CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET PHYTOPROTECTION AU QUÉBEC

SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

JUIN 2019

AUTEURS

Annabelle Firlej[1], **Julien Saguez**[2]

[1] IRDA, Saint-Bruno-de-Montarville; [2] CÉROM Saint-Mathieu-de-Beloeil

RÉVISEURS

Marie-Pier Ricard - IRDA
Élisabeth Ménard - IRDA
Mathieu Neau - CÉROM

RÉVISEURS EXTERNES

Anne Blondlot - OURANOS
Marianne St-Laurent – MAPAQ
Valérie Fournier – Université Laval
Gaétan Bourgeois - Agriculture et Agroalimentaire Canada - CRD Saint-Jean-sur-Richelieu
Martin Laforest - Agriculture et Agroalimentaire Canada - CRD Saint-Jean-sur-Richelieu

Les résultats, opinions et recommandations exprimés dans ce rapport émanent des auteurs et n'engagent aucunement le ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation. Même si une recherche exhaustive a été réalisée sur ce qui existe actuellement au Québec, il se peut qu'involontairement certaines informations, projets, équipes de recherche n'aient pas été mentionnés. Les auteurs s'en excusent et ne peuvent être tenus pour responsables.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier toutes les personnes listées dans l'annexe 1 pour leur partage d'informations ou contributions au document.

FINANCEMENT

Cette synthèse a été réalisée dans le cadre des projets PV-3.2-DP-IRDA-9 et PV 3.2-DP-CÉROM-5 en vertu du sous-volet 3.2 du programme Prime-Vert 2013-2018 et il a bénéficié d'une aide financière du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ) par l'entremise du Fonds vert dans le cadre du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec. Ouranos est un partenaire scientifique et financier du projet. Le laboratoire de bioclimatologie et modélisation d'Agriculture et Agroalimentaire Canada est également un partenaire scientifique de ces projets.

TABLE DES MATIÈRES

Mise en contexte et objectifs 6

1 Introduction 7

1.1 La demande agroalimentaire 7

1.2 La phytoprotection 8

1.3 Les changements climatiques 10

2 Identification des acteurs des recherches et services en phytoprotection au Québec et des sources de financement en lien avec les changements climatiques 11

2.1 Recherches réalisées au Québec 11

2.2 Les services en phytoprotection disponibles au Québec 20

2.2.1 Le Réseau d'avertissements phytosanitaires 20

2.2.2 Laboratoires offrant des tests de résistance, de détection de maladies et de pathogènes. 21

2.2.3 Les organismes de transfert et outils 22

2.3 Autres travaux pertinents réalisés en dehors du Québec 24

2.4 Financement de la recherche sur la phytoprotection et les changements climatiques 26

3 Bilan des études d'impacts et d'adaptation pour la phytoprotection jusqu'en 2019 au Québec 27

3.1. Études d'impacts 27

3.1.1 Études de cas sur les ennemis des cultures 28

3.1.2 Études sur les impacts environnementaux liés à l'utilisation des pesticides 31

3.1.3 Études d'impact sur la biodiversité 32

3.2. Mesures d'adaptation 32

3.2.1. Ateliers de concertation avec les filières agricoles 32

3.2.2 Recherche de mesures d'adaptation dans des régions analogues 33

3.2.3 Mesures d'adaptation identifiées et réalisées depuis 2011 36

3.2.4 Réalisation et utilisation de modèles prévisionnels 48

3.2.5 Transfert de connaissances 48

4 Mesures actuelles et identification des éléments à améliorer pour poursuivre les adaptations aux changements climatiques au Québec 49

4.1 Les mesures actuelles disponibles 49
4.2 Éléments à considérer pour poursuivre l'adaptation 51
4.2.1 Poursuivre l'acquisition de connaissances 51
4.2.2. Le futur des études de cas 53
4.2.3 Développer et valider de nouveaux modèles prévisionnels 54
4.2.4 Utiliser, adapter ou développer de nouveaux outils prévisionnels 57
4.2.5 Développer ou utiliser de nouveaux outils de dépistage 58
4.2.6 Identifier ou développer de nouvelles méthodes de lutte 60
4.2.7 Accroître le maillage entre les différents réseaux de surveillance, les groupes de recherche et les acteurs de la phytoprotection 60
4.2.8 Améliorer le transfert des connaissances 62
4.2.9 Le financement de la recherche 64
Conclusions 65
Références bibliographiques 67
Annexes 71

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des projets financés par le MAPAQ et OURANOS depuis 2015 en lien avec la phytoprotection et les changements climatiques.

Tableau 2 : Liste des études de cas réalisées lors des projets en phytoprotection et changements climatiques depuis 2013.

Tableau 3 : Liste des recommandations pour l'adaptation aux changements climatiques.

Liste des figures

Figure 1 : Composant de la mise en œuvre de la gestion intégrée des cultures (Source - Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture - MAPAQ).

Liste des annexes

Annexe 1: Liste des experts et institutions consultés pour la collecte des informations pour réaliser la synthèse

Annexe 2 : Liste des modèles disponibles dans le logiciel CIPRA en février 2019 (Gracieuseté Dominique Plouffe, Agriculture et Agroalimentaire Canada - CDR Saint-Jean-sur-Richelieu).

Annexe 3 : Modèles CLIMEX publiés pour certains insectes dans l'ouest canadien.

MISE EN CONTEXTE ET OBJECTIFS

La recherche sur les changements climatiques avance à grands pas depuis plusieurs années. Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été créé en 1988 et depuis les rapports sur le sujet se multiplient. Au Québec, la création d'Ouranos en 2001 et du Fonds vert en 2006 a marqué un tournant dans l'acquisition de connaissances sur l'impact des changements climatiques et sur l'élaboration de solutions pour l'adaptation de la société québécoise. De nombreux projets de recherche ciblant la phytoprotection et les changements climatiques ont ainsi été financés depuis plusieurs années par l'entremise du Fonds vert via le Ministère de l'Agriculture des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) et Ouranos.

Dans le cadre d'un appel de projets ciblé sur les *Mesures d'adaptation aux changements climatiques en phytoprotection*, le MAPAQ et Ouranos nous ont mandatés pour entreprendre une analyse globale des résultats des études réalisées à ce jour et pour identifier les besoins futurs à prioriser pour servir au mieux le secteur agricole et la pratique de la phytoprotection dans le contexte des changements climatiques.

Les objectifs de cette synthèse sont :

- Identifier les acteurs des recherches/services en phytoprotection au Québec et les sources de financement;
- Identifier les principaux projets de recherche réalisés au Québec en phytoprotection en lien avec les changements climatiques afin de dresser un portrait dans les différentes cultures;
- Identifier ce qui limite le Québec dans son adaptation aux changements climatiques en matière de phytoprotection;
- Identifier les lacunes à combler en matière de connaissance des impacts des changements climatiques et des mesures d'adaptation en phytoprotection;
- Identifier les actions à entreprendre pour les prochaines années afin d'aider le secteur de la phytoprotection à s'adapter aux impacts des changements climatiques.

1 INTRODUCTION

1.1 LA DEMANDE AGROALIMENTAIRE

Au Québec, la demande agroalimentaire est grandissante, le secteur des productions agricoles a accru ses recettes monétaires de plus de 7 % par année entre 2006 et 2016. Cette performance est attribuable à plusieurs productions telles que le soya, la canneberge et les produits de l'érable. Les principaux produits d'exportation sont premièrement ceux provenant de la culture de céréales et de plantes oléagineuses (surtout le soya) et du maïs, dont les exportations ont augmenté de près de 14 % entre 2016 et 2017. En second lieu, les exportations des produits de cultures de légumes ont connu une progression de 9,5 %. Finalement, celles des autres cultures agricoles, dont la principale composante est la production de sirop d'érable et d'autres produits de l'érable, s'accroissent de près de 7 % par année. Le Québec exporte des produits alimentaires dans plus de 160 pays et c'est vers les États-Unis que 69 % des exportations alimentaires sont vendues. Cela représentait 6 G$ en 2017. Le deuxième lieu principal d'exportation est l'Union européenne avec 7,5 % des exportations alimentaires québécoises.
(MAPAQ: https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/md/statistiques/Pages/exportation.aspx)

En novembre 2017 s'est tenu le sommet de l'alimentation avec l'ensemble des représentants de la chaîne bioalimentaire (agriculture, pêches, transformation, distribution de gros, vente de détail, services alimentaires et restauration) ainsi que les municipalités et les milieux de la santé, de l'environnement, de l'économie, de l'enseignement et, de la recherche. Lors de ce sommet, plusieurs orientations ont été mises de l'avant pour la mise en place de la politique bioalimentaire de 2018-2025. Premièrement, les principaux partenaires et les décideurs de l'industrie bioalimentaire québécoise ont convenu d'atteindre des valeurs monétaires d'exportations internationales de produits bioalimentaires de 14 G$ en 2025. Cela représente une hausse de près de 6 G$ par rapport à 2016. Cette cible répond à une orientation plus générale de conquête des marchés extérieurs par les aliments produits au Québec. Deuxièmement, il a été décidé d'encourager les approches concertées pour protéger la santé et l'environnement en renforçant les initiatives permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre, en poursuivant la croissance du secteur de l'agriculture biologique et en renforçant la réduction des risques liés à l'utilisation des pesticides.

Cette demande agroalimentaire en augmentation concerne par contre une liste restreinte de matières premières. En effet, à travers le monde, ce sont plus de 6000 plantes qui seraient cultivées pour l'alimentation, mais seulement 200 d'entre elles entreraient dans la composition de nos assiettes et seulement une dizaine représenterait les deux tiers de toutes les récoltes mondiales (FAO, 2019). C'est pourquoi la FAO tire la sonnette d'alarme dans son rapport en 2019 sur le risque de pénuries alimentaires lié à la diminution considérable de la biodiversité dans l'agriculture et l'alimentation. Cette diminution pose clairement un risque pour le futur, il est démontré qu'une des meilleures armes pour sécuriser la ressource alimentaire sous les changements climatiques est la diversité de l'agriculture (McNaughton 1977; Chapin et al. 2000; Reusch et al. 2005, Diaz et al. 2006; Hajjar et al. 2008; Hughes et al. 2008). La diversité des espèces de plantes cultivées réduit la présence des ravageurs et des maladies en diluant la disponibilité de leurs plantes hôtes (Chapin et al. 2000). Les paysages agricoles très intensifiés compromettent la suppression des ravageurs (Bianchi et al. 2006; Gardiner et al. 2009) et donc tout le système de la phytoprotection.

