiques au rendement des cultures de soya (Wallace & al., 2019). Ainsi, la mise en place de la stratégie a le potentiel d'agir indirectement contre l'extinction des espèces bénéfiques à l'agriculture.
- Les meilleures propriétés physiques des sols imputables à leur bonne gestion favorisent la rétention des polluants, diminuant donc les quantités des polluants qui atteignent les écosystèmes aquatiques (Vanasse & al., 2022). De plus, puisque la fabrication des pesticides et des engrais de synthèse représente une importante source d'émissions de CO₂ (Boutin et al., 2011), le MCA devra prendre en considération leur achat par les agriculteurs, menant probablement à une diminution de leur utilisation. La stratégie a donc le potentiel d'atténuer les risques liés aux contaminants sur les espèces aquatiques.
- Une meilleure protection des habitats naturels, le boisement stratégique et le maintien des corridors naturels sont tous des facteurs qui favorisent la biodiversité.

Malgré que le MCA n'ait pas comme objectif principal la préservation de la biodiversité et des BSE, ses effets positifs sur l'ensemble des sous-critères sont considérables. La stratégie a donc un apport fort positif sur le critère et se voit accorder la cote de 2.

Critère 5 : Réduit les vulnérabilités liées aux espèces nuisibles

- Outre la prise en compte des émissions de GES causés par les pesticides et les stratégies de contrôle des ennemis des cultures de soya, les MCA ne touchera pas à sa gestion. Ainsi, l'apport de la stratégie aux connaissances sur les ennemis des cultures est négligeable.
- Des pratiques plus durables et de meilleures propriétés de sol contribuent à offrir une meilleure protection contre les espèces déjà présentes (Gagnon et al., 2018). De plus, l'atténuation des émissions de GES ralentit le processus de réchauffement et de dérèglement climatique qui s'avèrent être une opportunité pour plusieurs espèces nuisibles de prospérer (Moiroux & al., 2014).
- Bien qu'ils offrent une meilleure protection, le MCA a peu d'impact sur l'adaptation anticipative, du moins dans sa gestion. Il peut toutefois contribuer à donner plus d'options aux cultivateurs afin de bâtir un plan d'adaptation anticipative efficace (Vanasse & al., 2022).
- Le suivi constant des champs contribue à diminuer les risques d'avoir recours à des stratégies d'adaptation réactive, majoritairement plus polluantes (Boutin et al., 2011). En contexte de MCA, les cultivateurs de soya auront donc avantage à y mettre les efforts. La stratégie a ainsi le potentiel d'assurer un meilleur suivi des champs de soya.
- Le MCA ne donne pas d'outils supplémentaires à l'adaptation réactive face aux ennemis des cultures (CERFO, 2022).
- Indirectement, des sols en meilleure santé, des stratégies d'adaptation anticipative mieux adaptées et une diminution de l'utilisation des pesticides ont tous le potentiel de diminuer les coûts reliés à la gestion des espèces nuisibles (Wallace & al., 2019).

La stratégie influence positivement trois des six sous-critères. Les effets sur les trois autres sont négligeables. La stratégie se voit donc attribuer la cote de 1 pour ce critère.

Critère 6 : Atténue les sources de polluants et les impacts environnementaux attribuables à l'agriculture

- L'apport élevé de phosphore dans les cours d'eau contribue à leur eutrophisation, source importante d'émissions de CH₄ dans l'atmosphère (CAC, 2022). Conséquemment, les règlements et protocoles du MCA devront prendre en compte les charges de phosphores lessivés par les producteurs de soya dans les eaux de surface, les encourageant à adopter les pratiques conséquentes. De plus, les meilleures propriétés physiques des sols imputables à leur bonne gestion favorisent la rétention des polluants, diminuant donc les quantités des polluants qui atteignent les écosystèmes aquatiques et les eaux souterraines. Finalement, puisque la fabrication des pesticides et des engrais de synthèse représente une importante source d'émissions de CO₂ (Boutin et al., 2011), le MCA devra prendre en considération leur achat par les agriculteurs, menant probablement à une diminution de leur utilisation. La stratégie a donc le potentiel de limiter considérablement la pollution des eaux de surface et souterraines.
- Puisqu'il s'agit de sa principale fonction, l'adoption d'un MCA a un fort potentiel d'atténuation des GES (Équiterre, 2022a). Chacun des règlements et protocoles ont comme objectifs de réduire les émissions à la source ou d'assurer un meilleur stockage, et ce dans les différents secteurs de la production de soya (CERFO, 2022). La stratégie présente donc un fort potentiel de diminuer les émissions de GES et autres polluants dans l'air.
- L'utilisation de l'énergie pour la culture du soya est une source d'émissions de GES (Whitmore & Pineau, 2022). Les quantités de combustibles fossiles pour le fonctionnement des machineries, des équipements et le chauffage seront donc pris en compte dans le MCA (Bordeleau, 2023). De plus, la demande d'énergie électrique via le réseau d'Hydro-Québec devra aussi être considérée (Brusa-Pasqué, 2020). La stratégie encouragera donc les agriculteurs de soya à réduire leurs besoins en énergies, en plus de favoriser l'adoption des sources d'énergie jugées durables. Il est plausible que le MCA rende la production personnelle d'électricité via les technologies solaires et éoliennes profitables pour les agriculteurs. La stratégie a donc un fort potentiel de réduire les besoins énergétiques et de favoriser les sources d'énergie durables.
- Finalement, les règlements et protocoles du MCA miseront sur l'optimisation des ressources de stockage du carbone, la protection des milieux naturels et le reboisement (CERFO, 2022). La stratégie présente donc un fort potentiel d'augmenter la capacité de séquestration du carbone et autres GES.

Puisque la stratégie a des effets positifs sur l'ensemble des sous-critères, et qu'elle a comme fonction principale d'atténuer les sources de GES imputable à la culture du soya, elle se voit attribuer une cote de 2 pour ce critère.

Critère 7 : Offre des opportunités d'adaptation intéressantes et réalisables

- Ce système est axé sur le marché sans impliquer de coût direct pour le gouvernement (CERFO, 2022). Il offre aux cultivateurs la chance de bénéficier de leurs efforts, et indirectement des bienfaits liés aux pratiques agricoles durables (Équiterre, 2022b). Toutefois, les opportunités de réduction ou de séquestration des GES à l'échelle d'une entreprise agricole sont souvent limitées et la rentabilité financière de projets compensatoires est parfois précaire devant les coûts importants associés à la démarche compensatoire. La participation à une agrégation de projets peut alors être une solution intéressante financièrement. Le MCA pourrait de cette façon aider les agriculteurs à être récompensés à la valeur de leurs efforts (CERFO, 2022). La stratégie a donc le potentiel d'offrir une opportu
- ité avantageuse pour les cultivateurs, les entreprises et les gouvernements.
- Indirectement, l'adoption des diverses stratégies agricoles permettant l'atténuation des GES a aussi majoritairement des répercussions positives sur les taux de rendement du soya (Wallace & al., 2019).
- La mise en œuvre des protocoles à l'échelle de la ferme est complexe, rigide et coûteuse, et comprend de vastes exigences de tenue et de surveillance (Équiterre, 2022a). Cependant, certains protocoles sont déjà élaborés et utilisés en Alberta. Il s'agit donc d'un exemple à suivre (Équiterre, 2022a). Vu la complexité de la mise en place d'un MCA, son adoption devra se faire graduellement. La stratégie est donc réalisable à moyen terme.
- Quelques projets sont déjà en cours au Canada. Par exemple, les crédits pour la conservation des prairies sont disponibles par l'entremise du Grassland Protocol du Canada, dans le cadre de la Climate Action Reserve des États-Unis. Toutefois, des recherches sont toujours nécessaires pour réduire les incertitudes entourant la quantification des réductions de GES (Équiterre, 2022a). Les marchés de carbone ont toutefois fait leurs preuves à l'international comme outil pour la croissance économique verte (MELCC, 2023c). Il reste seulement à appliquer des principes tout aussi efficaces au milieu agricole québécois. Ainsi, bien que plus d'études et expériences soient nécessaires, la documentation sur les marchés du carbone est suffisante pour permettre l'élaboration du MCA.

- Au Canada, l'acceptabilité sociale en matière de tarification du carbone n'est pas très solide. Des interrogations visant la distribution des revenus de la tarification du carbone et son rôle dans l'accomplissement des objectifs climatiques persistent (Gajevic Sayegh, 2019). Les citoyens québécois sont toutefois plus ouverts à la discussion entourant l'utilisation des revenus de la tarification du carbone pour financer ou donner des outils pour la transition énergétique. Un plan de gestion du marché clair permettrait de diminuer les craintes de possible corruption, parfois mentionnées par le public (Gajevic Sayegh, 2022). Ainsi, bien que des efforts soutenus soient toujours nécessaires pour rassurer la population, l'acceptabilité sociale d'un MCA au Québec est de plus en plus forte (Équiterre, 2022b).

Puisque la stratégie présente potentiellement des effets positifs sur l'ensemble des sous-critères, mais que le manque d'études et d'expériences ne permet pas de l'affirmer, elle se voit attribuer une cote de 1 pour ce critère.

7.2.5. Mettre en place un Programme de valorisation monétaire des BSE

Critère 1 : Améliore la santé des sols

Considérant que les sols sont des écosystèmes rendant des services écologiques importants pour l'agriculture, ils seront considérés comme une ressource valorisée (Wallace & al., 2019). Leur exploitation devra ainsi encourir des coûts, et ce en fonction des méfaits engendrés par les pratiques utilisées. De ce fait, les exploitants auront avantage à adopter des stratégies qui améliorent la structure, la texture, le drainage et l'aération du sol, apportent de la matière organique, favorisent l'activité des organismes vivants dans les sols et contribuent aux bons niveaux d'éléments nutritifs.

Puisque la présente stratégie a le potentiel d'avoir un effet fort positif sur l'ensemble des sous-critères, elle se voit attribuer une cote de 2 pour ce critère.

Critère 2 : Favorise la résistance aux évènements météorologiques extrêmes

- La valorisation monétaire des BSE agissant comme protection face aux évènements météorologiques extrêmes permettra de favoriser les conditions environnementales qui réduisent la vulnérabilité du soya face aux températures supérieures à 30 °C, d'atténuer les risques d'inondation, de diminuer la vulnérabilité face aux déficits en eau et aux sécheresses et d'augmenter sa résistance aux tempêtes (Boutin et al., 2011).

- En plus des bénéfices monétaires directement encourus par la protection des BSE, un meilleur niveau de protection face à l'ensemble des sous-critères précédents permettrait une diminution des coûts reliés à la gestion des événements météorologiques extrêmes.

Bien que l'objectif de la stratégie ne vise pas directement ce critère, elle mène à des effets positifs sur l'ensemble des sous-critères. Elle se voit donc attribuer une cote de 1 pour ce critère.

Critère 3 : Prend avantage du réchauffement du climat et des dérèglements des saisons

La stratégie n'a aucun effet direct notable sur ce critère. La cote de 0 lui est donc attribuée.

Critère 4 : Préserve ou enrichit la biodiversité et les services écologiques

- Vu leur apport au maintien de l'équilibre écosystémique, les coûts liés à la destruction de milieux naturels tels que les forêts, les zones humides et les prairies sauvages seront très élevés, et ce dans le but de les protéger (CAC, 2022). La stratégie permettra donc de limiter de façon importante les pertes d'habitats naturels.
- Les corridors continus permettant l'interconnexion des différents habitats bénéficieront aussi d'une protection liée à leur grande valeur, réduisant ainsi la fragmentation des espaces naturels et la perte de connectivité écologique (Rayfield et al., 2021).
- Réduire les pertes de milieux naturels permet la préservation d'une diversité d'habitats pour les espèces bénéfiques à l'agriculture, en plus de contribuer au maintien de conditions favorables à leur survie (Chagnon, 2008). De plus, une bonne connectivité écologique favorise le déplacement des espèces sur le territoire, enjeu essentiel au renouvellement génétique et au maintien de taux de reproduction viables (Chagnon, 2008). La stratégie s'avère donc efficace pour contrer l'extinction des espèces bénéfiques à l'agriculture.
- Vu l'importance des services écologiques offerts par les écosystèmes aquatiques, leur valorisation sera élevée. Ainsi, les agriculteurs seront encouragés à mettre en place des mesures de protection des cours d'eau face aux polluants (bandes riveraines, stratégies agricoles adaptées, etc.). De plus, plusieurs écosystèmes filtrant les contaminants, tel que les milieux humides et les zones boisées bénéficieront d'une meilleure protection. De ce fait, la valorisation de BSE a le potentiel de réduire les charges polluantes attribuables à l'agriculture et au soya, atténuant ainsi les risques liés aux contaminants sur les espèces aquatiques. (MAPAQ, 2022b), (Massey-Cantin, 2022)

Puisque la présente stratégie a le potentiel de présenter des effets positifs notoires sur l'ensemble sous-critères, elle se voit attribuer une cote de 2 pour ce critère.