1.2 LA PHYTOPROTECTION

La phytoprotection consiste à protéger les cultures contre leurs ennemis et elle n'est pas limitée à l'utilisation de pesticides. Dans ce cadre, il est possible de mettre en place une gestion intégrée des ennemis des cultures, c'est-à-dire une méthode décisionnelle qui consiste à avoir recours à toutes les techniques nécessaires et disponibles pour réduire les populations d'organismes nuisibles de façon efficace et rentable, dans le respect de la santé et de l'environnement. La figure ci-dessous montre les différentes composantes à mettre en place pour une bonne gestion intégrée des ennemis des cultures (**Figure 1**).

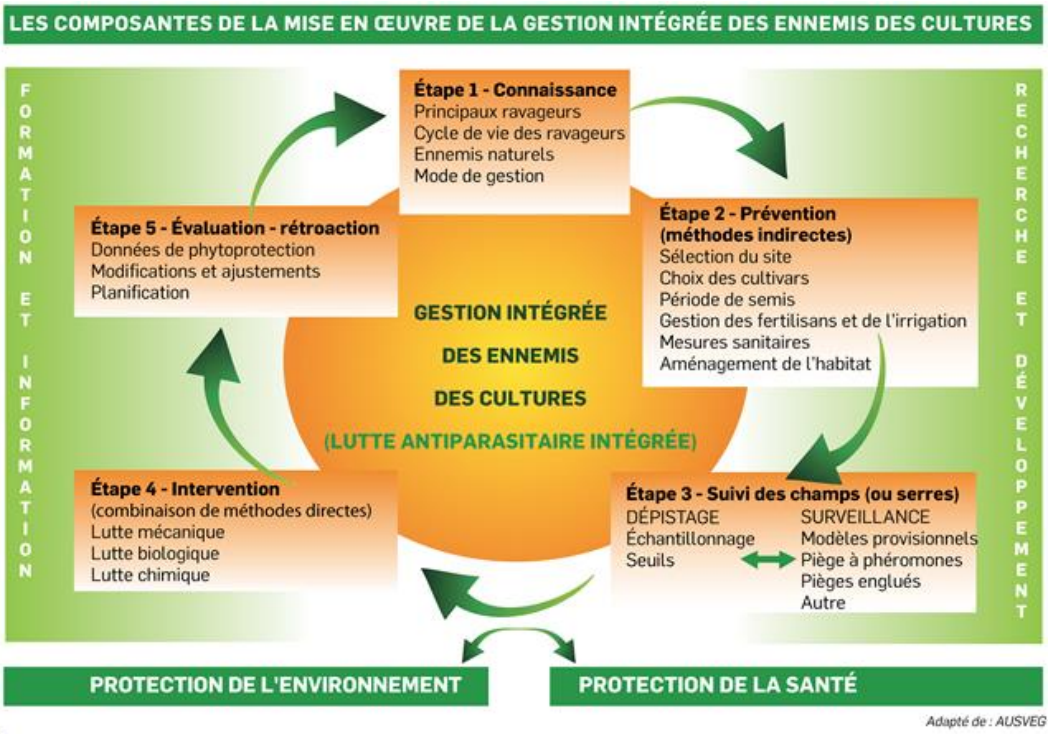

Figure 1: Composant de la mise en œuvre de la gestion intégrée des cultures (Source - Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture - MAPAQ).

La protection des végétaux contre les ennemis des cultures (insectes, plantes adventices, maladies bactériennes, fongiques et virales et nématodes) est un domaine complexe. Elle implique l'ensemble des intervenants du milieu agricole (producteurs, conseillers, techniciens, agronomes et chercheurs) et elle est pluridisciplinaire. La bonne gestion des cultures doit être efficace d'un point de vue agronomique, rentable pour les entreprises agricoles tout en assurant la salubrité des aliments, respecter la santé des consommateurs et des producteurs et minimiser les impacts sur l'environnement.

C'est dans ce cadre que la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture (SPQA) a été mise en place par le MAPAQ avec pour objectif une réduction de 25 % des risques pour la santé et l'environnement liés à l'utilisation des pesticides en milieu agricole. De plus, cette stratégie vise également à accroître l'adoption de la gestion intégrée des ennemis des cultures. Parallèlement, de 2015 à 2018, le ministère du Développement Durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MDDELCC) a mis en place la Stratégie québécoise sur les pesticides, qui pose des objectifs de protection de la santé humaine, des pollinisateurs et de l'environnement.
Les efforts et avancées réalisées depuis plusieurs années en phytoprotection au Québec sont cependant menacés par les changements climatiques puisque ceux-ci influencent

directement les deux systèmes trophiques (plantes et ravageurs) mais pourront aussi avoir un impact sur les alliés des cultures (prédateurs, parasitoïdes, …).

1.3 LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Les changements climatiques planétaires transforment la structure et le fonctionnement de nos écosystèmes naturels ou aménagés. L'augmentation de la température, les précipitations extrêmes dans certaines régions et l'augmentation du taux de gaz à effet de serre atmosphériques représentent les principaux éléments indicateurs de ces changements (Hatfield et al. 2011).

Concernant les plantes cultivées, les scientifiques s'entendent pour dire que même si les rendements globaux des cultures à l'échelle du globe vont augmenter de 1,8 % (Lobell et Gourdji 2012) avec les changements climatiques, certaines cultures seront cependant négativement affectées. Par exemple les cultures de blé, riz, maïs et soya pourraient voir leur rendement diminuer de 6 %, 3,2 %, 7,4 %, 3,1 % respectivement à cause du climat (Zhao et al. 2017). Un climat plus chaud va directement altérer les populations de ravageurs et maladies et l'étude de Deutsch et al. (2018) prédit une augmentation de 10 à 25 % des pertes de rendements attribuables aux insectes pour chaque hausse de 1 °C. Il est connu que les températures plus élevées augmentent le métabolisme des insectes avec comme conséquence d'augmenter leur consommation de végétaux. Certaines espèces présentes dans les régions situées plus au sud de nos latitudes pourraient aussi étendre leur aire de distribution vers le nord (Berteaux 2009). Cependant, en considérant tous ces facteurs pris ensemble (température, humidité, CO_2, etc.), l'effet des changements climatiques sur les insectes peut être complexe et peut varier selon l'espèce ou le groupe fonctionnel (Andrew et Hughes 2004, Parmesan 2006).

Au Québec, ces changements climatiques vont également influencer la biologie des espèces végétales et animales. La température représente l'un des éléments déterminants de la biologie, la physiologie et du comportement des insectes ainsi que de la croissance des plantes. Les précipitations (fréquence et abondance) ont également un impact sur le développement des plantes, mais aussi sur la capacité de certaines maladies, notamment fongiques, à se développer. La hausse des températures et les variations de précipitations vont influencer les interactions entre les plantes et leurs ennemis. Notre capacité à protéger des ravageurs et des maladies les cultures en production durant la saison de croissance va donc probablement changer. L'introduction de nouvelles espèces exotiques envahissantes (EEE), la modification de

la phénologie des plantes, des insectes et des maladies, l'augmentation possible du nombre de générations des ravageurs, ainsi que de la modification du synchronisme entre le ravageur et ses ennemis naturels auront probablement un impact sur la gestion intégrée des ennemis des cultures, mais aussi sur l'utilisation des pesticides.

Les changements climatiques sont souvent perçus comme ayant des effets néfastes. Toutefois, ils peuvent aussi avoir divers effets positifs. On peut notamment penser à une augmentation de la biodiversité en milieu agricole. Le climat futur pourrait aussi être favorable à l'implantation ou à l'augmentation des superficies de cultures commerciales dans des régions agricoles dans lesquelles elles ne sont pas actuellement cultivées. Il sera peut-être aussi possible de développer de nouvelles cultures dans certaines régions et pour lesquelles il y a un marché, un engouement des consommateurs et des conditions de cultures favorables. Des essais sont actuellement réalisés au Québec avec des cultures émergentes comme le chia, le chanvre, le quinoa, ou bien encore l'argousier, la camerise offrant de nouveaux débouchés à l'industrie agroalimentaire (Jochems et al. 2018; Normandin 2019). Par contre, ces cultures peuvent aussi conduire à l'introduction de nouvelles espèces nuisibles qui pourraient potentiellement représenter une menace pour les écosystèmes et pour les cultures déjà implantées dans nos régions.

2 IDENTIFICATION DES ACTEURS DES RECHERCHES ET SERVICES EN PHYTOPROTECTION AU QUÉBEC ET DES SOURCES DE FINANCEMENT EN LIEN AVEC LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

2.1 RECHERCHES RÉALISÉES AU QUÉBEC

Pour mieux gérer les impacts des changements climatiques sur les ennemis des cultures, nous avons identifié les différents acteurs de la recherche qui travaillent ou pourraient travailler sur des projets de phytoprotection en lien avec cette thématique. Nous avons réalisé un tour d'horizon des différentes universités, centres de recherche au Québec et consortium de chercheurs pour déterminer leurs activités dans ce domaine.

Les recherches menées par les universités sur les changements climatiques sont multiples. Chaque université possède un portail Web portant directement sur les cours dispensés en lien avec les changements climatiques et leurs projets de recherche et regroupements de chercheurs. Ce n'est pas la majorité des universités qui ciblent la

phytoprotection et les changements climatiques, puisque les professeurs faisant de la recherche dans le domaine agricole sont peu nombreux. De manière générale, nous pouvons dire que les recherches en milieux universitaires portent sur la vulnérabilité et les impacts du climat futur sur la phytoprotection. Les instituts de recherche paragouvernementaux et gouvernementaux travaillent à la fois sur l'impact des changements climatiques et sur les mesures d'adaptation pour le secteur agricole. Bon nombre de projets de ces institutions sont listés dans le tableau 1.

OURANOS est un consortium de recherche en climatologie et adaptation aux changements climatiques. Il a pour mission d'acquérir et de développer les connaissances sur les changements climatiques, leurs impacts, ainsi que les vulnérabilités socioéconomiques et environnementales, de façon à informer les décideurs sur l'évolution du climat et les aider à identifier, évaluer, promouvoir et mettre en œuvre des stratégies d'adaptation nationales, régionales et locales. OURANOS soutient et collabore à de nombreux projets de recherche interdisciplinaires appliqués, impliquant, des chercheurs de plusieurs institutions gouvernementales et universitaires ainsi que des parties prenantes. Plusieurs de ces projets visent le secteur agricole, à travers la programmation Agriculture, Pêches et Aquaculture commerciales d'Ouranos. En matière de science du climat, OURANOS développe des connaissances et des approches novatrices d'analyse et s'est fixé pour objectifs de produire des projections ou simulations climatiques régionales à haute résolution sur l'Amérique du Nord, avec le Modèle régional canadien du climat 5 (MRCC5), développé par le centre ESCER de l'UQAM et Environnement et Changement Climatique Canada (source : Site web d'OURANOS). Le consortium produit également des scénarios climatiques adaptés aux besoins des projets de recherche soutenus par sa programmation.

L'**Université Bishop (Sherbrooke)** possède un groupe de recherche depuis 2009 composé de onze chercheurs ayant des thématiques de recherche en lien avec les changements climatiques (Multi-scale Climate and Environmental Change Research Group: http://www.muscle.ubishops.ca/home.html). Ce groupe travaille entre autres sur l'impact des changements climatiques sur l'industrie vinicole au Québec. Les travaux du Dr Jones montrent que le climat est maintenant plus propice à la culture de variétés de *Vitis vinifera* plus délicates telles que le Chardonnay, le Sauvignon blanc, le Pinot noir, le Riesling et le Cabernet franc (Jones 2012). Cela aura probablement un impact sur les populations et l'abondance de ravageurs et maladies répondant aux différentes susceptibilités de ces nouvelles variétés pour le Québec. La Dre Jade Savage travaille sur la biodiversité et la composition de populations de diptères (ex. : *Delia* spp. (Loboda et al. 2018)) dans un contexte de changements climatiques. Ses études sur les populations

de diptères sont des connaissances intéressantes considérant que plusieurs ravageurs des cultures (grandes cultures et cultures maraîchères notamment) appartiennent à cet ordre d'insecte.

À l'**Université Laval (Québec)**, le Dr Conrad Cloutier, professeur au département de biologie, étudie la lutte biologique comme méthode contre les insectes ravageurs des plantes et l'effet des méthodes transgéniques sur la régulation naturelle des populations de ravageurs. Récemment, il a étudié l'impact de la température sur les réseaux trophiques d'insectes (parasitoïdes et pucerons) attaquant des plantes d'importance économique, telles que la pomme de terre et le poivron. À l'aide de scénarios climatiques actuels et futurs, son équipe examine expérimentalement l'hypothèse que les insectes herbivores ne seront pas plus, ni moins favorisés que leurs ennemis naturels dans le futur. On peut citer les travaux de doctorat de Sandra Flores-Mejia sur les modèles composés de la pomme de terre, de deux variétés de poivron, de trois biotypes du puceron de la pomme de terre et d'un parasitoïde. La Dre Flores-Mejia a développé trois outils pour évaluer l'effet de la température sur l'ensemble du réseau trophique en utilisant la biomasse produite à chaque niveau trophique.
La Dre Valérie Fournier dirige des projets de recherche liés aux enjeux du déclin des pollinisateurs et de leur conservation en milieu agricole ainsi que des projets en phytoprotection (ex : utilisation d'ennemis naturels dans le cadre de projet en lutte biologique ou en lutte intégrée). En grandes cultures, elle a notamment étudié l'impact des semences traitées aux insecticides néonicotinoïdes sur les populations d'abeilles sauvages et domestiques ainsi que l'impact de la diversification des bandes riveraines sur les pollinisateurs. Dans son laboratoire, la doctorante Amélie Gervais étudie l'impact de l'intensification de l'agriculture et des changements climatiques sur les pollinisateurs indigènes. Elle va observer, à l'aide de jeux de données de 2006 à 2016, s'il y a un changement dans la taille des reines bourdons, un décalage dans leur sortie au printemps et si un clivage d'espèces s'observe dans la communauté de pollinisateurs au Québec. Ses travaux de recherche ne touchent pas directement la phytoprotection, mais la pollinisation influence directement la productivité des cultures. Les approches et outils développés dans cette thèse pourraient être utiles à une échelle plus large en lien avec la biodiversité des espèces de ravageurs et maladies.

À l'**Université de Montréal**, le Dr Jacques Brodeur est titulaire d'une chaire de recherche en lutte biologique et ses recherches visent, en premier lieu, à identifier les principes écologiques et le fonctionnement des interactions trophiques et intraguildes au sein des communautés d'arthropodes herbivores et leurs ennemis naturels. En deuxième lieu, ses études visent à appliquer ces principes à la sélection d'agents de lutte

biologique et à leurs utilisations dans des programmes de lutte intégrée aux insectes nuisibles. Depuis 2007, le Dr Brodeur travaille sur l'effet des changements climatiques sur la phytoprotection. Les travaux de son étudiante au postdoctorat Annabelle Firlej ont porté sur l'effet des changements climatiques (hausse de CO_2) sur un système tritrophique plante-ravageur-ennemi naturel, notamment les effets de la hausse du CO_2 sur la productivité de la plante, l'abondance des pucerons *Myzus persicae* et le contrôle biologique par le parasitoïde *Aphidius ervi* (Firlej et Brodeur 2010, Firlej et al. 2011). Aussi, le post-doctorant Joffrey Moiroux a étudié la désynchronisation influencée par la température entre les ravageurs et ennemis naturels et la création d'un indice de risque d'altération (IRA) (Brodeur et al. 2013). Enfin, l'étudiant au doctorat sous sa direction, Arnaud Sentis, a publié une thèse sur l'effet de la température sur les interactions trophiques et intraguildes au sein d'un système plante-herbivore-ennemis naturels via des approches expérimentales et de modélisation (Sentis 2012).

Parmi les étudiants actuels du Dr Brodeur, Anne-Frédérique Gendron St-Marseille, étudiante à la maîtrise en codirection avec Benjamin Mimee (Agriculture et Agroalimentaire Canada, (AAC), a étudié, les impacts des changements climatiques et des événements météorologiques extrêmes sur les interactions moléculaires entre le nématode endoparasite *Heterodera glycines* et sa plante hôte le soya (Gendron St-Marseille et al. 2015). Enfin, Julie Augustin est une candidate au doctorat, avec comme co-directeurs Guy Boivin (AAC) et Gaétan Bourgeois (AAC), qui étudie l'effet des réchauffements climatiques sur l'optimisation du parasitisme en lutte biologique.

Chaque année, le **Centre de recherche sur les grains** (CÉROM) réalise une centaine de projets de recherche appliquée dans le secteur des grandes cultures (maïs, soya, céréales et canola). Le CÉROM mène actuellement quatre programmes d'amélioration génétique dans le soya (Dre Louise O'Donoughue), le blé de printemps (Dre Silvia Rosa), le blé d'automne et le lin (Dr Michel McElroy), afin de sélectionner les cultivars et hybrides de demain. Les chercheurs réalisent également plusieurs projets en biosurveillance, en malherbologie, en entomologie, en phytopathologie et en régie des cultures. Le CÉROM coordonne ou participe à plusieurs réseaux, parmi lesquels le Réseau d'avertissements phytosanitaires (RAP) grandes cultures qui suit chaque année une quinzaine d'espèces d'ennemis des cultures. Le CÉROM participe également à d'autres réseaux et offre depuis 2014 un service de détection de la résistance des mauvaises herbes aux herbicides.

Au cours des dernières années, le CÉROM a réalisé ou a participé à plusieurs études en lien avec la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture et en lien avec les

changements climatiques, notamment une analyse des approches et des technologies novatrices en termes de surveillance phytosanitaire dans les grandes cultures et les cultures horticoles au Québec (Boucher et al. 2017) et une synthèse sur l'impact des changements climatiques et mesures d'adaptations pour les ravageurs présents et potentiels en grandes cultures au Québec (Saguez 2017) dans le but de renforcer la surveillance des ennemis des cultures.

L'**Institut de recherche et de développement en agroenvironnement** (IRDA) mène des travaux sur la phytoprotection maraîchère et fruitière en agriculture conventionnelle ou biologique avec l'appui de six chercheurs de différentes expertises. Les travaux menés en malherbologie, en entomologie et en phytopathologie visent à mieux comprendre la biologie des ennemis des cultures afin de mieux gérer et réduire l'utilisation des pesticides et de réduire les risques de développement de résistance. Les travaux visent aussi à évaluer l'impact des changements climatiques sur la phytoprotection, et ce, en développant des mesures d'adaptation pour les différents secteurs de cultures. Le Dr Gérald Chouinard, avertisseur du RAP pomme, a mené une étude historique sur 47 années de données sur la phénologie du pommier McIntosh démontrant que le débourrement et la floraison sont survenus 12,7 et 9,4 jours plus tôt au cours des dernières années (Chouinard et al. 2007). Il effectue également des travaux dans le domaine de la gestion intégrée des insectes et des acariens nuisibles et utiles des vergers. La Dre Annabelle Firlej mène, depuis 2016, une étude concernant l'impact des changements climatiques sur les ravageurs et maladies des secteurs fruitiers (pomme, canneberge, fraise et framboise), la potentielle introduction d'espèces exotiques et l'identification des adaptations nécessaires pour chaque secteur de culture par la tenue d'ateliers avec des agronomes et des producteurs. Elle développe et valide des outils pour favoriser l'adaptation du secteur horticole aux changements climatiques par exemple avec la mise au point de l'identification taxonomique d'insectes ravageurs par codage à barres (Firlej et al. 2013, Dieni et Firlej 2018) et la validation de modèles prédictifs de ravageurs/maladies (cécidomyie des atocas, anthracnose, scarabée japonais et moisissure grise) en collaboration avec l'équipe du Dr Gaétan Bourgeois d'AAC (Firlej et al. 2014). Enfin, Josée Boisclair analyse l'effet du climat sur les changements observés sur les populations de pyrales du maïs au Québec entre 1977 et 2017. Son projet va également évaluer les répercussions des facteurs climatiques sur l'évolution future des populations de pyrales du maïs et acquérir de nouvelles connaissances sur la survie hivernale des larves en diapause.