Critère 5 : Réduit les vulnérabilités liées aux espèces nuisibles

- La stratégie ne contribue pas aux connaissances sur les ennemis des cultures.
- Dans le même ordre d'idée qu'au critère 2, la stratégie encourage la mise en place de conditions environnementales permettant de réduire la vulnérabilité du soya face aux espèces nuisibles (Boutin & al., 2011). Elle offre donc une meilleure protection face à celle-ci, en plus de favoriser l'adaptation anticipative face aux futures espèces nuisibles.
- La stratégie n'a aucune incidence directe sur le suivi des champs et ne donne pas d'outils d'adaptation réactive supplémentaire.
- En raison de son apport à deux des sous-critères, il est plausible que la stratégie permette une diminution des coûts reliés à la gestion des ennemis des cultures.

Puisque la présente stratégie a le potentiel d'avoir des effets positifs sur trois des six sous-critères, elle se voit attribuer une cote de 1 pour ce critère.

Critère 6 : Atténue les sources de polluants et les impacts environnementaux attribuables à l'agriculture

- La stratégie a le potentiel d'encourager la préservation des écosystèmes agissant comme barrière de rétention des polluants, en plus de favoriser les pratiques agroenvironnementales limitant les conséquences sur les BSE (Boutin et al., 2011). Il est donc fort plausible qu'elle soit en mesure de protéger davantage les eaux de surface et souterraines face aux polluants.
- La stratégie vise plus particulièrement les BSE offerts par les écosystèmes terrestres et aquatiques. Il est d'ailleurs difficile d'apposer un prix sur la qualité de l'air (Dubois, 2017). Le programme de valorisation monétaire des BSE n'aura donc aucun effet direct sur les émissions de GES liées aux cultures de soya. Toutefois, les efforts de préservation des milieux naturels permettront indirectement de réduire les émissions de GES liées aux conversions des sols, en plus de favoriser leur séquestration (CCMF, 2023).
- La stratégie n'a aucun effet direct notable sur les besoins énergétiques des exploitations de soya.

Puisque la présente stratégie a le potentiel d'avoir des effets positifs sur la majorité des sous-critères, mais que ceux-ci sont de sources indirectes et non garanties, elle se voit attribuer une cote de 1 pour ce critère.

Critère 7 : Offre des opportunités d'adaptation intéressantes et réalisables pour les cultivateurs

- Premièrement, la valorisation monétaire de la nature, en plus d'améliorer le processus décisionnel des consommateurs et des entreprises, permet un contrôle plus stratégique des ressources publiques par les instances gouvernementales. Ce système permettrait aussi de réinjecter les fonds encourus dans des programmes de protection de la nature et d'adaptation aux CC, en plus de récompenser les agriculteurs présentant de bonnes performances face au respect des BSE. De plus, la stratégie influencerait le prix de vente des aliments, encourageant ainsi les consommateurs à privilégier les produits respectueux de l'environnement (Michaud, s.d.). Finalement, un programme de valorisation monétaire des BSE s'avèrerait avantageux pour les producteurs de soya sensibles à la cause environnementale. Leurs efforts pourraient en effet être récompensés par les incitations annuelles. La stratégie représente donc une opportunité potentiellement avantageuse pour les cultivateurs, les entreprises et les gouvernements.
- La stratégie favorise la mise en place de conditions favorables au bon rendement des cultures de soya (Wallace & al., 2019). Elle n'a toutefois aucun effet direct sur le sous-critère.
- Il est très difficile d'établir des valeurs monétaires aux différents écosystèmes et au BSE offerts. En plus d'être dynamique, chacun d'entre eux est unique. Les relations externes de ceux-ci sont aussi hautement influencées par les conditions à grande échelle. Des études approfondies et des analyses terrain détaillées seront ainsi nécessaires afin d'établir une valeur monétaire adaptée pour chaque milieu. La réalisation de la stratégie à court/moyen terme représente donc un défi de taille.
- Le système économique actuel démontre efficacement que la valorisation monétaire de biens et services permet un contrôle des ressources par la société (Roberts, 2007). Ainsi, l'expérience est suffisante pour affirmer que les mécanismes du marché encouragent la conservation des ressources naturelles. L'industrie forestière en est un bon exemple (Baumol & Stigler, 2011). Toutefois, le concept de valorisation monétaire des BSE demeure très peu répandu mondialement (Vivien, 2022). Le potentiel de protection des BSE offert par la stratégie est ainsi théoriquement validé par la présence de documentation de recherches, mais les expériences pratiques ne sont pas encore suffisantes pour affirmer l'hypothèse.
- La préservation des écosystèmes et de leur BSE est bien sûr bien perçue par la population. Toutefois, certaines préoccupations éthiques à l'établissement d'une valeur monétaire sur un espace naturel sont soulevées. De plus, de possibles sous-évaluations des milieux naturels et des

BSE inquiètent certains acteurs (Vivien, 2022). L'acceptabilité sociale de ce genre de programme est donc bonne, à condition que des efforts d'éducation et de transparence soient déployés.

La stratégie présente des effets positifs théoriques potentiels sur plusieurs sous-critères. Toutefois, peu d'expériences pratiques viennent confirmer cette hypothèse. Finalement, la mise en place d'un programme de valorisation des BSE n'est possible qu'à moyen/long terme. Pour ce faire, la stratégie se voit attribuer une cote de 1 pour ce critère.

7.2.6. Élargir l'accès au réseau électrique triphasé afin d'accélérer la transition énergétique

Critère 1 : Améliore la santé des sols

Puisque la stratégie n'a aucun effet notoire sur l'ensemble des sous-critères, elle se voit attribuer la cote de 0.

Critère 2 : Favorise la résistance aux évènements météorologiques extrêmes

- La stratégie peut potentiellement réduire le niveau d'autonomie des exploitations de soya, par exemple à la suite d'un évènement climatique qui viendrait compromettre le transport de l'électricité jusqu'aux fermes. Ainsi, en situation de chaleur extrême, les cultivateurs devront s'appuyer sur une autre source d'énergie pour alimenter les systèmes d'irrigation. La stratégie peut ainsi potentiellement augmenter la vulnérabilité du soya face aux températures supérieures à 30 °C.
- La stratégie n'a aucun effet notoire sur la vulnérabilité face aux inondations.

Les effets négatifs de la stratégie sur le critère restent négligeables. Celle-ci n'a de plus aucun impact positif notoire. Ainsi, la stratégie se voit accorder la cote de 0 pour ce critère.

Critère 3 : Prend avantage du réchauffement du climat et des dérèglements des saisons

Puisque la stratégie n'a aucun effet notoire sur le critère, une cote de 0 lui est attribuée.

Critère 4 : Préserve ou enrichit la biodiversité et les services écologiques

- La construction de barrages hydroélectriques mène à la destruction de territoires naturels. Toutefois, ces projets ont lieu en région éloignée, au nord de la province (Brusa-Pasqué, 2020). Les pertes d'habitats naturels n'ont donc pas d'effets directs sur les cultures de soya québécoises, majoritairement situées dans la vallée du Saint-Laurent.

- Le transport de l'électricité se fait majoritairement via des lignes électriques à haute tension. Le tracé de celles-ci doit être le plus linéaire possible. En conséquence, ces infrastructures sont responsables de fragmenter plusieurs habitats sauvages, dont certains sont en relation directe avec les cultures de soya (Lesmerises & al., 2013).
- Le développement de l'hydroélectricité québécois contribue à mettre de la pression sur des espèces bénéfiques à l'agriculture, soit par l'inondation d'habitats naturels (majoritairement éloignés des territoires de culture du soya) ou par leur fragmentation. Toutefois, une réduction des émissions de GES possible grâce à la transition électrique contribue à ralentir les effets des CC sur les habitats de ces mêmes organismes vivants, et donc de favoriser leur survie et prolifération (Borenstein, 2022). Bien que la stratégie présente quelques effets négatifs sur le sous-critère, les bénéfiques à long terme sont jugés plus importants, et agiraient donc contre l'extinction des espèces bénéfiques à l'agriculture.
- Les barrages hydroélectriques peuvent avoir des impacts négatifs sur les espèces aquatiques, notamment par la fragmentation de leurs habitats ou par leur contamination au mercure. Ces conséquences sont toutefois majoritairement observées dans les bassins de rétention des barrages et dans les rivières en aval (Hydro-Québec, 2020). La stratégie a donc des effets négligeables sur les risques liés à la contamination des espèces aquatiques vivant dans les écosystèmes en relation avec les cultures de soya.
- Une réduction des émissions de GES possible grâce à la transition électrique contribue à ralentir les effets des CC sur la biodiversité et ses BSE (Chagnon, 2008). Toutefois, la fragmentation des territoires causée par les lignes de transport compromet le déplacement des espèces dans les divers habitats, et donc leur diversification (Borenstein, 2022). Bien que la stratégie présente quelques effets négatifs sur le sous-critère, les bénéfiques à long terme sont jugés plus importants, et favoriseraient donc la diversification des espèces fauniques et floristiques.

Puisque la présente stratégie a des effets positifs sur la majorité des sous-critères, et que les bénéfiques d'une réduction des émissions de GES sur la préservation de la biodiversité et des BSE sont importants, elle se voit attribuer une cote de 2 pour ce critère.

Critère 5 : Réduit les vulnérabilités liées aux espèces nuisibles

- Une réduction considérable des émissions de GES attribuables à la transition énergétique des exploitations agricoles contribuerait à atténuer les effets des CC, et du même coup d'amoinrir la vulnérabilité du soya face aux espèces nuisibles. En effet, la stratégie pourrait potentiellement aider à diminuer la pression grandissante des insectes ravageurs, des mauvaises herbes et des agents pathogènes en limitant les conditions favorables à leur prolifération et leur migration qu'amènent les CC (Gagnon et al., 2018). La stratégie pourrait ainsi offrir une meilleure protection face aux espèces nuisibles des cultures de soya. De plus, puisque la vitesse à laquelle les CC évoluent serait réduite, l'adaptation anticipative des agriculteurs de soya face aux espèces nuisibles serait facilitée (Ouranos, 2015).
- En conséquence, les efforts nécessaires au contrôle des espèces nuisibles seraient limités, résultant en une possible diminution des coûts reliés à leur gestion.
- Toutefois, la stratégie ne contribue pas aux connaissances sur les ennemis des cultures et n'offre pas d'outil d'adaptation réactive efficace et durable.

Puisque la stratégie présente des effets positifs sur trois des cinq sous-critères, une cote de 1 est attribuée pour ce critère.

Critère 6 : Atténue les sources de polluants et les impacts environnementaux directs et indirects attribuables aux cultures de soya

- Une transition des combustibles fossiles vers les technologies électriques diminue les risques de fuite d'essence et d'huile. Autrement, les effets de la stratégie sur la pollution des eaux de surface et souterraines sont négligeables.
- Les niveaux d'émissions de GES, en comparaison avec les énergies fossiles, sont nettement inférieurs en mode de production et de consommation hydroélectrique (Sabourin, 2021). La stratégie permet donc une diminution importante des émissions de GES attribuable aux cultures de soya.
- L'énergie électrique offre un rendement sur investissement nettement supérieur aux produits pétroliers (Sabourin, 2021). En plus de son efficacité énergétique directe, le cycle de vie de l'hydroélectricité est beaucoup moins énergivore que celui des produits pétroliers (MEIE, 2023). La stratégie contribue donc de façon importante à réduire les besoins énergétiques et favorise les sources d'énergie durables.

- Bien que la transition énergétique contribue à diminuer les émissions de GES attribuables aux cultures de soya, elle ne présente aucun effet notoire sur la capacité de séquestration du carbone et autres GES.

Bien que la stratégie ait des effets notoires que sur deux des quatre sous-critères, sa contribution considérable sur l'atténuation des GES et des besoins énergétiques liés à la production du soya est importante. Ainsi, la stratégie se voit tout de même attribuer une cote de 2 pour ce critère.

Critère 7 : Offre des opportunités d'adaptation intéressantes et réalisables pour les cultivateurs

- La transition vers des sources d'énergies électriques permet une diminution considérable des coûts d'exploitation des agriculteurs québécois. En effet, en 2018, le coût d'utilisation de l'énergie fossile était de 123 M\$ pour les productions de maïs et de soya combinées. La consommation d'électricité quant à elle se chiffrait à 4,78 M\$. En termes de proportion d'utilisation de ces deux sources d'énergie, les dépenses associées à l'utilisation de l'énergie électrique représentent 3,9 % de celles de l'énergie fossile. Ainsi, l'augmentation de 1 % de l'utilisation de l'énergie électrique en remplacement de l'énergie fossile (baisse de 1 %) représente une réduction des coûts énergétiques d'environ 1,2 M\$ (UPA, 2019). De plus, un meilleur accès à de l'énergie électrique haute puissance contribue potentiellement à une transition technologique, les équipements dernier cri fonctionnant majoritairement à l'électricité (Moteur de recherche, 2021). Ainsi, la stratégie représente une opportunité avantageuse pour les cultivateurs, les entreprises et les gouvernements.
- Bien que l'adoption de nouvelles stratégies agricoles plus efficaces et moins invasives représente un bon potentiel de hausse des rendements du soya, les liens directs avec la stratégie sont limités (Lepage et al., 2012a). Ses effets sur les taux de rendement sont donc négligeables.
- Les bienfaits de la transition énergétique sont largement documentés (Ouranos, 2015). De plus, les stratégies pour l'extension du réseau triphasé en région rurale sont déjà établies et Hydro-Québec détient les savoirs sur ce qu'implique le raccordement en région plus éloignée (MELCC, 2023d). Finalement, les études démontrent une accélération de la transition énergétique des exploitations agricoles québécoises ayant accès aux réseaux triphasés (MELCC, 2023d). La stratégie est donc validée par la présence de documentation, de recherches et d'expériences terrain.