Le **Centre de recherche et de développement** (CRD) de Saint-Jean-sur-Richelieu est un centre de recherche fédéral d'Agriculture et Agroalimentaire Canada. Il mène des

recherches en agriculture depuis 1912 et aide le secteur canadien de l'horticulture à rester compétitif et durable en développant de nouvelles connaissances, en favorisant l'innovation et en augmentant l'adoption et la commercialisation des produits, des pratiques ou des procédés agroalimentaires et agro-industriels.

Trois chercheurs y travaillent principalement sur la phytoprotection en lien avec les changements climatiques. Le Dr Gaétan Bourgeois, spécialiste en bioclimatologie et en modélisation, étudie l'impact de la variabilité climatique sur les cultures et leurs bioagresseurs. Il conceptualise et met au point des modèles bioclimatiques (voir **Annexe 2**) pour la protection et la régie des cultures, au niveau des insectes, des maladies, des désordres physiologiques et des mauvaises herbes. Son équipe a notamment développé le logiciel **CIPRA**, un outil informatique d'aide à la décision disponible au public. Il a notamment un projet en cours sur la conceptualisation et validation des effets de températures non optimales sur les interactions trophiques en cultures horticoles dans un contexte de variabilité climatique. Le Dr Benjamin Mimee développe et valide des programmes de lutte pour les nématodes phytoparasites. Au niveau de la biodiversité, il mesure l'impact des pratiques agricoles sur le microbiote du sol et sur les services écologiques. Il étudie aussi la génomique fonctionnelle et la génétique des populations de nématodes et notamment l'impact des changements climatiques sur le développement et la gestion des nématodes parasites. La Dre Annie-Ève Gagnon étudie l'impact des stress abiotiques sur le développement des insectes ravageurs des cultures, les dommages qu'ils peuvent engendrer ainsi que l'efficacité de la lutte biologique sous des conditions climatiques extrêmes. Ses travaux visent à optimiser les programmes de lutte biologique dans le secteur horticole en vue de réduire l'utilisation des pesticides.

Tous ces centres développent ou valident des outils pertinents dans l'adaptation aux changements climatiques et dont certains sont actuellement financés par le MAPAQ et OURANOS (**Tableau 1**).

Tableau 1: Liste des projets financés par le MAPAQ et/ou OURANOS depuis 2010 en lien avec la phytoprotection et les changements climatiques.

Titre du projet	Date de début	Porteur de projet	Institut Organisme	Programme de financement
Études de cas pour faciliter une gestion efficace des ennemis des cultures dans le contexte de l'augmentation des risques phytosanitaires liés aux changements climatiques	2010	Annie-Ève Gagnon	Ouranos	Ouranos (Fonds vert) et ICAR (RNCan)
Impact des changements climatiques sur le synchronisme entre les ravageurs et leurs ennemis naturels : conséquences sur la lutte biologique en milieu agricole au Québec.	2011	Jacques Brodeur	Université de Montréal	Ouranos (Fonds vert)
Impact des changements climatiques sur la contamination de l'eau de ruissellement par les pesticides : étude de cas pour huit combinaisons cultures ennemis durant la période 1981-2040.	2012	Alain Rousseau et Claudia Sheedy	INRS-ÉTÉ et Agriculture et Agroalimentaire Canada	Agriculture et Agroalimentaire Canada
Quels enjeux représentent les changements climatiques en lien avec les espèces exotiques envahissantes pour la culture du soya au Québec?	2013	Benjamin Mimee et Jacques Brodeur	Agriculture et Agroalimentaire Canada et Université de Montréal	Ouranos (Fonds vert) Agriculture et Agroalimentaire Canada Université de Montréal
Développement d'une méthode de qPCR pour la détection et la quantification	2015	Agathe Vialle	Biopterre - Centre de développement des bioproduits	Prime-Vert sous volet 3.2 (Fonds vert)

hiérarchique et simultanée des agents pathogènes appartenant aux genres *Phytophthora* et *Verticillium*				
Impact des changements climatiques et mesures d'adaptations pour les ravageurs présents et potentiels en grandes cultures au Québec	2015	Annie-Ève Gagnon/Julien Saguez	Centre de recherche sur les grains (CEROM)	Prime-Vert sous volet 3.2 et Ouranos (Fonds vert)
Développement et mise à niveau des méthodes de détection des champignons pathogènes des tissus ligneux de la vigne	2015	Caroline Provost	Centre de recherche agroalimentaire Mirabel (CRAM)	Prime-Vert sous volet 3.2 (Fonds vert)
Amélioration des techniques d'identification moléculaires des ravageurs pour répondre aux besoins en diagnostic du secteur agricole dans le contexte des changements climatiques	2015	Annabelle Firlej	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)	Prime-Vert sous volet 3.2 (Fonds vert)
Analyse des approches et des technologies novatrices en termes de surveillance phytosanitaire dans les grandes cultures et les cultures horticoles au Québec	2016	Annie-Ève Gagnon	Centre de recherche sur les grains (CEROM)	Prime-Vert sous volet 3.2 (Fonds vert)
Adaptation des mesures phytosanitaires pour les ravageurs et maladies des cultures fruitières à l'égard des impacts des changements climatiques	2016	Annabelle Firlej	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)	Prime-Vert sous volet 3.2 et Ouranos (Fonds vert)
Améliorer la surveillance phytosanitaire québécoise par le déploiement de réseaux de capteurs de spores sentinelles	2016	Hervé Van der Heyden	Compagnie de recherche Phytodata inc.	Prime-Vert sous volet 3.2 (Fonds vert)
Évaluation de l'utilisation des drones comme méthode de	2018	Nathalie Roullé	Institut québécois du développement	Prime-Vert sous volet 3.2 (Fonds

surveillance phytosanitaire dans la production du gazon en plaques			de l'horticulture ornementale (IQDHO)	vert)
Évaluation de l'efficacité de quatre types de pièges automatisés pour le suivi de cinq ravageurs d'importance au Québec	2018	Anne-Marie Fortier	Compagnie de recherche Phytodata inc.	Prime-Vert sous volet 3.2 (Fonds vert)
Surveillance à l'échelle régionale de la punaise terne, un ravageur polyphage, dans un contexte de changements climatiques	2018	François Dumont	Centre de recherche agroalimentaire Mirabel (CRAM)	Prime-Vert sous volet 3.2 (Fonds vert)
Adaptation de la surveillance phytosanitaire aux changements climatiques : mieux comprendre les facteurs influençant l'abondance de la pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*) au Québec pour mieux adapter la surveillance et gérer le risque futur du ravage	2018	Josée Boisclair	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)	Prime-Vert sous volet 3.2 (Fonds vert)
Pièges automatisés pour la surveillance phytosanitaire des vergers: évaluation des systèmes actuels et potentiel futur pour le Québec	2018	Gérald Chouinard	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)	Prime-Vert sous volet 3.2 (Fonds vert)
Évaluation de la performance des pièges à insectes automatisés dans certaines cultures maraîchères et fruitières au Québec	2018	Vincent Myrand	Carrefour industriel et expérimental de Lanaudière (CIEL)	Prime-Vert sous volet 3.2 (Fonds vert)
Validation et implantation d'un modèle prévisionnel de la sclérotiniose du soya au Québec	2019	Tanya Copley	Centre de recherche sur les grains (CEROM)	Prime-Vert sous volet 3.2
Élaboration d'une stratégie de dépistage de la mouche du chou et des mouches des semis dans les cultures des	2018	Isabel Lefebvre	Carrefour industriel et expérimental de Lanaudière (CIEL)	Prime-Vert sous volet 3.2 (Fonds vert)

crucifères				
Évaluation du potentiel d'utilisation d'un appareil de PCR portable pour une détection à la ferme de la moisissure grise et de l'anthracnose dans la fraise.	2018	Hervé Van der Heyden	Compagnie de recherche Phytodata inc.	Prime-Vert sous volet 3.2
Développement d'un outil de surveillance du doryphore de la pomme de terre à l'aide d'imagerie de télédétection acquise par un aéronef sans pilote	2018	Vincent Myrand	Carrefour industriel et expérimental de Lanaudière (CIEL)	Prime-Vert sous volet 3.2
Optimisation d'outils d'aide à la décision pour faciliter l'adaptation du secteur petits fruits aux changements climatiques	2018	Annabelle Firlej	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)	Prime-Vert sous volet 3.2 (Fonds vert)
Évaluation de l'efficacité de quatre types de pièges automatisés pour le suivi de cinq ravageurs d'importance au Québec	2018	Anne-Marie Fortier	Phytodata	Prime-Vert sous volet 3.2 (Fonds vert)
Documenter la biologie de la légionnaire uniponctuée afin d'établir une meilleure corrélation entre la capture des papillons et les dommages observés, et ce, dans le but de mieux cibler les interventions. Évaluation de l'impact de la température sur la biologie de l'insecte.	2018	Julien Saguez	CÉROM	Prime-Vert sous volet 4

2.2 Les services en phytoprotection disponibles au Québec

2.2.1 Le Réseau d'avertissements phytosanitaires

Le Réseau d'avertissements phytosanitaires (RAP), créé en 1975, relève de la Direction de la phytoprotection du MAPAQ. Il a pour but d'informer les producteurs et autres

intervenants en agriculture et agroalimentaire du Québec des avertissements, des alertes, des bulletins d'information et des fiches techniques (tous regroupés sous le terme de communiqués) sur la présence et l'évolution des ennemis des cultures ainsi que les stratégies d'intervention pouvant être mise en place contre ces ennemis dans un contexte de régie intégrée et de développement durable. Il existe 19 réseaux de suivi de cultures et un réseau général, couvrant ainsi les principales productions au Québec (fruits, légumes, grandes cultures et cultures ornementales). Chaque réseau est constitué d'un avertisseur entouré d'un groupe d'experts multidisciplinaires (agronomes, chercheurs et producteurs). En tout, ce sont plus de 150 collaborateurs répartis sur tout le territoire québécois qui participent au RAP. Chaque groupe peut s'appuyer sur des outils prévisionnels et bénéficier du soutien du secrétariat du RAP. Ce dernier coordonne l'ensemble des réseaux et assure la validation technique et scientifique, l'édition et l'envoi des communiqués par courriel et leur dépôt sur Agri-Réseau. Chaque semaine, des conseillers agricoles, des dépisteurs et des chercheurs présents dans les différentes régions agricoles du Québec recueillent des données de dépistage sur les ennemis des cultures. Les données sont transmises aux avertisseurs qui les compilent. Ensuite, les avertisseurs organisent des rencontres hebdomadaires avec leur groupe d'experts durant lesquelles sont présentés les résultats des dépistages. C'est aussi au cours de ces réunions que sont prises les décisions de poursuivre le dépistage ou de faire des interventions. Suite aux discussions de chaque groupe, un communiqué par réseau est préparé. Ce dernier contient des informations de toutes les régions sur l'état de la situation (présence, absence, atteinte des seuils) pour les ennemis des cultures présents au moment de l'écriture de l'avertissement et des éléments à prendre en considération (recommandations) en cas d'intervention prophylactique ou phytosanitaire. Le communiqué est ensuite transmis au secrétariat du RAP qui, une fois la révision et l'édition faites, l'envoie aux abonnés et le publie sur Agri-Réseau.