- La participation des instances gouvernementales, soit via le Plan pour une économie verte 2030 et le Plan directeur en transition, innovation et efficacité énergétiques 2026, contribue au raccordement des exploitations agricoles n'ayant toujours pas accès au réseau triphasé (Gouvernement du Québec, 2020) (MELCC, 2023d). De plus, les technologies déjà accessibles et les savoirs d'Hydro-Québec font aussi partie des facteurs contribuant à la réalisation de la stratégie à court/moyen terme.
- Les opinions populaires sur l'hydroélectricité sont parfois contradictoires. D'un côté, il est indéniable que l'abandon des énergies fossiles, tant en agriculture que dans les autres domaines, est encouragé par la majorité des citoyens. Toutefois, les conséquences sur le territoire et sur la biodiversité causée par les systèmes de production et de transport hydroélectriques engendrent des résistances chez les citoyens. L'impact des lignes sur le paysage est d'ailleurs la conséquence décriée par le plus grand nombre de citoyens consultés (Hydro-Québec, 2019). Ainsi l'acceptabilité sociale est mitigée, et tout dépend des stratégies d'aménagement proposées pour l'extension du réseau triphasé.

Puisque la stratégie a des effets positifs sur la majorité des sous-critères, et qu'elle représente une avenue rentable et réalisable à court/moyen terme, elle se voit attribuer une cote de 2 pour ce critère.

7.2.7. Effectuer une migration vers les régions nordiques

Critère 1 : Améliore la santé des sols

Une migration vers le nord pourrait permettre de réduire l'intensité d'exploitation des terres agricoles au sud, et donc améliorer leur santé globale. Toutefois, la conversion des sols en terre arable pourrait avoir des conséquences sur leur équilibre naturel.

Critère 2 : Favorise la résistance aux événements météorologiques extrêmes

- Les fréquences d'épisodes de chaleurs extrêmes sont moindres dans les régions nordiques. Toutefois, les prévisions démontrent qu'ils augmenteront aussi au fil des années (Ouranos). La stratégie permet donc de réduire la vulnérabilité du soya face aux températures supérieures à 30 °C à court/moyen terme, mais les risques à long terme restent présents. Il s'agit donc d'une solution temporaire.
- Les régions nordiques sont toutes autant sujettes à la hausse des excès de pluie pouvant mener à des inondations (Ouranos). De plus, la présence plus importante de terres argileuses au nord,

permettant une perméabilité moindre, augmente la vulnérabilité des cultures de soya face aux inondations (Pierre, 2015). La stratégie ne permet donc pas d'atténuer les risques d'inondation.

- En contexte de CC, bien que les conséquences soient actuellement plus présentes au nord, les régions nordiques sont elles aussi de plus en plus sujettes aux épisodes de sécheresses estivales et de déficits hydriques (Ouranos). Ces enjeux font d'ailleurs partie des principales préoccupations des agriculteurs de ces régions (Pierre, 2015). La stratégie ne permet donc pas de réduire la vulnérabilité du soya à long terme face aux épisodes de sécheresses.
- La stratégie n'apporte aucun effet considérable sur le contrôle de l'érosion.
- Comme pour le sud de la province, les régions nordiques voient une hausse des conditions météorologiques affectant la production agricole. Les épisodes de grêle, souvent accompagnés de vents violents, sont notamment une menace importante (Pierre, 2015). La stratégie ne permet donc pas d'augmenter la résistance des cultures de soya face aux tempêtes.
- À la lumière des effets potentiels sur l'ensemble des sous-critères, une diminution des coûts reliés aux événements climatiques est possible mais limitée à court/moyen terme, et impossible à long terme.

Puisque quelques effets positifs à court terme sont possibles grâce à la stratégie, mais que plusieurs effets neutres et négatifs peuvent survenir à long terme, la présente stratégie se voit attribuer une cote de 0 pour ce critère.

Critère 3 : Prend avantage du réchauffement du climat et des dérèglements des saisons

- Ce n'est pas l'ensemble des régions nordiques qui présente actuellement des conditions propices aux cultures de soya (Pierre, 2015). Les prévisions à long terme permettront toutefois une implantation plus importante, où les hausses de température et les modifications du calendrier agricole pourront être bénéfiques (Ouranos). La stratégie représente donc une opportunité importante à long terme de mise à profit des saisons estivales plus longues.
- Tout comme dans les régions du sud de la province, les redoux durant l'hiver sont de plus en plus fréquents au nord, et l'épaisseur du couvert enneigé est à la baisse (Ouranos). Ces enjeux constituent d'ailleurs les deux principales préoccupations des cultivateurs en région nordique (Pierre, 2015). Toutefois, bien que la tendance ait un rythme similaire au nord comme au sud, les régions septentrionales demeurent plus froides. Les impacts sur les cultures de soya sont donc

actuellement moindres. De ce fait, la stratégie offre donc un niveau d'adaptation aux saisons hivernales plus courtes et moins froides notoire, mais ce seulement à court/moyen terme.

Puisque la présente stratégie a des effets positifs sur les deux sous-critères, mais ce dans une portée temporelle différente, elle se voit attribuer une cote de 1 pour ce critère.

Critère 4 : Préserve ou enrichit la biodiversité et les services écologiques

- L'étalement agricole cause la destruction de territoires sauvages (Chagnon, 2008). Au Québec, la forêt boréale est l'écosystème le plus important, couvrant 73.3 % du territoire forestier et occupant des fonctions écosystémiques importantes. Celle-ci est toutefois déjà morcelée par l'industrie du bois (Favorel, 2016). La pression supplémentaire qu'imposerait la migration des cultures de soya vers le nord sur les couverts forestiers, mais aussi sur les milieux humides et les plaines sauvages, serait en lien direct avec des pertes d'habitats naturels.
- En plus du morcellement des écosystèmes sauvages causé par l'expansion agricole, les besoins énergétiques à la hausse dans les régions nordiques nécessiteraient l'expansion du réseau de lignes électrique d'Hydro-Québec. La stratégie augmenterait ainsi la fragmentation des habitats naturels (Lesmerises et al., 2013).
- La stratégie rend vulnérables des espèces fauniques et floristiques qui étaient autrefois peu ou pas en contact avec les pressions exercées par la production de soya (Chagnon, 2008). Une migration a donc le potentiel d'augmenter les risques d'extinction des espèces bénéfiques à l'agriculture et de contamination des espèces aquatiques vivant dans les régions nordiques.
- La biodiversité est à son plus riche dans les écosystèmes naturels. La perturbation de ceux-ci par le développement agricole mènerait ainsi à des incidences négatives sur la biodiversité et les BSE.

Bien que la stratégie présente un potentiel de réduction des pressions exercées sur la biodiversité et les BSE au sud, les impacts ressentis au nord seraient trop importants pour qu'elle soit considérée comme compensatoire. Ainsi, puisque la migration des cultures de soya vers le nord aurait des effets négatifs sur l'ensemble des sous-critères, elle se voit attribuer la cote de -2.

Critère 5 : Réduit les vulnérabilités liées aux espèces nuisibles

- Bien que les stratégies d'adaptation aux ennemis des cultures devront évoluer au même rythme que le nouvel environnement de culture, la stratégie ne contribue pas directement aux connaissances sur les ennemis des cultures.
- La stratégie permet de retarder l'arrivée d'espèces nuisibles en provenance du sud. De plus, les conditions climatiques plus froides limitent la prolifération des espèces déjà présentes sur le territoire. Toutefois, les CC mènent à l'extension de l'aire de répartition vers le nord de certains ravageurs, en plus de la hausse des températures globales (Ouranos, 2014). Des conditions bénéfiques à long terme viendront de ce fait mettre une pression sur les cultures de soya du nord de la province (Moiroux & al., 2014). Ainsi, la migration vers le nord offre au soya une meilleure protection face aux espèces nuisibles à court/moyen terme, mais son efficacité est limitée à long terme.
- Dans le même ordre d'idée, les cultivateurs de soya au nord auront plus de temps pour prévoir la migration des espèces nuisibles en provenance du sud (Ouranos). Toutefois, ils devront ajuster leurs stratégies d'adaptation aux nouvelles conditions auxquels le soya sera soumis dans les régions nordiques (Hudon-Voyer, 2021). Ainsi, la stratégie pourrait favoriser l'adaptation anticipative aux espèces nuisibles à moyen/long terme, mais représenter un défi à court terme.
- La migration des cultures de soya est un outil d'adaptation réactive en soi. Comme mentionné, elle permet de retarder les pressions exercées par les espèces nuisibles dans les conditions propices du sud (Ouranos). Toutefois, cette stratégie ne peut être répétée à plusieurs occasions. Elle ne s'avère donc pas être un outil d'adaptation réactive efficace et durable.
- Vu les effets bénéfiques à court/moyen terme, la stratégie a le potentiel de diminuer les coûts reliés à la gestion des espèces nuisibles, mais ce seulement pour un temps limité.

Néanmoins, la migration des cultures de soya vers les régions nordiques du Québec permet de réduire leur vulnérabilité face aux espèces nuisibles dans une portée à court/moyen terme. Toutefois, la stratégie risque de perdre de son efficacité à mesure que les CC évoluent. Ainsi, elle se voit attribuer la cote de 1 pour ce critère.

Critère 6 : Atténue les sources de polluants et les impacts environnementaux directs et indirects attribuables aux cultures de soya

- L'agriculture nordique utilise actuellement peu de pesticides, mais cela peut changer dans le cas d'une intensification des cultures conventionnelles comme le maïs et le soja, l'introduction de nouvelles variétés de plantes et une expansion de l'aire de répartition de certains insectes. Une utilisation beaucoup plus importante de produits phytosanitaires pour contrôler les ennemis des cultures est ainsi plausible. De ce fait, la stratégie met à risque la qualité des eaux de surface et souterraines des régions nordiques. Les ressources souterraines représentent d'ailleurs une importante source d'eau potable pour ces citoyens (Pierre, 2015).
- Premièrement, la conversion des milieux naturels en terres agricoles exploitées représente une nouvelle source d'émissions de N₂O et de CO₂ attribuable à la gestion des sols (MELCC, 2019). Ensuite, la destruction d'écosystèmes forestiers accélère le cycle naturel du carbone. Les forêts voient non seulement leur rôle d'atténuation des GES limité, mais deviennent aussi une source d'émissions (CCMF, 2023). Finalement, l'éloignement des grands centres en régions nordiques complique le transport de l'énergie hydroélectrique vers les fermes (Hydro-Québec, 2023b). Il est donc plus probable que les exploitations de soya des régions nordiques dépendent davantage des énergies fossiles pour l'alimentation des équipements agricoles et le chauffage des bâtiments (Bordeleau, 2023). En conséquence, il est fort probable que la migration des cultures de soya vers le nord du Québec mène à une hausse des émissions de GES attribuables à leur exploitation.
- Les hivers plus rigoureux au nord augmentent les besoins en énergie pour le chauffage (Pierre, 2015). De plus, les taux d'humidité atmosphérique plus importants au nord augmentent les besoins de séchage du soya (OMAFRA, 2017). Ainsi, la stratégie contribuerait à augmenter les besoins en énergie des producteurs de soya.
- On estime que, dans l'ensemble, les forêts du Canada ont un bilan équilibré du carbone, ce qui permet de ralentir le réchauffement de la planète en absorbant le carbone de l'atmosphère (CCFM, 2023). La forêt boréale est d'ailleurs considérée comme le poumon du Québec (Favorel, 2016). De plus, les milieux humides et les prairies sauvages ont aussi une capacité de stockage de carbone (MELCC, 2023a). En plus de relâcher les GES séquestrés, leur destruction au profit de terres agricoles diminuerait drastiquement la capacité de séquestration de GES de ces écosystèmes naturels.

Puisque la présente stratégie a des effets négatifs considérables sur l'ensemble des sous-critères, elle se voit attribuer une cote de -2 pour ce critère.

Critère 7 : Offre des opportunités d'adaptation intéressantes et réalisables pour les cultivateurs

- Les régions nordiques du Québec possèdent un potentiel agricole considérable qui, avec les CC, pourrait être mieux valorisé. Présentement, les taux de rendement du soya sont moindres en régions nordiques. La tendance est toutefois à la hausse (Pierre, 2015). Le potentiel de rendement est donc plus limité à court terme, mais à considérer à moyen/long terme.
- L'éloignement de grands centres reste un défi majeur, non seulement pour ce qui est du coût de production (coûts des intrants), mais également en ce qui concerne l'accès au marché (coûts du transport des marchandises plus élevés). De plus, la relève agricole est plus difficile dans les régions nordiques. La migration de l'agriculture offre toutefois une opportunité de dynamiser le Québec septentrional (Pierre, 2015). Malgré la présence de nombreux défis, il est plausible que la stratégie constitue une opportunité intéressante pour les cultivateurs de soya et les régions du nord, plus particulièrement dans une vision à moyen/long terme.
- Plusieurs enjeux sont à considérer dans l'analyse de faisabilité de cette stratégie. La planification territoriale des régions nordiques du Québec constitue le principal défi, et ce pour ces raisons :
 - Le manque d'expérience et le potentiel agricole du soya non clairement défini
 - Plus de 90 % du territoire nordique est de tenure publique, dont l'industrie forestière est la principale utilisatrice. Toutefois, certaines de leurs pratiques, comme le scarifiage et le reboisement des terres en friche, ont des conséquences à long terme sur le développement agricole. Ces terres sont en effet impropres à l'agriculture sur des périodes allant jusqu'à 50 ans.
 - Les enjeux d'harmonisation des usages des différentes activités sur un territoire en développement (activité forestière, terres protégées et respect des territoires autochtones)
(Pierre, 2015)

Bien que possible, la réalisation de la stratégie est difficile à court/moyen terme. Énormément de travail reste à faire afin de la mettre en action.

- L'exploitation du soya dans les régions nordiques du monde demeure une pratique en développement. Soy Canada souhaite d'ailleurs tenir le Sommet du soya dans le Nord afin de

coordonner les efforts de recherche sur le sujet. Aucune date n'est toutefois confirmée (Soy Canada, 2021). La validation de la stratégie par la présence de documentation de recherches et d'expériences terrain est ainsi toujours limitée.

Puisque la stratégie offre des opportunités d'adaptation intéressantes et réalisables pour les acteurs impliqués, mais ce seulement dans une portée à moyen/long terme, elle se voit attribuer une cote de 1.

RECOMMANDATIONS

À la lumière des résultats obtenus dans l'analyse multicritère, une seule stratégie ne répond pas positivement aux critères d'évaluation, soit celle d'effectuer une migration vers les régions nordiques. Ce chapitre liste en ordre les stratégies à prioriser selon les résultats de cet ouvrage. Il se termine en abordant des pistes de solutions qui n'ont pu être évaluées dans cet essai, mais qui mériteraient plus d'attention lors de recherches futures. Il est essentiel de noter que, malgré qu'elles soient classées par ordre d'importance, aucune stratégie ne devrait être utilisée seule. En effet, c'est leur combinaison qui s'avèrera le plus efficace à l'atteinte d'une résilience significative du soya aux CC. Il est finalement important de rappeler que les résultats de cette recherche sont principalement basés sur des prévisions théoriques. De plus amples expériences pratiques devront être conduites afin de tester leur niveau d'applicabilité et leur potentielle contribution à la résilience du soya.

1. Implanter des CCI en début de saison

Cette stratégie est la plus souhaitable afin d'augmenter la résilience du soya face aux CC à court, moyen et long terme. Son adoption est accessible aux cultivateurs dès maintenant et ne requiert aucun investissement majeur de la part des agriculteurs, des entreprises ou des gouvernements. Les expériences terrain sont toutefois assez récentes et limitées (CEROM, 2022a). Il sera donc important d'effectuer un suivi serré afin de noter sa performance face aux critères d'évaluation à plus long terme, et ce en tenant compte des conditions environnementales et des types de cultures de couvertures utilisées. L'objectif à court/moyen terme est donc de posséder les connaissances nécessaires à l'optimisation des bienfaits de la stratégie, et ce face à l'ensemble des variables externes en évolution.

2. Se tourner vers l'agriculture biologique

La seconde stratégie à prioriser, suivant de très près la première, est l'adoption du soya biologique à grande échelle. L'expertise déjà bien acquise, la présence de normes reconnues et l'accessibilité des programmes de subventions contribuent à rendre la transition accessible aux cultivateurs. De plus, les bienfaits sur la résilience du soya aux CC sont déjà bien documentés. Son niveau d'apport aux critères d'évaluation est finalement d'une importance notoire.

3. Adopter un MCA

Malgré que la stratégie présente un potentiel intéressant d'augmentation de la résilience du soya, sa mise en place n'est pas simple. Pour y arriver, il sera important de prendre exemple sur les initiatives en place ailleurs sur la planète, notamment en Australie avec le « Carbon

Farming Initiative » (Australian Government, 2022) et le projet de MCA en France (Gouvernement de France, 2021). Enfin, de plus amples recherches sur les impacts concrets de sa mise en place devront être conduites afin de prédire les répercussions possibles d'un point de vue environnemental, économique et agronomique.

4. Mettre en place un Programme de valorisation monétaire des BSE

Avant de se lancer dans le processus de création de ce programme, il sera primordial de conduire des recherches poussées afin d'établir les valeurs monétaires des différents milieux et des BSE. Ces prix devront pouvoir s'adapter aux conditions en évolution. Des outils devront être développés afin non seulement de mesurer la valeur des différents milieux, mais aussi afin de prévoir leur fluctuation dans le temps. De plus, une vulgarisation de ces méthodes d'évaluation devra être envisagée pour le grand public afin de faciliter l'acceptabilité sociale.

5. Miser sur les technologies génétiques comme outil de sélection des variétés

La stratégie offre des bénéfices pour la majorité des critères d'évaluation de l'analyse multicritère. Elle est toutefois toujours en développement. Il sera donc essentiel de suivre les avancées et les résultats des études du CEROM et du projet SoyaGen. La sélection génétique pourra ainsi maximiser la résistance et le rendement dans différentes conditions environnementales, augmentant de ce fait la résilience du soya aux CC. Un suivi constant devra de plus être assuré afin de prévenir l'intégration d'EEE, la prolifération d'espèces nuisibles et les risques pour la santé humaine et pour l'environnement.

6. Élargir l'accès au réseau électrique triphasé

Cette stratégie est spécifiquement efficace afin d'atténuer les sources de pollution, mais apporte peu de solutions d'adaptation aux CC. Son adoption demeure tout de même importante afin de réduire la dépendance du domaine agricole aux énergies fossiles, et ainsi diminuer drastiquement les émissions de GES dans l'atmosphère qui y sont attribuables. Toutefois, le plus gros enjeu auquel les instances gouvernementales font face dans le développement du réseau électrique triphasé est lié à l'aménagement du territoire pour le transport de l'énergie. Des études spécifiques aux différents milieux doivent être conduites afin de déterminer les meilleurs tracés et solutions techniques s'offrant à Hydro-Québec pour la construction des lignes électriques. Il sera en effet essentiel de limiter la fragmentation des milieux naturels et la destruction d'écosystèmes offrant des BSE importants, et ce principalement où leurs répercussions pourraient être ressenties sur le rendement du soya. Finalement, il pourrait s'avérer intéressant pour les producteurs de soya de pallier leurs

besoins énergétiques par la production d'électricité durable autonome, avec les technologies de l'éolien et/ou du solaire.

7. Effectuer une migration des cultures de soya vers les régions nordiques

Cette stratégie se classe finalement dernière parmi celles analysées, principalement en raison des impacts potentiels sur la biodiversité et les BSE, la santé des sols et la qualité de l'air et de l'eau. D'un point de vue strictement agronomique, la migration des cultures de soya vers les régions nordiques du Québec peut s'avérer une stratégie efficace de résilience aux CC. Toutefois, d'un point de vue environnemental plus global, il ne s'agit pas d'une solution durable. Elle est lourde de conséquences dans une portée à court terme, et son efficacité est limitée à long terme.

Il est toutefois possible, dans un contexte où les effets des CC deviendraient trop importants pour les productions de soya au sud, que la stratégie soit de plus en plus considérée au fil du temps (Ouranos, 2015). Si la situation se présente, les recommandations suivantes seront à considérer afin d'augmenter le niveau de durabilité de la migration des cultures de soya vers les régions nordiques québécoises :

- Mieux documenter le potentiel agronomique des sols afin de mieux les protéger pour un développement futur;
- Mieux documenter les impacts potentiels du développement agricole des régions nordiques du Québec afin d'instaurer un modèle de développement des territoires non développés basé sur l'agriculture durable, respectueuse de l'environnement et qui permet la préservation et la connectivité des milieux naturels.
- Optimiser l'utilisation des sols à vocation agricole avant de considérer leur expansion.
- Se pencher sur le défi d'approvisionnement en énergie. Considérer des méthodes de transport et d'utilisation qui prennent en compte les enjeux de fragmentation des habitats naturels et de pollution de l'air.

(Pierre, 2015)

Il est finalement important de considérer qu'une migration vers le nord ne fera que retarder les effets des CC sur les cultures de soya. La combinaison avec d'autres stratégies d'adaptation et

d'atténuation efficaces devra de ce fait toujours être adoptée pour permettre un niveau de résilience significatif.

En plus du contenu de cette liste, d'autres stratégies devraient être considérées afin d'augmenter la résilience du soya québécois face aux CC. En premier lieu, il est primordial de miser sur l'éducation. Afin de garantir une relève agricole, il est important d'investir dans les programmes de formation et d'offrir des conditions attirantes pour la jeunesse. De plus, une emphase particulière sur la formation continue constitue aussi une stratégie intéressante afin de favoriser le partage des connaissances, et ce à long terme. Des programmes de bourses et de réduction des primes d'assurances pourraient être adoptés afin d'encourager les agriculteurs à suivre des formations de façon régulière. Enfin, le fait de faciliter l'accès à l'information pour les agriculteurs favorise grandement le partage des savoirs. Il pourrait donc s'avérer utile de créer un guichet unique où tous les programmes peuvent être consultés (Équiterre, 2022a).

Ensuite, la mise à profit et le développement des technologies de phytoprotection constituent un outil important pour lutter contre les ennemis des cultures de soya. Celles-ci sont en fait un outil supplémentaire de la gestion intégrée des ennemis des cultures. Elles visent à développer des méthodes de surveillance, de prévention et de contrôle des ravageurs, des maladies et des mauvaises herbes pour maintenir la rentabilité des entreprises agricoles. La phytoprotection est divisée en quatre catégories :

- L'entomologie : étude des insectes visant principalement la réduction de l'utilisation de produits phytosanitaires à haut risque pour la santé et l'environnement.
- La malherbologie : étude des mauvaises herbes et des moyens pour réduire leur incidence sur la production agricole.
- La phytopathologie : étude de maladies des plantes. Vise à faire avancer la recherche sur les pathologies végétales pour s'adapter à l'évolution des CC.
- La biosurveillance : outils de surveillance des facteurs de risque et de l'évolution des populations d'ennemis des cultures et de leurs agents de lutte. L'évolution technologique permet des prises d'information plus précises et la création de modèles prévisionnels dynamiques.

(CEROM, 2022b)

Le CEROM travaille actuellement au développement et à l'implantation de ces pratiques dans les fermes du Québec. Il sera ainsi important de suivre des avancées et d'encourager les cultivateurs de soya à adopter et investir dans ces technologies.