2.2.2 Laboratoires offrant des tests de résistance, de détection de maladies et de pathogènes.

Le **laboratoire d'expertise et de diagnostic en phytoprotection (LEDP)** du MAPAQ offre des services de diagnostic précis, fiables et rapides pour les ennemis des cultures et les problèmes non parasitaires des productions végétales au Québec. Le LEDP est aussi partenaire de projets pour introduire et adapter des technologies nouvelles et innovatrices de détection et d'identification d'organismes phytopathogènes. Ils développent et diffusent des outils de diagnostic (ex. : sources de références, fiches d'identification, banque d'images, systèmes d'aide à la décision), conçoivent et

présentent des activités de formation et de transfert d'expertise à la clientèle. Le personnel du laboratoire a également le mandat d'établir et de maintenir des liens avec des chercheurs universitaires et gouvernementaux afin de participer à des activités de recherche, de développement et de transfert des connaissances. Le laboratoire a aussi la tâche d'informer les autorités lors d'apparition de nouveaux problèmes phytosanitaires et des situations à risque.

Depuis la saison de cultures 2014, le **CÉROM** offre un **service de détection** des mauvaises herbes résistantes aux herbicides pour l'ensemble des productions agricoles du Québec. La pertinence du service de détection se justifie avec le nombre de populations résistantes détectées au Québec depuis 2014, spécialement avec l'arrivée des nouvelles espèces (telle que l'amarante tuberculée) résistantes aux herbicides de plusieurs groupes.

Plusieurs marqueurs moléculaires et autres technologies utilisées par le LEDP et le CÉROM ont été développés dans des centres de recherche d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (ex. : marqueurs permettant de faire la détection de mauvaises herbes résistantes aux herbicides). Ces marqueurs sont développés à partir d'échantillons provenant du Québec mais aussi de l'Ontario, puisque des graines de mauvaises herbes pourraient éventuellement se retrouver au Québec par migration, à cause des changements climatiques ou d'autres facteurs.

Le Consortium PRISME possède un laboratoire de biologie moléculaire **PHYTODETEC** qui propose des services de détection de spores pour différentes maladies à dispersion aérienne de spores, d'analyses des pathogènes du sol et de détection de résistance aux fongicides.

Le **laboratoire d'écologie microbienne** de l'IRDA offre des services d'identification microbienne du sol (populations d'archées, de bactéries, de champignons, d'algues, de protozoaires et d'autres eucaryotes).

2.2.3 Les organismes de transfert et outils

Le Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ) est un organisme à but non lucratif dédié au **transfert de connaissances** pour le secteur agricole et agroalimentaire au Québec. Grâce à son personnel d'expertise et grâce à la mobilisation de son réseau de membres et de collaborateurs, le CRAAQ a pour mission de produire, de rassembler et d'adapter les connaissances et d'en assurer le transfert

par des activités et des outils s'adressant aux différentes clientèles, et ce, pour l'évolution des pratiques du secteur agricole et agroalimentaire au Québec. Le CRAAQ développe et gère différents **outils Web** pour le secteur agricole: Arterre, SAgE pesticides, IRIIS phytoprotection, réseau de site de démonstration en agroforesterie, Agri-Réseau, Ruche pour la pollinisation, etc. Le CRAAQ est constitué de plusieurs comités et commissions, parmi lesquels la Commission de phytoprotection, la Commission agrométéorologie et la Commission géomatique agricole et agriculture de précision.

Le **Pôle d'excellence en lutte intégrée** (PELI) a pour mission de regrouper les acteurs de la filière maraîchère autour d'une vision et des stratégies communes de manière à créer un environnement propice au développement d'innovations, à la mise au point de technologies, d'équipements et de pratiques de lutte intégrée dans le but d'augmenter leur utilisation. Le PELI a pour objectif de contribuer à la diminution de l'utilisation et des risques associés aux pesticides tout en assurant la sécurité au niveau de la production agricole. Le PELI participe également au transfert de connaissance en phytoprotection.

Agrométéo Québec a été développé par Agriculture et Agroalimentaire Canada et Solutions Mesonet. C'est un outil d'aide à la décision qui permet d'améliorer la productivité en effectuant une meilleure gestion des ennemis des cultures ainsi qu'une meilleure utilisation des pesticides, de l'eau et des fertilisants en fonction des données et des prévisions climatiques. Des données météorologiques issues de stations météorologiques réparties sur l'ensemble du territoire agricole sont intégrées à des modèles bioclimatiques et phénologiques qui permettent un suivi en temps réel de l'évolution des cultures et de leurs ennemis. L'**Atlas agroclimatique** est un outil développé par la Commission agrométéorologie du CRAAQ qui fournit des données climatiques qui révèlent l'impact des climats actuel et futur sur les systèmes agricoles. Il permet aussi de mieux orienter les activités du secteur agricole. Ces deux outils intègrent des résultats de différents projets réalisés en phytoprotection et sur les changements climatiques (Audet et al. 2012). Ils permettent de produire des cartes interactives en temps réel.

Le site Web **IRIIS phytoprotection**, géré par le CRAAQ, est un outil de diagnostic pour une clientèle cible qui permet la reconnaissance visuelle des ennemis présents au Québec et des alliés des cultures ainsi que des symptômes causés par les problèmes non parasitaires aux plantes cultivées. Le site Web offre une source d'informations validées par les experts du Laboratoire d'expertise et de diagnostic en phytoprotection

du MAPAQ et les experts en phytoprotection des secteurs public et privé. L'outil consiste en une banque d'images et de connaissances sur les ennemis (insectes ravageurs, maladies et mauvaises herbes) et les alliés des cultures ainsi que sur les symptômes causés par les problèmes non parasitaires affectant les plantes cultivées au Québec. L'outil favorise la contribution des experts de diverses organisations par la soumission d'images ou de spécimens/symptômes récoltés sur le terrain. Une meilleure connaissance des ennemis des cultures est une étape clef en phytoprotection.

L'outil Web **SAgE pesticides**, un autre outil géré par le CRAAQ, permet aux producteurs et conseillers agricoles de faire un choix éclairé parmi les produits homologués pour la protection de leurs cultures. L'outil Web offre une connaissance de la toxicité potentielle des pesticides pour la santé, de leurs effets potentiels sur les organismes non ciblés et l'environnement, de leur mode d'action et de leur compatibilité avec les programmes de lutte intégrée. SAgE pesticides rend accessible dans un seul site l'information sur les caractéristiques toxicologiques, écotoxicologiques et sur le devenir des pesticides dans l'environnement, et ce, en lien avec les usages homologués. Cet outil permet d'effectuer d'accompagner producteurs et agronomes dans leurs pratiques de gestion intégrée des ennemis des cultures. Cet outil participe grandement à la phytoprotection.

2.3 AUTRES TRAVAUX PERTINENTS RÉALISÉS EN DEHORS DU QUÉBEC

Dans l'Ouest canadien, de nombreux travaux sur les insectes ravageurs sont menés par Agriculture et Agroalimentaire Canada. Dans les Prairies, il existe un très bon réseau qui coordonne les avertissements pour plusieurs provinces concernant les insectes. Il s'agit du **Prairies Pest Monitoring Network** (PPMN). Le PPMN est constitué de plusieurs entomologistes des grandes cultures qui effectuent des recherches et assurent une surveillance active dans les Prairies. Les membres de ce réseau sont des chercheurs d'Agriculture et Agroalimentaire Canada, d'Agriculture Manitoba, d'Agriculture Saskatchewan, d'Agriculture, de Foresterie Alberta ainsi que des chercheurs universitaires. L'industrie fournit régulièrement des informations précieuses lors des réunions annuelles de groupes de travail du PPMN. À quelques exceptions près, le PPMN fonctionne de façon similaire au RAP et publie, chaque semaine, des avertissements et bulletins d'informations sur plusieurs ennemis présents à travers les différentes provinces. Le PPMN réalise également des cartes de prévision en fonction des données historiques et des données météorologiques. Ce réseau de dépistage est financé par plusieurs associations de producteurs.

Le PPMN permet de compiler des données sur le long terme pour les insectes recensés dans les Prairies. À l'aide de ces données et du logiciel de modélisation CLIMEX, les Drs Owen Olfert et Ross Weiss (AAC - Saskatoon) ont publié plusieurs articles (voir **Annexe 3**) dans lesquels ils décrivent les possibles impacts des changements climatiques sur ces espèces. D'autres modèles sont en cours de préparation pour d'autres espèces d'insectes. Un autre projet de modélisation des espèces exotiques envahissantes est en cours de réalisation. La Dre Meghan Vankosky réalise un projet dont l'objectif est de développer des modèles CLIMEX pour six autres espèces d'insectes susceptibles de devenir envahissantes au Canada, selon les travaux de Dr Peter Mason (AAC - Ottawa). La plupart de ces insectes sont préoccupants pour la production de fruits et de légumes et des travaux sont également réalisés sur les organismes nuisibles aux produits stockés (Dr Paul Fields).