Finalement, la possibilité d'adopter un programme basé sur des mesures d'écoconditionnalité pourrait aussi s'avérer une stratégie intéressante afin d'augmenter la résilience du soya québécois aux CC. L'OCDE définit l'écoconditionnalité comme étant « un système selon lequel l'octroi d'un soutien agricole est lié au respect de conditions ou des réglementations environnementales » (OCDE, 2008). De ce fait, en plus de s'appuyer sur le principe de pollueur-payeur, un programme d'écoconditionnalité permet aux entreprises avec de bonnes performances environnementales de recevoir du financement gouvernemental (Équiterre, 2022b). Au Québec, seules des réglementations sur la fertilisation et le bilan phosphore sont présentement en place. Toutefois, aucune mesure d'écoconditionnalité réglementaire n'est applicable aux nombreuses autres conséquences environnementales attribuables aux cultures de soya, énoncées au chapitre 2. Ces mesures devraient donc être élargies à l'ensemble des conséquences environnementales imputables à l'agriculture au Québec avec l'adoption d'un Programme d'écoconditionnalité réglementaire. Il aura comme objectif l'adaptation du secteur agricole à un climat en plein bouleversement et la lutte aux changements climatiques (Équiterre, 2020). La présente stratégie propose donc d'élargir les réglementations à l'ensemble des pratiques agricoles ayant des répercussions sur l'environnement, et ce à l'aide de plans spécialisés. En plus du respect des règlements inclus dans chacun des plans, il est primordial de déterminer le seuil de référence des bonnes pratiques soumises à l'écoconditionnalité. Les producteurs agricoles se verront ainsi attribuer du financement en fonction du respect ou du non-respect des règlements et de ces seuils, et ce en s'appuyant sur les mécanismes existants de soutien des revenus agricoles (Camirand & Bachand, 2012). En conséquence, les bénéfices encourus par les producteurs accéléreront le processus d'adaptation aux CC et de réduction des méfaits, contribuant ainsi à la résilience des cultures de soya québécois. Voici donc la liste des plans proposés :

- Plan de fertilisation raisonné et normes d'application resserrées
 - Plan de conservation et de santé des sols
 - Plan de réduction des émissions de GES
 - Plan de gestion intégrée des ennemis des cultures
 - Plan de gestion intégrée de l'eau
 - Plan de sobriété et d'efficacité énergétiques
 - Plan de protection et de préservation de la biodiversité
- (Équiterre, 2022b), (Camirand & Bachand, 2012)

CONCLUSION

En contexte de CC et de hausse démographique mondiale, une pression sans précédent est exercée sur les systèmes agroalimentaires (FAO, 2022). Le Québec n’y échappe pas, et la proportion de citoyens souffrant d’insécurité alimentaire est à la hausse (Bordeleau, 2022). Le GIEC (2014) prévoit une diminution marquée des taux de rendement des cultures à l’échelle mondiale dans les prochaines décennies. Afin de répondre à cet enjeu majeur, l’exploitation du soya a été identifiée comme une avenue pouvant offrir des opportunités de répondre à la demande alimentaire grandissante de la province, et ce, tout en composant avec les conséquences des CC. Il est toutefois essentiel de s’assurer que le niveau de résilience du soya soit optimal. Ainsi, une évaluation de stratégies pouvant potentiellement y contribuer a donc été conduite. Avant tout, un portrait détaillé de la culture du soya au Québec, de son impact sur l’environnement et des effets directs et indirects des CC sur celle-ci devait être présenté. Il a permis de faire ressortir les enjeux à considérer afin d’atteindre l’objectif de recherche. Une sélection de stratégies offrant des solutions aux différents enjeux ainsi que leur analyse selon des critères précis sont présentées au chapitre 5 et 7.

Les résultats démontrent que la majorité des stratégies analysées s’avèrent avoir des répercussions positives à court/moyen terme sur le niveau de résilience du soya, et ce par l’atténuation des méfaits et par son adaptation. Une seule stratégie, soit de faire migrer les cultures de soya vers les régions nordiques de la province, répondait négativement aux critères d’évaluation. Il est ainsi convenu que l’implantation et la documentation des effets des six stratégies à prioriser doivent être faites à court terme, afin de confirmer de façon pratique les résultats de cette recherche théorique. Plusieurs d’entre elles sont déjà en développement. Leur implantation à grande échelle a donc le potentiel d’être réalisée dans un avenir rapproché.

Plusieurs limites ont influencé l’atteinte de l’objectif de cet essai. Premièrement, l’embuche principale fut le nombre limité de documents de recherche et de données se concentrant précisément sur le soya québécois. La plupart des informations trouvées portent sur les cultures de grains en général. Il est en effet difficile d’obtenir des résultats précis sur le soya, principalement en raison de la diversification des types de productions des fermes québécoises. Il peut par exemple s’avérer ardu, sur une terre agricole présentant une rotation de cultures complexes, de quantifier précisément le phosphore lessivé vers les cours d’eau attribuable au soya. Ainsi, un grand nombre des données recueillies présente le risque d’être influencé par les autres types de cultures de l’exploitation agricole.

Ensuite, la latitude offerte par la portée de cet essai aurait pu permettre la rédaction d'un document beaucoup plus étoffé. Les conditions de rédaction ne permettaient cependant pas de s'attarder à tous les enjeux et les stratégies en détail. De plus, certaines stratégies plus globales, telles que la mise en place d'un programme d'écoconditionnalité, auraient pu constituer une recherche à part entière. L'essai se limite ainsi à une synthèse des opportunités pouvant augmenter la résilience, et agit principalement à titre de partage des savoirs. Chacune des stratégies pourra ensuite être étudiée plus en détail dans de futurs ouvrages.

Finalement, l'angle de recherche plus fortement concentrée sur les enjeux environnementaux s'avérait une limite d'un point de vue agronomique. Ainsi, les critères sont basés selon leurs effets sur la résilience du soya à travers une lunette axée sur les conditions environnementales. Il serait toutefois intéressant de reconduire une étude similaire, mais en considérant davantage les enjeux agronomiques.

Il demeure toutefois que cette recherche démontre qu'un grand nombre d'options s'offrent aux systèmes agroalimentaires québécois. Ainsi, en plus de considérer les stratégies évaluées précédemment, il est essentiel que la résilience du soya face aux CC passe par l'éducation et le partage des savoirs efficaces entre les acteurs impliqués. Les actions seront de ce fait prises de façon éclairée, et les avancées technologiques pourront être employées afin de maximiser leur apport potentiel. Il est de plus important de préciser que l'augmentation de la résilience du soya face aux CC est possible seulement par la combinaison de différentes stratégies et par une vision intégrée de l'agriculture dans son environnement.

Il sera intéressant dans le futur de suivre les enjeux d'insécurité alimentaire et de résilience des milieux agricoles face aux CC. Une chose est sûre, la participation de toutes les sphères de la société devra être sollicitée afin de faire face aux nombreux défis qui sont à prévoir dans les prochaines décennies. Une vision plus globale de l'environnement et le respect de l'interconnectivité des milieux s'avèrent finalement essentiels si les sociétés souhaitent continuer de se développer, mais de façon durable.

RÉFÉRENCES

- AgNition Inc. (2018). *Aphid Advisor*. <http://www.aphidapp.com/>
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). (2020). *Diagnostic et solutions de problèmes d'érosion au champ et de drainage de surface*. MAPAQ. <https://agriculture.canada.ca/fr/production-agricole/sols-terres/gestion-sols/diagnostic-solutions-problemes-derosion-au-champ-drainage-surface>
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). (2022). *Perspectives des principales grandes cultures*. https://agriculture.canada.ca/sites/default/files/documents/2022-07/Canada%20perspectives%20des%20principales%20grandes%20cultures_202207.pdf
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). (2023). *Programmes et services agricoles*. <https://agriculture.canada.ca/fr/programmes>
- AgriIMT. (2021). *Prévisions agricoles jusqu'en 2029 - Répercussions des pénuries de main-d'œuvre sur l'avenir de l'agriculture au Québec*. Conseil canadien pour les ressources humaines en agriculture. https://cahrc-ccrha.ca/sites/default/files/2021-11/factsheet_Quebec_FR_web.pdf
- Agri-Motion. (2022). *Semoir de précision : à quoi ça sert-il et comment marche-t-il*. <https://www.agri-motion.com/fr/actualites/semoir-de-precision-a-quoi-ca-sert-il-et-comment-marche-t-il>
- Ainsworth, E., Rogers, A., Vodkin, L., & Schurr, U. (2006). *The Effects of Elevated CO₂ Concentration on Soybean Gene Expression. An Analysis of Growing and Mature Leaves*. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1557602/>
- Alternative Land Use Services (ALUS). (2023). *Agriculture durable et protection de l'environnement*. <https://alus.ca/fr/notre-travail/>
- Archambeaud, M. (2008). *Dégradation des sols*. Le portail de l'agriculture de conservation. <https://agriculture-de-conservation.com/Degradation-des-sols.html>
- Atlas agroclimatique du Québec. (2012). Agrométéo Québec. Repéré à <http://www.agrometeo.org/atlas/>
- Australian Government. (2022). *Carbon Farming Initiative*. Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water. <https://www.dcceew.gov.au/water/policy/policy/carbon-farming-initiative>
- Baril-Gilbert, M. (2013). *Stratégie de valorisation des biens et services environnementaux en milieu agricole*. CUFE. https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/7012/cufe_Baril-Gilbert_Merani_essai330.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Baumol, W. & Stigler, G. (2011). *Price System*. Encyclopedia Britannica. <https://www.britannica.com/topic/price-system>
- Bordeleau, J-L. (2022). *Le Québec, champion canadien de la sécurité alimentaire*. Le Devoir. <https://www.ledevoir.com/societe/751518/le-quebec-champion-canadien-de-la-securite-alimentaire>

- Bordeleau, L.-C. (2023). *Le portrait des émissions de GES du secteur bioalimentaire québécois*. Bioclips – Actualité bioalimentaire. https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/BioClips2023/Volume_31_no8.pdf
- Borenstein, S. (2022). *Les changements climatiques et le secteur agricole menacent les insectes*. Associated Press. <https://www.ledevoir.com/depeches/701895/les-changements-climatiques-et-le-secteur-agricole-menacent-les-insectes>
- Boulay, S., & Gélard, M.-L. (2013). *Vivre le sable : une introduction*. <https://journals.openedition.org/tc/7196>
- Boutin, D., Brunelle, J.-A., Debailleul, G., Richardson, M., & Sanscartier, R. (2011). *Contribution des systèmes de production biologique à l'agriculture durable*. MDDEP. https://www.environnement.gouv.qc.ca/milieu_agri/agricole/rapport-contribution-systeme-prod-bio-agriculture-durable.pdf
- Brodeur, J., Boivin, G., Cloutier, C., Doyon, J., Grenier, P. et Gagnon, A.-È. (2013). *Impact des changements climatiques sur le synchronisme entre les ravageurs et leurs ennemis naturels : conséquences sur la lutte biologique en milieu agricole au Québec*. http://www.ouranos.ca/media/publication/302_RapportBrodeur2013.pdf
- Brusa-Pasqué, B. (2020). *Hydroélectricité : diversité et spécificités*. Encyclopédie de l'énergie. <https://www.encyclopedie-energie.org/hydroelectricite-diversite-specificites/>
- Bulletin des agriculteurs. (2020). *Chauler pour un sol en santé*. <https://www.lebulletin.com/cultures/chauler-pour-un-sol-en-sante-106090>
- Bulletin des agriculteurs. (2022). *Guide soya 2022*. https://static.lebulletin.com/wp-content/uploads/2021/10/2022_Guide-soya.pdf
- Cadieux, C. (2022). *Comment conserver les organismes bénéfiques près des cultures de maïs, de soya et de blé en Montérégie*. https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/19793/cadieux_chrystine_MEnv_2022.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- Cai, H., Wang, M., Elgowainy, A., & Han, J. (2015). *Updated N2O Emissions for Soybean Fields*. Argonne National Laboratory. <file:///C:/Users/Admin/Downloads/Updates%20to%20N2O%20Emissions%20from%20Soybean%20Fields.pdf>
- Camirand, J. & Bachand, N. (2012). *Écoconditionnalité : de la parole aux actes. Lier le soutien de l'agriculture à l'adoption de bonnes pratiques agroenvironnementales*. Nature Québec & Équiterre. https://legacy.equiterre.org/sites/fichiers/rapport_ecoconditionnalite.pdf
- Caulus, A. (2020). *Effets des pratiques de chaulage sur le fonctionnement des prairies*. Biodiversité et écologie. https://hal.inrae.fr/hal-02791167/file/Caulus_M1_18_1.pdf
- Centre d'enseignement et de recherches en foresterie de Sainte-Foy inc. (CERFO). (2022). *Marchés du carbone en agriculture*. MELCC. https://www.agrireseau.net/documents/Document_110220.pdf

- Centre de recherche sur les grains (CEROM). (2021). *Rapport annuel 2021*. https://cerom.qc.ca/wp-content/uploads/2022/08/Rapport_Annuel_2021-Cerom.pdf
- Centre de recherche sur les grains (CEROM). (2022a). *Essais d'implantation de cultures de couverture dans le soya au dernier sarclage mécanique*. <https://www.laterre.ca/productions/grains/essais-dimplantation-de-cultures-de-couverture-dans-le-soya-au-dernier-sarclage-mecanique/#:~:text=En%202021%2C%20le%20C%3%89ROM%20et,afin%20de%20mesurer%20et%20de>
- Centre de recherche sur les grains (CEROM). (2022b). *Des solutions innovantes pour une agriculture durable et rentable*. <https://cerom.qc.ca/>
- Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ). (2023). *Réussir ma transition*. <https://viragebio.craaq.qc.ca/reussir-transition/ressources-techniques/ressources-techniques>
- Conseil canadien des ministres des forêts (CCMF). *Les forêts : une force stabilisante pour le climat*. <https://www.ccmf.org/la-conscience-climatique/les-forets-une-force-stabilisante-pour-le-climat/>
- Conseil canadien pour les ressources humaines en agriculture (CCRHA). (2021). *Prévisions du marché du travail agricole du Québec jusqu'en 2025*. https://www.agricarrieres.qc.ca/wp-content/uploads/2021/09/factsheet_QC_FR.pdf
- Conseil des académies canadiennes (CAC). (2022). *Solutions climatiques basées sur la nature*. https://www.rapports-cac.ca/wp-content/uploads/2022/12/Carbon-Sinks_FR_Final.pdf
- Conseil des appellations. (2020). *Cahier des charges de l'appellation biologique au Québec*. https://cartv.gouv.qc.ca/app/uploads/2020/11/cahier_des_charges_appellation_bio_fr_v14-5_05102020.pdf
- Conservation de la nature Canada. (2023). *La conservation : une solution naturelle de lutte et d'adaptation aux changements climatiques*. https://www.natureconservancy.ca/assets/documents/qc/Fiche_CC.pdf
- Chagon, M. (2008). *Causes et effets du déclin mondial des pollinisateurs et les moyens d'y remédier*. *Fédération canadienne de la faune*. https://www.agrireseau.net/apiculture/documents/D%C3%A9clin%20poll_FR_MC3_M_Chagnon.pdf
- Charron, I., Ducruc, S., et Lamoureux, M.-È. (2019). Étude sectorielle de la production agricole au Québec : Volet main-d'œuvre. Repéré à <https://www.agricarrieres.qc.ca/generale/lancement-deletude-sectorielle-de-la-production-agricole-au-quebec-volet-main-doeuvre-edition-2019/>
- Denis, L. (2022). *Les prix des aliments ont augmenté de 11 % au Québec, en 2022*. *Le Devoir*. <https://www.ledevoir.com/economie/773395/alimentation-les-prix-des-aliments-ont-augmente-de-11-au-quebec-en-2022>
- Dictionnaire Larousse. (2022). *Résilience*. <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/r%C3%A9silience/68616>

- Données climatiques Canada. (2022). *Changements climatiques et agriculture*.
<https://donneesclimatiques.ca/explorer/secteur/agriculture/page-contexte-module-agriculture/>
- Doucet, R. (2006). *Le climat et les sols agricoles*. Austin, Québec : Éditions Berger
- Dubois, C. (2017). *Recherche sur la protection des écosystèmes - Et si la nature avait un prix?* UdeS.
<https://www.usherbrooke.ca/actualites/nouvelles/details/34618>
- Équiterre. (2013). *Réduire la dépendance du secteur agricole québécois aux énergies fossiles*.
https://legacy.equiterre.org/sites/fichiers/equiterre_rapport_agriculture_et_energies_fossiles.pdf
- Équiterre. (2020). *Vers la création d'un programme Agri-résilience*. Mémoire présenté aux membres du Comité permanent de l'agriculture et de l'agroalimentaire de la Chambre des communes.
https://legacy.equiterre.org/sites/fichiers/comite_agri_-_etude_gre_-_agri-resilience_-_juillet_2020.pdf
- Équiterre. (2022a). *Le pouvoir des sols - Une feuille de route au profit des agriculteurs et de la résilience climatique*. <https://cms.equiterre.org/uploads/Fichiers/pouvoirdessols.pdf>
- Équiterre. (2022b). *Un cadre stratégique agricole ambitieux pour le climat et pour les fermes*. Mémoire présenté dans le cadre des consultations sur le prochain cadre stratégique agricole (2023-2028).
https://cms.equiterre.org/uploads/Fichiers/Memoire-CSA_VFinale.pdf
- Faucher, Y. (2016). *Est-il approprié d'appliquer des fongicides dans le soya au Québec?* Présentation dans le cadre des Journées innovation et progrès en agroalimentaire au Centre-du-Québec (INPACQ), Drummondville, 11 février 2016.
<https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Regions/CentreduQuebec/INPACQ2016/ConferencesGrandescultures/estilappriedappliquer.pdf>
- Favorel, D. (2016). *Analyse de la fragmentation et de la connectivité en forêt boréale aménagée au cours du temps*. UQAM. <https://archipel.uqam.ca/8572/1/M13909.pdf>
- Financière agricole du Québec (FADQ). (2022a). *Développement durable*. <https://www.fadq.qc.ca/tout-pour-la-releve-agricole/vos-ressources/developpement-durable/>
- Financière agricole du Québec (FADQ). (2022b). *Mesures d'écoconditionnalité*.
<https://www.fadq.qc.ca/fileadmin/fr/normes-procedures/mesures-ecoconditionnalite.pdf>
- Gagné, G., Gendreau-Martineau, F., & Wilkinson, J-A. (2017). *Mesures de GES selon quatre itinéraires de transition en grandes cultures biologiques afin d'évaluer leur potentiel de réduction d'émissions*. CETAB+.
https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Agroenvironnement/17_GES-05_Fiche.pdf
- Gagné, G. (2021). *Agriculture et agriculture biologique : sols en culture, émissions de n2o et transition agroécologique*. Institut nationale d'agriculture biologique. https://climatoscope.ca/wp-content/uploads/2021/10/Le_Climatoscope_Num3_2021_GillesGagne.pdf
- Gagnon, A.-È., Labrie, G., & Breault, J. (2015). *Amélioration d'un outil d'aide à la décision pour le contrôle du puceron du soya en intégrant la présence de champignons entomopathogènes*. Stratégie

- physiosanitaire québécoise en agriculture.
https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Agroenvironnement/1648_Rapport.pdf
- Gagnon, A.-È., Roy, M., & Roy, A. (2018). *Impacts directs et indirects des changements climatiques sur les ennemis des cultures – Document synthèse*. https://agriclimat.ca/wp-content/uploads/2018/10/2.-Impacts-droits-et-indirects-des-CC-sur-les-ennemis-des-cultures_Gagnon-et-al.pdf
- Gagnon, B., Ziadi, N., Rochette, P., Chantigny, M. H., et Angers, D. A. (2011). *Fertilizer source influenced nitrous oxide emissions from a clay soil under corn*. *Soil Science Society of America Journal*, 75(2), 595-604.
- Gajevic Sayegh, A. (2019). *La tarification du carbone et l'utilisation de ses revenus*. Université Laval. https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/environnement/publications-adm/plan-economie-verte/rapports-consultation/memoires/force-jeunesse-tarification-carbone_.pdf
- Gajevic Sayegh, A. (2022). *La tarification du carbone et l'utilisation de ses revenus au Québec et au Canada*. Université Laval. <https://id.erudit.org/iderudit/1092341ar>
- Gasser, M.-O., Belzile, L., Martel, S., Perron, M.H, Grondines, H. et Grenier, M. (2015). *Améliorer la productivité des sols par le sous-solage pour réduire les émissions de GES*. Repéré à https://www.agrireseau.net/documents/Document_90319.pdf
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2007). *Contribution du Groupe de travail II au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2014). *Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse : contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2018). *Réchauffement planétaire de 1,5°C*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Summary_Volume_french.pdf
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2022). *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_Full_Report.pdf
- Gouvernement de France. (2021). *Loi climat et résilience : l'écologie dans nos vies*. Ministère de la Transition écologie et de la Cohésion des territoires, Ministère de la Transition écologique. <https://www.ecologie.gouv.fr/loi-climat-resilience>
- Gouvernement du Canada. (2012). *Rouille du soja – Phakopsora pachyrhizi*. <https://inspection.canada.ca/protection-des-vegetaux/especes-envahissantes/maladies/rouille-du-soja/fra/1327501711301/1327501824978>

- Gouvernement du Canada. (2019). *Systèmes de production biologique – Listes de substances permises*. Office des normes générales du Canada. <https://www.publications.gc.ca/site/fra/9.854646/publication.html>
- Gouvernement du Canada. (s.d.). *Groupe de travail sur l'adaptation et la résilience climatique - Rapport définitif*. https://www.canada.ca/content/dam/eccc/migration/cc/content/6/4/7/64778dd5-e2d9-4930-be59-d6db7db5cbc0/wg_report_acr_f_v5.pdf
- Gouvernement du Québec. (2020). *Politique-cadre d'électrification et de lutte contre les changements climatiques*. Plan pour une économie verte 2030. <https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/environnement/publications-adm/plan-economie-verte/plan-economie-verte-2030.pdf>
- Gouvernement du Québec. (2022a). *Culture des grains (céréales et oléagineux)*. <https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/agriculture/industrie-agricole-au-quebec/productions-agricoles/culture-grains-cereales-oleagineux>
- Gouvernement du Québec. (2022b). *Le réseau électrique triphasé : plus accessible que jamais!* <https://www.quebec.ca/nouvelles/actualites/details/reseau-triphas-programme-aide-financiere>
- Gowda, P. H., Steiner, J., Olson, C., Boggess, M., Farrigan, T., et Grusak, M. A. (2018). *Chapter 10: Agriculture and Rural Communities. Impacts, Risks, and Adaptation in the United States: The Fourth National Climate Assessment, Volume II*. U.S. Global Change Research Program. <https://doi.org/10.7930/NCA4.2018.CH10>
- Gutman, A. (2019). *Impact des fongicides foliaires et des néonicotinoïdes sur le puceron du soja et ses ennemis naturels*. Mémoire de maîtrise – UdeM. https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/bitstream/handle/1866/22742/Gutman_Axel_2019_memoire.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Hydro-Québec. (2019). *Les installations électriques d'Hydro-Québec et l'aménagement du territoire*. Rapport de recherche. <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/3712396>
- Hydro-Québec. (2020). *La production d'énergie hydroélectrique au Québec et l'environnement*. Revue des connaissances scientifiques et des mesures d'atténuation des impacts environnementaux et comparaison avec d'autres filières énergétiques. https://issuu.com/hydroquebec/docs/final_avr2021_fr_rapport_hydro_envir_wsp_br_non_i
- Hydro-Québec. (2023a). *Froid extrême : les conseils d'Hydro-Québec pour participer à la réduction de la pointe*. <https://www.newswire.ca/fr/news-releases/froid-extreme-les-conseils-d-hydro-quebec-pour-participer-a-la-reduction-de-la-pointe-868331311.html>
- Hydro-Québec. (2023b). *Transport d'électricité*. <https://www.hydroquebec.com/transenergie/fr/>
- Hudon-Voyer, Rosalie. (2021). *Coûts et bénéfices de l'utilisation de pratiques agroenvironnementales : cas de la MRC de Rouville en Montérégie*. Université de Sherbrooke. https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/18679/hudon_voyer_rosalie_MEnv_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Institut de la statistique du Québec (ISQ). (2022). *Population observée et projetée selon le scénario, Québec, 1986-2066*. <https://statistique.quebec.ca/fr/document/projections-de-population-le-quebec/figure/population-observee-et-projetee-selon-le-scenario-quebec-1986-2066>
- Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). (2022). *À propos*. <https://www.irda.qc.ca/fr/a-propos/>
- Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA). (2023). *Études pédologiques*. <https://www.irda.qc.ca/fr/services/protection-ressources/sante-sols/information-sols/etudes-pedologiques/>
- IRIIS phytoprotection. (2022). *Soya – Symptômes et dommages sur les plantes*. Outil développé par le CRAAQ. <https://www.iriisphytoprotection.qc.ca/RechercheCulture?cg=1&cultureId=51>
- IRIIS phytoprotection. (2023). *Grêle – Soya*. <https://www.iriisphytoprotection.qc.ca/Fiche/ProblemeNonParasitaire?imageId=317>
- Jaworski, C. (2017). *Quel sera l'impact du changement climatique sur la pollinisation?* Aix Marseille University – IMBE. <https://www.axa-research.org/fr/projet/coline-jaworski#:~:text=La%20pollinisation%20par%20les%20animaux,croissance%20de%20la%20population%20humaine>
- Labrecque, Annie. (2019). *Pesticides dans l'agriculture bio : ce qu'il faut savoir*. Agence Science Presse. https://www.scientifique-en-chef.gouv.qc.ca/impacts/ddr_pesticides-dans-agriculture-ce-quil-faut-savoir/
- Lesmerises, F., Dussault, C., Drapeau, P. & St-Laurent, M.-H. (2013). *Évaluation des impacts des lignes de transport d'énergie sur l'écologie spatiale du caribou forestier au Québec*. Rapport scientifique présenté à Hydro-Québec, Rimouski (Québec). 56 p. + xii.
- Massey-Cantin, C. (2022). *Qu'est-ce que l'eutrophisation d'un cours d'eau?* Fondation Rivières. <https://fondationrivieres.org/eutrophisation-cours-deau/>
- Michaud, A. (s.d.). *La valorisation monétaire des services écosystémiques, un avenir pour la conservation*. <http://innovationsocialeusp.ca/crits/blogue/la-valorisation-monetaire-des-services-ecosystemiques-un-avenir-pour-la-conservation?>
- Mimee, B., Brodeur, J., Bourgeois, G., et Moiroux, J. (2014). *Quels enjeux représentent les changements climatiques en lien avec les espèces exotiques envahissantes pour la culture du soya au Québec?* https://www.agrireseau.net/documents/Document_87868.pdf
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). (2011). *Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021*. https://www.agrireseau.net/agroenvironnement/documents/Strategie_phytosanitaire.pdf
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). (2020a). *Agir, pour une agriculture durable - Plan 2020-2030*. https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/agriculture-pecheries-alimentation/publications-adm/dossier/plan_agriculture_durable/PL_agriculture_durable_MAPAQ.pdf?1661972140

- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). (2020b). *Portrait-diagnostic sectoriel de l'Industrie des grains au Québec*.
<https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Monographiegrain.pdf>
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). (2022a). *Gestion des ennemis des cultures*.
<https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Productions/Agroenvironnement/reductionpesticides/gestionennemiscultures/Pages/Ennemisdescultures.aspx>
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). (2022b). *La protection des pollinisateurs*. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/pesticides/strategie2015-2018/pollinisateurs.htm>
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). (2022c). *Plan d'intervention pour la protection des pollinisateurs en milieu agricole 2020-2030*. https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/agriculture-pecheries-alimentation/politique-bioalimentaire/agriculture-durable/PL_pollinisateurs_MAPAQ.pdf?1655819134
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). (2022d). *Soutien aux producteurs*.
<https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Productions/Agroenvironnement/mesuresappui/Pages/mesuresappui.aspx>
- Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ). (2023). *Réseau d'avertissements phytosanitaires (RAP)*.
<https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Productions/Protectiondescultures/Pages/reseau.aspx>
- Ministère de l'Économie, de l'Innovation et de l'Énergie (MEIE). (2023). Hydroélectricité.
<https://www.economie.gouv.qc.ca/bibliotheques/le-secteur/hydroelectricite>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC). (2015). *Stratégie québécoise sur les pesticides 2015-2018*.
<http://www.environnement.gouv.qc.ca/pesticides/strategie2015-2018/strategie.pdf>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC). (2016). *Prévenir la contamination de l'eau souterraine par les pesticides*. <https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/environnement/pesticides/prevenir-contamination-eau-souterraine-depliant.pdf>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCC). (2019). *Inventaire québécois des émissions de gaz à effet de serre en 2019 et leur évolution depuis 1990*.
<https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/2019/inventaire1990-2019.pdf>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCC). (2020). *Les néonicotinoïdes : état des connaissances de leurs impacts sur les organismes aquatiques*. <http://www.environnement.gouv.qc.ca/pesticides/rapport/neonics-etat-connaissancesimpacts-organismes-aqua.pdf>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCC). (2022a). *Atlas de l'eau – Pesticides en eaux de surface*.

https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/atlas/atlas-argis/index.html?extent=-10403280.9947%2C5151985.9016%2C-6254890.5956%2C7147909.5842%2C102100&showLayers=Pesticides_surface_1999_%C3%A0_2020_6238_929%3BPesticides_surface_1999_%C3%A0_2020_6238_929_4515%3BPesticides_surface_1999_%C3%A0_2020_6238_929_4515_3985%3BPesticides_surface_1999_%C3%A0_2020_9264_9246_3935%3BSDA_WMS_8004_2726_9652_4282_0%3BSDA_WMS_8004_2726_2%3BSDA_WMS_8004_2726_9652_1%3BSDA_WMS_8004_4

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCC). (2022b). *Atlas de l'eau – Agriculture*.

https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/atlas/atlas-argis/index.html?extent=-10026140.6544%2C5333298.1956%2C-6269107.8402%2C7140881.0404%2C102100&showLayers=Phosphore_en_parcelles_agricoles_5762%3BPhosphore_en_parcelles_agricoles_9923%3BPhosphore_en_parcelles_agricoles_5751%3BPhosphore_en_parcelles_agricoles_250%3BZGIEBV_5920%3BSDA_WMS_8004_2726_9652_4282_0%3BSDA_WMS_8004_2726_2%3BSDA_WMS_8004_2726_9652_1%3BSDA_WMS_8004_4

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCC). (2022c). *Guide de quantification des émissions de gaz à effet de serre*.

<https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/ges/guide-quantification/guide-quantification-ges.pdf>

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCC). (2023a). *Conservation des milieux humides et hydriques*.

<https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/rives/milieuxhumides.htm>

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCC). (2023b). *Eaux souterraines*.

<https://www.environnement.gouv.qc.ca/Eau/souterraines/index.htm>

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCC). (2023b). *Le marché du carbone, un outil pour la croissance économique verte!*

<https://www.environnement.gouv.qc.ca/changementsclimatiques/marche-carbone.asp>

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCC). (2023c). *Plan directeur en transition énergétique – TEQ*.

<https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/plan-directeur-en-transition-energetique>

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCC). (2023d). *Renseignements sur le système de plafonnement et d'échange de droits d'émission de GES (SPEDE)*.

<https://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/carbone/Emetteurs-participants.htm>

Ministère de l'Énergie et des ressources naturelles (MERN). (2020). *Programme d'extension du réseau triphasé*. <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/4168297>

Ministère ontarien de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales (OMAFRA). (2017). *Guide agronomique des grandes cultures*. <https://www.ontario.ca/files/2022-10/omafra-agronomy-guide-for-field-crops-fr-2022-10-13.pdf>

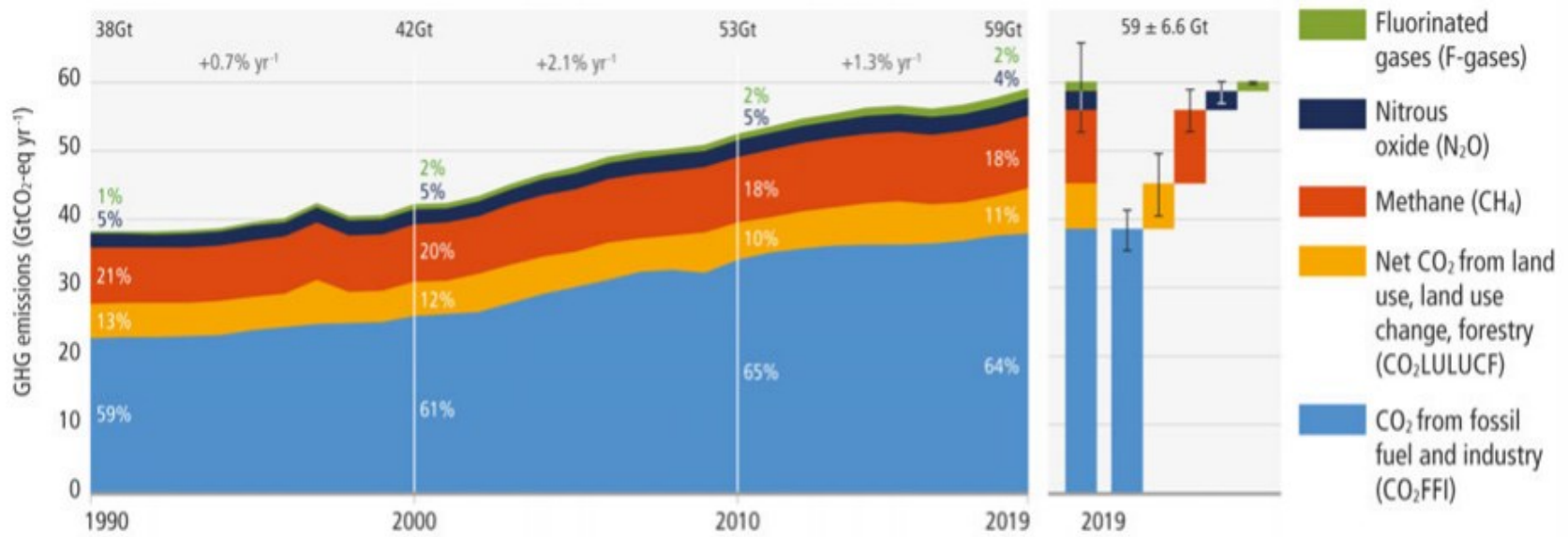
- Ministère ontarien de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales (OMAFRA). (2023). *L'érosion du sol : causes et effets*. <https://www.ontario.ca/fr/page/lerosion-du-sol-causes-et-effets#section-0>
- Moiroux J., G. Bourgeois, G. Boivin et J. Brodeur. (2014). *Impact différentiel du réchauffement climatique sur les insectes ravageurs des cultures et leurs ennemis naturels: implications en agriculture*. <https://www.agrireseau.net/Agroclimatologie/documents/Impact%20rechauf%20clim%20ravagEURS%20et%20ennemis.pdf>
- Moteur de recherche. (2021). *Les nouvelles technologies, plus que jamais au service de l'agriculture*. Chronique Ohdio. <https://ici.radio-canada.ca/ohdio/premiere/emissions/moteur-de-recherche/segments/chronique/338943/agricole-numerique-revolution-technologique-portrait-industrie>
- National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA). (2022). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide*. Global Monitoring Laboratory - Earth System Research Laboratories. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>
- Office des normes générales du Canada. (2020). *Systèmes de production biologique – Listes des substances permises*. https://publications.gc.ca/collections/collection_2020/ongc-cgsb/P29-32-311-2020-fra.pdf
- Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). (2008). *Perspectives de l'environnement de l'OCDE à l'horizon 2030*. <https://www.oecd.org/fr/environnement/indicateurs-modelisation-perspectives/40200611.pdf>
- Organisation des Nations unies (ONU). (2022). *Population*. <https://www.un.org/fr/global-issues/population>
- Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO). (2022). *Perspectives agricoles de l'OCDE et de la FAO 2022-2031*. <https://www.oecd-ilibrary.org/sites/a2cd9b28-fr/index.html?itemId=/content/component/a2cd9b28-fr>
- Ouimet, C-A. (2008). *Fragmentation, intégrité écologique et parcs nationaux québécois: Analyse de deux indicateurs*. Centre universitaire de formation en environnement - Université de Sherbrooke. https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/7361/cufe_Ouimet_essai49.pdf?sequence=3
- Ouranos, (s.d.). *Comprendre la science de l'adaptation*. <https://www.ouranos.ca/fr/attenuation-adaptation>
- 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. (2022). *Programmation 2020-2025 - Priorités d'adaptation*. <https://www.ouranos.ca/fr/programmation-2020-2025-adaptation>
- Patoine, M. (2017). *Charges de phosphore, d'azote et de matières en suspension à l'embouchure des rivières du Québec – 2009 à 2012*.

- http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/eco_aqua/phosphore/charge-phosphoreazotes2009-2012.pdf
- Pepin, Pascal. (2020). *L'adaptation aux changements climatiques en agriculture: Identification des pratiques et des technologies permettant d'augmenter la résilience des productions végétales du Québec*. Université de Sherbrooke.
https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/17652/Pepin_Pascal_MEnv_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Pierre, G. (2015). *Portrait de l'agriculture nordique du Québec dans un contexte de changements climatiques*. Essai de maîtrise. UdeS.
https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/8016/Pierre_Gaetan_MEnv_2015.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- Pioneer. (s.d.). *Notions de base sur la fertilisation dans le soya*.
https://www.pioneer.com/CMRoot/Pioneer/Canada_fr/agronomie/resume_recherche/12_fertilisation_soya.pdf
- Producteurs de grains du Québec. (2019). *Consultation pour le plan d'électrification et de changements climatiques (PECC)*. <https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/environnement/publications-adm/plan-economie-verte/rapports-consultation/memoires/producteurs-grains.pdf?1606236375>
- Prograin. (2020). *Ventilation et séchage du grain*. <https://prograin.ca/ca/fr/2020/12/01/ventilation-et-sechage-du-grain/>
- Ray, D. K., Gerber, J. S., MacDonald, G. K., et West, P. C. (2015). *Climate variation explains a third of global crop yield variability*. *Nature Communications*, 6(1), 5989.
<https://doi.org/10.1038/ncomms6989>
- Rayfield, B., Larocque, G., Martins, K., Lucet, V., Daniel, C., & Gonzalez, A. (2021). *Modélisation de la connectivité de l'habitat terrestre dans les basses-terres du Saint-Laurent selon différents scénarios de changements climatiques et d'occupation des sols*.
https://quebio.ca/sites/default/files/reports/Modelisation_connectivite_btstl_juillet2021.pdf
- Rasouli, S., Whalen, J. K., et Madramootoo, C. A. (2014). *Reducing residual soil nitrogen losses from agroecosystems for surface water protection in Quebec and Ontario, Canada: Best management practices, policies and perspectives*. *Canadian Journal of Soil Science*, 94(2), 109-127.
- Relyea, R. A. (2009). *A cocktail of contaminants: how mixtures of pesticides at low concentrations affect aquatic communities*. *Oecologia*, 159(2), 363-376.
- Robert, L. (s.d.). *Réduire les GES au champ*. MAPAQ.
<https://www.agrireseau.net/grandescultures/documents/R%C3%A9duire%20les%20GES%20au%20champ.pdf>
- Roberts, R. (2007). *Where Do Prices Come From?* The Library of Economics and Liberty. <https://www.econlib.org/library/Columns/y2007/Robertsprices.html>