Les équipes d'AAC souhaitent également développer des modèles CLIMEX pour les ennemis naturels des espèces exotiques envahissantes afin de prédire où ils pourraient s'établir au Canada dans les conditions climatiques actuelles et selon divers scénarios de changements climatiques. L'une des lacunes rencontrées par les chercheurs d'AAC et ceux impliqués dans le PPMN est la faible accessibilité à des données phénologiques ou de données historiques sur la distribution et l'abondance des organismes nuisibles pour valider les modèles. Ces lacunes sont partiellement comblées par des expériences réalisées en laboratoire par le biais de collaborations avec d'autres scientifiques (issus d'autres provinces, des États-Unis ou d'Europe) et se spécialisant dans l'étude des interactions entre les ravageurs et leurs ennemis naturels.

Le PPMN regroupe les provinces de l'Alberta, de la Saskatchewan, du Manitoba et la région de Peace River en Colombie-Britannique. Selon Meghan Vankosky, il est peu envisageable d'élargir le PPMN au-delà de ses frontières actuelles, d'une part, parce que le réseau a été créé sur une longue période et d'autres parts, parce que les provinces couvertes par le PPMN sont très similaires en termes de cultures et des problèmes liés aux ennemis de ces cultures. Un partage d'informations entre les différents réseaux est également envisageable, puisque quelques espèces sont communes dans l'est et l'ouest du pays.

Dans l'ouest du Canada, le *Western Committee on Crop Pests* se réunit chaque année pour dresser un bilan des ennemis qui affectent les différentes cultures dans ces régions, pour déterminer quels sont les insectes émergents et quels sont ceux qui font l'objet de recherche.

Dans l'Est du Canada, la **Canadian Corn Pest Coalition** se réunit une fois par année avec les différents intervenants de la filière maïs et des représentants de toutes les provinces pour traiter des problèmes rencontrés dans cette culture. Des représentants de l'industrie, des différents paliers ministériels, des associations de producteurs, des universitaires et des chercheurs de centres de recherches privés ou publics se réunissent pour dresser un portrait de la situation et évaluer les priorités de recherche au niveau canadien. Cette coalition annonce également le développement de résistance de certains ennemis des cultures.

En Ontario, Boland et al. (2004) ont dressé un portrait de l'impact des changements climatiques sur les maladies des plantes pour plusieurs plantes des grandes cultures (luzerne, maïs, soya, tabac, blé d'automne), cultures fruitières (pomme, raisin, pêches, fraises), cultures maraîchères (haricot, carotte, oignon, pomme de terre, maïs sucré et tomate) et plusieurs arbres. Les auteurs estiment qu'il y aura des effets significatifs directs et multiples des changements climatiques sur les maladies avec des impacts sur l'épidémiologie, la survie des inoculum, la vitesse de propagation des maladies et la durée des épidémies. Les auteurs suggèrent que des adaptations aux changements en agriculture devront être réalisées rapidement.

2.4 FINANCEMENT DE LA RECHERCHE SUR LA PHYTOPROTECTION ET LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Le Québec a adopté plusieurs plans d'action depuis 2006 avec pour objectifs de réduire l'émission de ses gaz à effet de serre (GES) et aussi d'accroître sa résilience face aux impacts anticipés des changements climatiques (notamment, le maintien des services écologiques essentiels). Ces plans d'action sont financés par le Fonds vert, qui a été institué en 2006, en vertu de la Loi sur le ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs afin de favoriser le développement durable du Québec par la protection de l'environnement, la préservation de la biodiversité et la lutte contre les changements climatiques. Ouranos soutient la recherche en adaptation aux changements climatiques pour la phytoprotection, au niveau agricole via le Fonds vert. Le Gouvernement du Québec, via le programme Prime-vert, par l'entremise de la stratégie phytosanitaire et également le Fonds vert, ainsi que le programme Innov'action finance des projets en lien avec l'adaptation sur des problématiques actuelles qui vont s'amplifier avec les changements climatiques ou pour lesquelles nous n'avons pas de solution actuellement. À notre connaissance, il n'existe pas de tel fonds chez nos voisins de l'Ontario, même si un plan d'action est mis en place par le gouvernement provincial.

D'autres programmes, tels que le programme Agriscience d'Agriculture et Agroalimentaire Canada, Génome Québec, Génome Canada, les subventions CRSNG et FQRNT, peuvent subventionner des projets liés à la phytoprotection et les changements climatiques selon la problématique soulevée et les objectifs des différents programmes.

3 BILAN DES ÉTUDES D'IMPACTS ET D'ADAPTATION POUR LA PHYTOPROTECTION JUSQU'EN 2019 AU QUÉBEC

3.1. ÉTUDES D'IMPACTS

Dans le cadre des projets réalisés au cours des dernières années en collaboration avec OURANOS et/ou le MAPAQ, plusieurs aspects de l'impact des changements climatiques sur la phytoprotection ont été abordés (voir **tableau 2**). Ces projets ont permis de réaliser des revues de littérature identifiant les espèces d'insectes et de maladies présentes ou espèces exotiques envahissantes (EEE) à risque de devenir plus problématiques avec les changements climatiques à l'horizon 2050. Ces projets ont aussi réalisé des études de cas sur des ennemis déjà présents dans plusieurs cultures, d'établir de nouveaux modèles comme outils prévisionnels, mais aussi d'évaluer les impacts environnementaux liés à l'utilisation des pesticides suite aux changements climatiques. Ces études ont enfin permis d'identifier des mesures d'adaptation pour lutter contre l'évolution des espèces déjà présentes tout comme pour contrer l'introduction de nouvelles espèces exotiques envahissantes. Grâce à ces projets, plusieurs activités de transfert de connaissances (feuillets synthèses, revues de littérature, présentation, etc.) et de nouveaux outils ont ainsi permis d'informer les producteurs de l'impact des changements climatiques sur l'agriculture. Depuis 2013, c'est trois revues de littérature, 20 études de cas pour onze cultures, sans parler de plusieurs nouveaux modèles bioclimatiques et de nombreuses fiches descriptives d'EEE à risque pour plusieurs cultures du Québec qui ont été réalisées.

Il est à noter qu'à notre connaissance, aucune étude d'impact des changements climatiques n'a été réalisée sur des mauvaises herbes des cultures au Québec. Pourtant dans les synthèses réalisées par Gagnon et al. (2013) et Rousseau et al. (2016), il est mentionné que les changements climatiques auront des impacts variables et complexes sur la croissance des mauvaises herbes en fonction du type de plante (C3 ou C4). Certaines espèces de mauvaises herbes pourraient migrer vers le nord. Le stress hydrique généré par la sécheresse pourrait diminuer la présence de certaines mauvaises herbes de type C3, alors qu'une augmentation de la concentration de CO_2 va

favoriser la croissance de ces mauvaises herbes et induire une plus grande compétition avec les plantes cultivées. Les mauvaises herbes possèdent des cycles de vie très variables et une grande diversité génétique (Ziska et Runion, 2007) qui leur permettrait de bien s'adapter aux variations climatiques. Les risques d'introduction d'EEE de mauvaises herbes via les transports et le commerce international sont réels. De plus, les changements climatiques, pourraient aussi favoriser le développement plus important d'espèces indigènes. Les pratiques culturales, si elles sont modifiées, influenceront les conditions de croissance des mauvaises herbes, influençant ainsi la composition des populations présentes dans les cultures (Peters, 2014). Il est aussi possible que des semences de mauvaises herbes ayant développé des résistances multiples chez nos voisins du sud soient transportées jusqu'au Québec. Concernant la gestion des mauvaises herbes, il est important de garder qu'un même champ possède généralement un complexe de mauvaises herbes de différents types et que par conséquent il faudrait réaliser des analyses plus globales, tenant compte des conditions du champ. Il a d'ailleurs été montré que l'augmentation de la concentration de CO_2 pourrait affecter l'efficacité de certains herbicides dont le glyphosate, ce qui aurait un impact majeur sur la phytoprotection (Ziska et al. 1999)

3.1.1 Études de cas sur les ennemis des cultures

Plusieurs revues de littérature et études de cas ont essentiellement été réalisées sur les insectes et les maladies à travers les projets de Gagnon et al. 2013, Brodeur et al. 2013, Mimee et al. 2014, Firlej et al. 2019 et Saguez et al. 2019. Une grande majorité des projets portaient sur des études de cas associées aux grandes cultures (essentiellement dans le soya), à la pomiculture et les autres sont essentiellement en culture de petits fruits ou pomme de terre (**Tableau 2**). Ces études de cas ont permis de développer de nouveaux outils de modélisation pour les secteurs agricoles et horticoles, mais surtout d'identifier l'impact des changements climatiques sur le développement phénologique de ces espèces et des cultures qu'elles attaquent et les mesures d'adaptation à adopter. Les insectes et les maladies étudiées sont plutôt inféodés à une culture, hormis le scarabée japonais, la punaise marbrée, la fusariose de l'épi et l'anthracnose, qui peuvent affecter plusieurs cultures.

Tableau 2: Liste des études de cas réalisées lors des projets en phytoprotection et changements climatiques depuis 2013.

Auteurs et année	Cultures	Cas ou modèles étudiés	Sur quoi portait l'étude
Brodeur et al. 2013	Pomme de terre	Puceron/Coccinelle /parasite	Indice du Risque d'Altération (IRA) : perte de synchronisme entre les ravageurs et leurs ennemis naturels
Gagnon et al. 2013	Maïs sucré	Pyrale du maïs	Modélisation des impacts des CC sur le ravageur, recherche de mesures d'adaptation à partir d'analogues spatiaux
Gagnon et al. 2013	Pomme de terre	Doryphore de la pomme de terre	Modélisation des impacts des CC sur le ravageur, recherche d'analogues spatiaux et mesures d'adaptation
Gagnon et al. 2013	Blé et orge	Fusariose de l'épi	Modélisation des impacts des CC sur la maladie, recherche d'analogues spatiaux et mesures d'adaptation
Mimee et al. 2014	Soya	Nématode à kyste	Modélisation des impacts des CC sur le ravageur
Mimee et al. 2014	Soya	Punaise marbrée	Modélisation des impacts des CC sur le ravageur
Mimee et al. 2014	Soya	Ver de l'épi	Modélisation des impacts des CC sur le ravageur
Firlej et al. 2019	Pomme	Punaise marbrée	Recherche d'analogues spatiaux et mesures d'adaptation
Firlej et al. 2019	Pomme	Feu bactérien	Modélisation des impacts des CC sur la maladie, recherche d'analogues spatiaux et mesures d'adaptation
Firlej et al. 2019	Pomme	Carpocapse de la pomme	Modélisation des impacts des CC sur le ravageur, recherche d'analogues spatiaux et mesures d'adaptation

Firlej et al. 2019	Fraise	Tarsonème du fraisier	Modélisation des impacts des CC sur le ravageur, recherche d'analogues spatiaux et mesures d'adaptation
Firlej et al. 2019	Canneberge	Tordeuse des canneberges	Modélisation des impacts des CC sur le ravageur, recherche d'analogues spatiaux et mesures d'adaptation
Firlej et al. 2019	Framboise	Scarabée japonais	Modélisation des impacts des CC sur le ravageur, recherche d'analogues spatiaux et mesures d'adaptation
Firlej et al. 2019	Fraise, pomme et canneberge	Anthracnose	Modélisation des impacts des CC sur la maladie, recherche d'analogues spatiaux et mesures d'adaptation
Saguez et al. 2019	Maïs et soya	Punaise marbrée	Modélisation des impacts des CC sur le ravageur, recherche d'analogues spatiaux et mesures d'adaptation
Saguez et al. 2019	Maïs et soya	Punaise verte	Modélisation des impacts des CC sur le ravageur, recherche d'analogues spatiaux et mesures d'adaptation
Saguez et al. 2019	Maïs	Chenille des épis du maïs / Noctuelle de la tomate	Modélisation des impacts des CC sur le ravageur, recherche d'analogues spatiaux et mesures d'adaptation
Saguez et al. 2019	Canola	Méligèthe des crucifères	Modélisation des impacts des CC sur le ravageur, recherche d'analogues spatiaux et mesures d'adaptation
Saguez et al. 2019	Blé	Fusariose de l'épi	Modélisation des impacts des CC sur la maladie
Saguez et al. 2019	Soya	Rouille asiatique du soya	Mesures d'adaptation

3.1.2 Études sur les impacts environnementaux liés à l'utilisation des pesticides

Au cours des dernières années, plusieurs travaux ont également été réalisés sur les impacts environnementaux liés aux pesticides qui sont ou pourraient être utilisés pour contrôler les ennemis des cultures. En effet, comme les changements climatiques pourraient engendrer une augmentation de la fréquence et l'intensité des évènements pluvieux ou des évènements exceptionnels ainsi que modifier la phénologie des cultures, cela aura potentiellement un impact sur la fréquence et les dates d'application des pesticides (Gagnon et al. 2015). Dans leur étude, les auteurs ont déterminé que durant la période 2011-2040, l'augmentation du cumul de degrés-jours de croissance induirait un devancement moyen des dates d'application des pesticides d'environ trois jours pour les applications en début de saison et d'environ huit jours en fin de saison, en comparaison avec la période 1981-2010. À l'époque, les auteurs avaient également déterminé qu'il n'y aurait pas de répercussion sur le nombre d'applications de pesticides du fait que les changements climatiques ne seraient pas suffisamment importants pour permettre le développement d'une génération supplémentaire d'insectes au cours de la saison de croissance des cultures. Toutefois, dans des études menées plus récemment, il est possible de voir une tendance pour l'horizon 2041-2070, plusieurs espèces d'insectes pourraient compléter leur cycle de développement ou avoir plus de générations. De plus, les plantes pourraient être affectées par plusieurs stades de développement d'un insecte pendant leur période de vulnérabilité (Firlej et al. 2019, Saguez et al. 2019). Cela pourrait donc remettre en question la fréquence des traitements phytosanitaires. La période de référence pour chaque étude de cas et le contexte agroenvironnemental peuvent donc faire changer les conclusions d'une étude à l'autre.

L'étude menée par Gagnon et al. (2015) a toutefois démontré que l'intensité des pluies maximales durant les fenêtres d'application des pesticides ne devrait pas être augmentée dans un futur proche (2011-2040) bien que l'intensité des pluies maximales soit très variable d'une année à l'autre. Les auteurs concluent que la charge totale de pesticides transportée par les eaux de ruissellement de surface (au cours des 60 années considérées pour leur étude) dépend de seulement quelques évènements de pluie intense (ex : orage violent) survenant peu de temps après un traitement phytosanitaire et qu'il n'y aurait donc probablement pas d'augmentation dans les années futures. Les auteurs avaient toutefois démontré qu'il pourrait y avoir une augmentation de 10 %, dans le futur, des fongicides transportés dans l'eau de ruissellement dans le cas de la tavelure. L'étude ne tenait pas compte de l'abondance des ennemis qui pourrait

augmenter avec les changements climatiques. Or, une augmentation des populations d'ennemis des cultures générerait probablement une augmentation de l'utilisation des pesticides.

Depuis plusieurs années, le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) publie des rapports sur la présence de pesticides dans l'eau au Québec. Les taux de pesticides ne cessent d'augmenter au Québec et c'est ce que révèle encore le dernier rapport publié en février 2019 (Giroux 2019). Ce rapport dresse un portrait de la situation dans les zones de maïs et de soya échantillonnées entre 2015 et 2017. Il révèle une augmentation de la présence de plusieurs pesticides dans les rivières québécoises depuis la dernière période d'échantillonnage (2011 à 2014) et depuis 1992. Dans la plupart des cas, les taux détectés respectent les critères de qualité de l'eau. Certes, l'utilisation massive de pesticides peut être l'une des causes de ces augmentations, mais les changements climatiques pourraient également y participer, notamment avec l'arrivée au Québec de plusieurs nouveaux ravageurs depuis le début des années 2000 (ex. : puceron du soya, drosophile à ailes tachetées, ver-gris occidental du haricot, punaise marbrée) (Chouinard et al. 2018; Jean 2010; Saguez et al. 2013; Saguez et Fréchette 2018).

3.1.3 Études d'impact sur la biodiversité

Les changements climatiques bouleversent les écosystèmes, mais aussi la biodiversité et la dispersion des espèces. Cela aura potentiellement un impact sur les ennemis naturels (prédateurs et parasitoïdes) des ravageurs des cultures. Afin de limiter cet effet des changements climatiques, il faut maintenir certains habitats permettant d'héberger les espèces bénéfiques pour les cultures. Pour cela, il faut encourager les producteurs à adopter de nouvelles pratiques agroenvironnementales visant à réduire les impacts négatifs sur l'environnement, notamment en améliorant l'aménagement du paysage, pour s'adapter aux changements climatiques. Cette mesure d'adaptation permettrait notamment de renforcer la connectivité écologique des paysages (création ou réhabilitation de biocorridors) et de participer à la conservation de la biodiversité (Dupras 2016).

3.2. MESURES D'ADAPTATION

3.2.1. Ateliers de concertation avec les filières agricoles

Dans plusieurs projets, les vulnérabilités des différents secteurs de production face aux changements climatiques ont pu être documentées à l'aide de sondages ou d'ateliers

de travail organisés au sein des secteurs de productions (Gagnon et al. 2013; Firlej et al. 2019). Dans le cadre du projet de Gagnon et al. (2013), des entrevues avec des producteurs de blé et de maïs ont été réalisées directement à la ferme pour déterminer les mesures d'adaptation pour le secteur. De plus, deux ateliers ont été réalisés avec des représentants d'organisations chargés d'apporter un appui aux producteurs dans le secteur de la phytoprotection (organismes de R&D, institutions, organismes de transfert technologique, groupements de conseillers agricoles et syndicat agricole). Dans le cadre du projet de Firlej et al. (2019), les consultations ont été organisées en collaboration avec le Club d'encadrement technique atocas Québec (CETAQ), l'Association des producteurs de canneberges du Québec (APCQ) et l'Association des producteurs de fraises et framboises du Québec (APFFQ). Ces ateliers ont permis de déterminer à quel point les producteurs se sentent prêts et outillés face aux changements climatiques en cours, et ce, pour au moins six secteurs de production (maïs, blé, fraise, framboise, pomme et canneberge). Ces ateliers ont aussi permis de se questionner sur les adaptations possibles pour l'avenir (voir section 5.4.) Ces consultations, bien que complexes à organiser, sont souvent les interactions de première ligne les plus précieuses qui génèrent des recommandations les plus proches des besoins du secteur. Les projets de Gagnon et al. 2013 et Firlej et al. 2019 sont ceux ayant généré la plus grande quantité de recommandations précises en lien avec les vulnérabilités des secteurs.

3.2.2 Recherche de mesures d'adaptation dans des régions analogues

Plusieurs projets effectués au cours des dernières années ont identifié les impacts des changements climatiques sur différents systèmes liés à la phytoprotection (Gagnon et al. 2013; Brodeur et al. 2013; Mimee et al. 2014; Firlej et al. 2019; Saguez et al. 2019). Ces études ont aussi permis d'identifier des mesures d'adaptation pouvant être mises en place préventivement ou de manière curative pour que le milieu agricole réagisse adéquatement aux changements affectant les espèces déjà présentes et aux introductions d'espèces exotiques envahissantes au Québec. Certaines de ces mesures ont déjà été mises en place. La méthodologie utilisée pour identifier ces mesures adaptatives a été 1) l'utilisation conjointe des sondages et ateliers avec les producteurs, 2) la consultation d'experts du secteur dans des régions analogues, c'est-à-dire qui possèdent un climat actuel similaire à celui projeté pour le Québec dans le futur ou 3) la réalisation d'une veille bibliographique complémentaire sur les différentes méthodes envisageables et non mentionnées par les experts interrogés dans les régions analogues.