- Sabourin, M. (2021). *Hydraulique et hydroélectricité : les enjeux du développement durable*. Encyclopédie de l'énergie. <https://www.encyclopedie-energie.org/hydraulique-hydroelectricite-enjeux-developpement-durable/>
- Saguez, Julien. (2020). *Impacts et défis liés aux changements climatiques pour la gestion des ennemis des grandes cultures au Québec*. CÉROM. https://climatoscope.ca/wp-content/uploads/2020/09/Saguez_44-49_Le_Climatoscope_Num2_2020.pdf
- Santé Canada. (2019). *Le nouveau Guide alimentaire*. 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>
- Santé Canada. (2021a). *Les néonicotinoïdes au Canada*. <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/securite-produits-consommation/rapports-publications/pesticides-lutte-antiparasitaire/fiches-renseignements-autres-ressources/neonicotinoides-au-canada.html>
- Santé Canada. (2021b). *Protection des insectes pollinisateurs*. <https://www.canada.ca/fr/sante-canada/services/securite-produits-consommation/pesticides-lutte-antiparasitaire/agriculteurs-utilisateurs-commerciaux/protection-insectes-pollinisateurs.html>
- Schlenker, W., Roberts, M. J., et Smith, V. K. (2009). *Nonlinear Temperature Effects Indicate Severe Damages to U.S. Crop Yields under Climate Change*. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(37), 15594-15598. JSTOR. <https://www.jstor.org/stable/40484767>
- Searchinger, T., Waite, R., Hanson, C., Ranganathan, J., Dumas, P., et Matthews, E. (2019). *Creating a Sustainable Food Future-A Menu of Solutions to Feed Nearly 10 Billion People by 2050*. World Resources Institute (WRI). <https://www.wri.org/publication/creating-sustainable-foodfuture>
- Soya Canada. (2020). *Le soya canadien : cultivé de façon durable, axé sur les clients*. https://www.canada.ca/content/dam/eccc/migration/cc/content/6/4/7/64778dd5-e2d9-4930-be59-d6db7db5cbc0/wg_report_acr_f_v5.pdf
- Soy Canada. (2021). *Rapport annuel 2021-2022*. https://soycanada.ca/wp-content/uploads/2022/06/2021_Soy_Canada_Annual_Report_FRE.pdf
- SoyGen. (2022). *Résumés*. <https://soyagen.ca/recherche/resumes/>
- Statistique Canada. (2022a). *Estimation de la superficie, du rendement et de la production des principales grandes cultures*. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/cv.action?pid=3210035901>
- Statistique Canada. (2022b). *Estimations de la superficie, du rendement, de la production de maïs-grain et de soya, en utilisant des semences génétiquement modifiées*. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/cv.action?pid=3210004201>
- Statistique Canada. (2022b) *Le Carrefour de statistiques sur l'agriculture*. https://www150.statcan.gc.ca/n1/fr/sujets/agriculture_et_alimentation/entreprise_agricole?sourcecode=3438

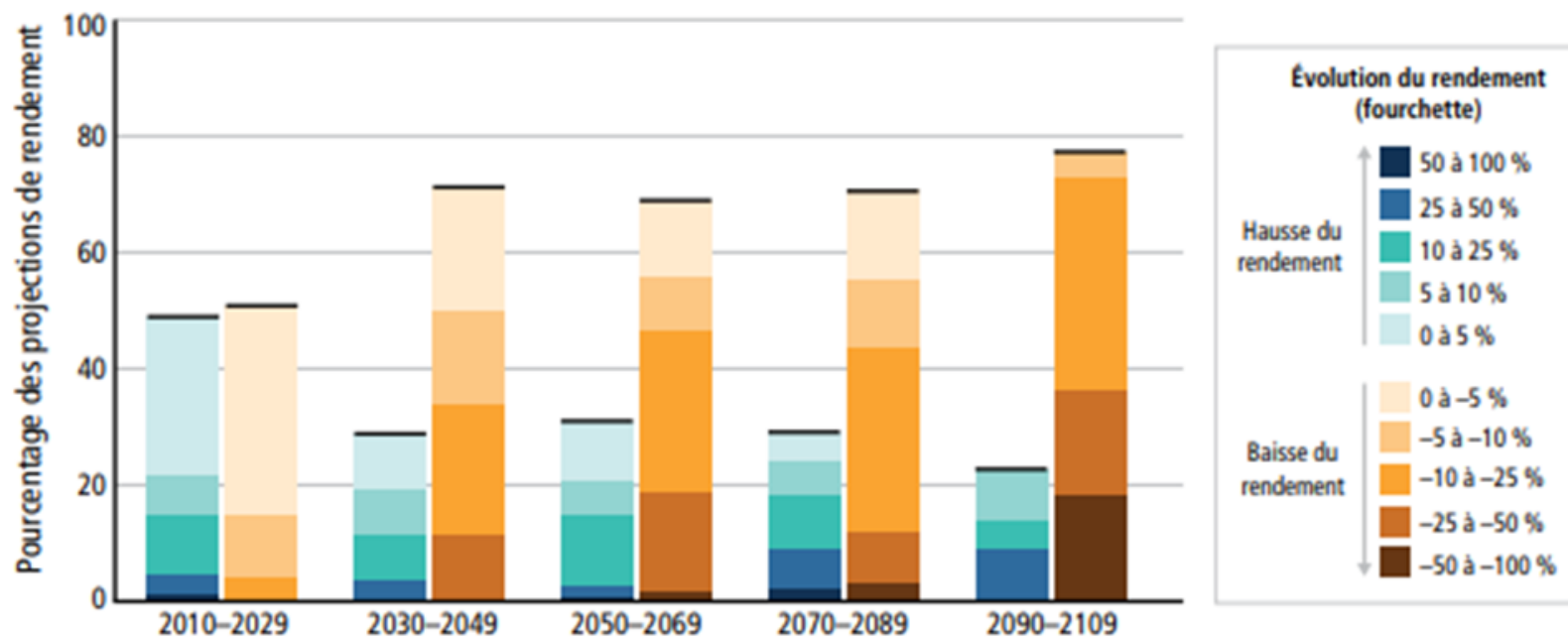
- Statistique Canada. (2022b). *Production Québec*. Producteurs de grains du Québec. <https://www.pgq.ca/articles/services-dinformation-sur-les-marches/portrait-quebec/production-quebec/>
- Statistique Canada. (2022c). *Recensement de l'agriculture de 2021 du Canada : Une histoire sur la transformation de l'industrie agricole et l'adaptabilité des exploitants agricoles canadiens*. <https://www150.statcan.gc.ca/n1/daily-quotidien/220511/dq220511a-fra.htm>
- Statistique Canada. (2022e). *Recettes monétaires agricoles*. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/cv.action?pid=3210004501>
- Statistique Canada. (2023). *Estimations de la superficie, du rendement, de la production de maïs-grain et de soya, en utilisant des semences génétiquement modifiées, en unités métriques et impériales*. <https://www150.statcan.gc.ca/t1/tbl1/fr/cv.action?pid=3210004201>
- Strik, R. (2022). *Quelles opportunités pour atteindre une production idéale de protéines animales?* <https://www.hendrix-genetics.com/fr/news/une-production-id%C3%A9ale-de-prot%C3%A9ines-animales/>
- Tremblay, Gilles. (2020). *Les cultivars de soya et les hybrides de maïs-grain plus tardifs sont-ils gages de rendements plus élevés?* AgriRéseau. <https://www.agrireseau.net/blogue/103703/les-cultivars-de-soya-et-les-hybrides-de-mais-grain-plus-tardifs-sont-ils-gages-de-rendements-plus-eleves>
- Union des producteurs agricoles (UPA). (2019). *Consultation pour le Plan d'électrification et de changements climatiques*. <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/4007283>
- Union des producteurs agricoles (UPA). (2022). *L'agriculture au Québec*. <https://www.upa.qc.ca/citoyen/apprendre/lagriculture-au-quebec>
- Union des producteurs agricoles (UPA). (2023a). *Développement de la production biologique*. <https://www.upa.qc.ca/producteur/outils-et-ressources/production-biologique>
- Union des producteurs agricoles (UPA). (2023b). *Programmes d'aide*. <https://www.upa.qc.ca/producteur/outils-et-ressources/programme-daide>
- Vanasse, A., S. Thibaut, A. Weill. (2022). *Guides des cultures de couverture en grandes cultures*. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ)
- Wallace, J., Frick, B., Martens, J.T., Telford, L. (2019). *Guide de production biologique des grandes cultures*. 3^e édition, Tome 1. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ).
- Whitmore, J. et P.-O. Pineau. (2022). *État de l'énergie au Québec 2022*. Chaire de gestion du secteur de l'énergie, HEC Montréal. https://energie.hec.ca/wp-content/uploads/2022/03/EEQ2022_web.pdf
- Yu, C., Miao, R., & Khanna, M. (2021). *Maladaptation of U.S. corn*. Scientific Reports. <https://www.nature.com/articles/s41598-021-91192-5>
- Zombre, Ulrich. (2019). *Le secteur agricole au Québec*. Bioclips – Actualité bioalimentaire. https://www.mapaq.gouv.qc.ca/SiteCollectionDocuments/Bioclips/BioClips2019/Volume_27_no_28.pdf

ANNEXE 1 - ÉMISSIONS NETS DE GES ANTHROPOGÉNIQUE ENTRE 1990 ET 2019



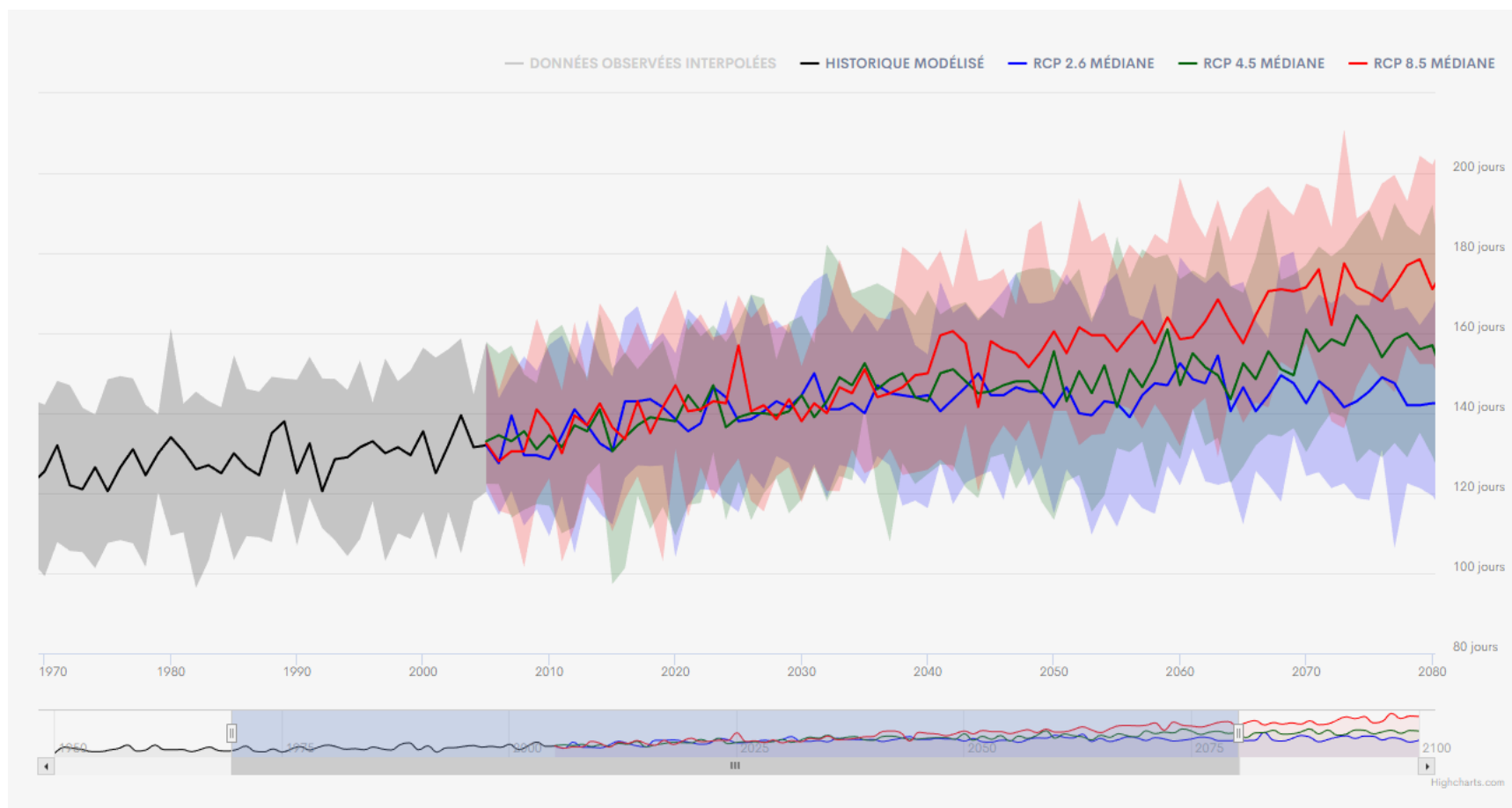
(GIEC, 2022, p. 6)

ANNEXE 2 - PROJECTION DE L'ÉVOLUTION DES RENDEMENTS AGRICOLES MONDIAUX



(GIEC, 2014, p. 15)

ANNEXE 3 - ÉVOLUTION DE LA DURÉE DE LA SAISON DE CROISSANCE AU CANADA



(Données climatiques Canada, 2022)