Les recherches ont porté sur les actions réalisées actuellement contre différents ennemis des cultures, dans les régions analogues, mais aussi au Québec (pour les espèces déjà présentes). Pour les études concernant les analogues spatiaux dans les différents projets (Gagnon et al. 2013; Firlej et al. 2019; Saguez et al. 2019), les climats du passé récent (périodes de références 1971-2000 ou 1981-2010 – pour la zone de recherche d'analogues, et du futur pour la région cible – 2041-2070) ont été comparés sur la base d'indicateurs bioclimatiques annuels, par exemple la durée de la saison de croissance, les précipitations moyennes journalières durant la saison de croissance et le cumul de degrés-jours (avec des températures de base variant selon la culture ou l'espèce de ravageur considérée). Parce que tous les indicateurs ne peuvent être pris en compte, les climats analogues identifiés peuvent différer de celui de la région cible pour des indicateurs comme la couverture nivale et la fréquence de jours de gel. Cela souligne donc la limite des analogues à représenter complètement le climat futur et il faut donc en tenir compte dans les analyses. L'identification des régions analogues effectuée par Ouranos, utilise les mêmes scénarios climatiques que pour des modélisations phénologiques. Une fois les régions analogues identifiées, des questionnaires ont été envoyés auprès d'experts et spécialistes de ces régions. Les questions portaient sur la situation de l'espèce dans leur région, comment elle évolue depuis son introduction (dans le cas d'espèces des EEE), quelles sont les méthodes de lutte utilisées pour la contrôler, leur efficacité et s'ils observent le développement de résistance aux pesticides. Dans les projets de Saguez et al. (2019) et Firlej et al. (2019), le taux de réponse aux sondages n'a jamais dépassé 10% des personnes sondées. C'est pourquoi il a été nécessaire de compléter par une revue de littérature pour obtenir des informations complémentaires. Cela souligne les limites de cette méthode et compte tenu de l'ampleur du travail, il est important de bien mesurer la « valeur ajoutée » d'utiliser cette méthode. Notamment, il est apparu dans l'étude de Firlej et al. (2019), que les informations pertinentes trouvées dans les régions analogues sont le plus souvent pour des espèces ayant envahi récemment le Québec. Quand l'espèce en question est présente depuis longtemps dans la région analogue et au Québec, le gain est très faible, car les mesures de contrôle et le développement technologique ont pris de l'ampleur au fil des années.

Les principales mesures mises en place dans les régions analogues sont des mesures visant à dépister le phytoravageur une fois qu'il est présent sur le territoire, afin de déterminer sa prévalence (aire de distribution et abondance) et l'importance des dommages qu'il occasionne. Ces dépistages passent par la mise en place de réseaux de suivi et d'évaluation des dommages aux cultures associés à ces nouveaux ennemis. Plusieurs méthodes de suivi peuvent être envisagées, parmi lesquelles il y a le dépistage

des insectes dans les champs (dépistage classique, dépistage à l'aide de pièges automatisés, etc.), mais aussi la participation citoyenne dans certains cas pour alerter lors de la présence de nouveaux ravageurs (ex. : utilisation d'applications telles que iNaturalist ou Spotteron).

Parmi les différentes méthodes de protection des cultures contre les espèces exotiques envahissantes (EEE), on retrouve généralement le recours à des ennemis naturels (parasitoïdes ou prédateurs). Toutefois, les ennemis naturels des phytoravageurs envahissants ne sont pas présents dans la nouvelle aire de répartition du phytoravageur ou bien les conditions environnementales ou climatiques peuvent ne pas être favorables à l'établissement de ces ennemis naturels. L'introduction de ces ennemis naturels dans un nouveau territoire peut être réglementée et nécessite des permis d'importation. C'est notamment le cas au Canada pour l'importation et la dissémination d'agents de lutte biologique, puisque même s'ils permettent la gestion des ennemis des cultures, ces agents de lutte peuvent présenter un risque pour le nouvel environnement et devenir une nuisance. Ainsi, plusieurs méthodes (ex. : filets d'exclusion, argile) peuvent aussi servir de barrières physiques pour limiter les dommages causés par ces EEE. Le recours à des pesticides peut également être envisagé, mais il faut tenir compte des réglementations en vigueur dans chaque pays et du développement possible de résistances des ennemis des cultures aux pesticides. Dans le cadre d'une gestion intégrée des ennemis des cultures, l'utilisation de traitements pesticides doit être la dernière option à envisager, lorsque les autres méthodes de lutte disponibles s'avèrent inefficaces. Enfin, la sélection variétale est une approche qui permet de développer de nouveaux cultivars tolérants ou résistants aux ennemis tout en étant adaptés aux conditions climatiques et photopériodiques de la région. Une bonne connaissance des ennemis potentiels des cultures est la meilleure façon de déterminer quelles sont ou seront les voies à envisager pour contrôler ces ravageurs.

La punaise marbrée, *Halyomorpha halys*, est l'une des principales menaces pour le Québec. Mimee et al. (2014) suggéraient de caractériser les populations de ces punaises au Québec et de les suivre, mais également de suivre les populations de parasitoïdes. Un réseau de surveillance de la punaise marbrée a été mis en place, faisant intervenir plusieurs groupes (l'IRDA, Agriculture et Agroalimentaire Canada, le MAPAQ, la Ville de Montréal et le CÉROM), ce qui permet de suivre l'évolution de l'insecte sur le territoire québécois (Chouinard et al. 2018). En 2019, Abram et al. ont rapporté pour la première fois au Canada, la présence d'un parasitoïde de la punaise marbrée, *Trissolcus japonicus*. Cela ouvre de possibles perspectives pour lutter contre *H. halys* si cette espèce devenait une menace importante au Québec.

Concernant les interactions tritrophiques (relations entre une culture, ses ravageurs et leurs ennemis naturels), Brodeur et al. (2013) ont déterminé que l'impact du réchauffement climatique est complexe et dépend des systèmes. Les auteurs ont également déterminé qu'il n'existe pas ou peu de patrons communs de réponses des plantes et des insectes à la température. Cela est un facteur limitant pour réaliser des projections sur l'efficacité des programmes de lutte biologique selon différents scénarios climatiques. Brodeur et al. (2013) ont donc développé une nouvelle approche permettant de déterminer les températures limites, minimales et maximales, pour le développement des insectes. Ils ont ensuite établi un Indice de Risque d'Altération (IRA), pour évaluer à quel point les changements climatiques pourraient entraîner une perte de synchronisme entre le cycle de développement des ravageurs et celui de leurs ennemis naturels. Le modèle utilisé dans le cadre de cette étude était le puceron de la pomme de terre et deux de ses ennemis naturels: le parasitoïde solitaire Aphidius ervi et la coccinelle maculée, dont à la fois les larves et les adultes sont prédateurs.

Dans le cas du nématode à kyste du soya *Heteodera glycines*, découvert en 2013 au Québec, le développement de cultivars résistants constitue un moyen de lutte efficace et qui n'est pas nocif pour l'environnement. Pour lutter contre ce ravageur, le CÉROM et Agriculture et Agroalimentaire Canada (CRD Saint-Jean-sur-Richelieu) ont mis en place un programme d'amélioration génétique afin de sélectionner des cultivars de soya résistants à ce ravageur. Parallèlement, Agriculture et Agroalimentaire Canada a financé des études génomiques pour identifier les populations de nématodes associées au soya et présentes au Québec et dans les régions limitrophes (Mimee et al. 2014).

3.2.3 Mesures d'adaptation identifiées et réalisées depuis 2011

À la suite des consultations avec les directions des programmes de financement, il a été soulevé qu'il serait pertinent de connaître les différentes recommandations émises au fur et à mesure que les projets se réalisent et de voir comment ces recommandations ont été prises en considération par les programmes de financement et par les équipes de recherche au Québec. Tel que décrit ci-dessus, il y a sept projets qui ont élaboré des listes de recommandations pour favoriser l'adaptation du secteur agricole et de la phytoprotection aux changements climatiques. Nous avons répertorié de nombreuses recommandations issues de ces sept projets dans le **tableau 3** ci-dessous. Parmi cette liste, les recommandations de Firlej et al. (2019) et Saguez et al. (2019) ne sont pas encore diffusées, mais certaines sont déjà appliquées.

Les organismes gouvernementaux possèdent souvent des ressources internes qui réalisent une veille des projets publiés en lien avec leurs besoins et programmes. Par exemple, à la Direction de la phytoprotection, une ressource professionnelle réalise une veille des projets financés en lien avec la phytoprotection et les changements climatiques. Toutes les recommandations des rapports (**Tableau 3**) sont examinées et identifiées pertinentes ou non pour l'ouverture d'appel de programmes de financement. Cela explique probablement le lien entre les différentes mesures listées et la grande proportion de mise en œuvre des recommandations.

Tableau 3: Liste des recommandations pour l'adaptation aux changements climatiques et poursuite des recommandations pour les projets les plus récents.

Projet et recommandations	**Poursuite des mesures recommandées**
Brodeur et al. 2013	
Multiplier les études qui concernent l'impact des changements climatiques sur le comportement et la reproduction des insectes.	Plusieurs laboratoires travaillent sur ces aspects dont: -le laboratoire de Jacques Brodeur avec son étudiante Julie Augustin qui travaille sur la modélisation dynamique du comportement d'une guêpe parasitoïde en conditions de températures suboptimales - le laboratoire d'Annie-Ève Gagnon qui étudie l'effet des hausses de température sur le développement du charançon de la carotte. - Sandrine Lemaire (étudiante à la maîtrise) sous la direction de Julien Saguez (CÉROM) et de Valérie Fournier (Université Laval) réalise une étude sur l'impact des températures sur la biologie, le comportement et la reproduction de la légionnaire uniponctuée.
Établir les seuils thermiques et les besoins en chaleur (temps physiologique, degrés-jours) des principaux insectes et acariens ravageurs et leurs ennemis naturels.	En partie réalisé pour par les projets de Brodeur et al. (2013), Firlej et al. (2019) et Saguez et al. (2019).
Actualiser la base de données sur les réponses thermiques	Sandra Florès-Mejia (2016) a réalisé

des insectes ravageurs et leurs ennemis naturels et identifier des patrons généraux de réponses des différents groupes taxonomiques et fonctionnels.	une thèse de doctorat à l'Université Laval avec pour titre : Les effets de la température et des changements climatiques sur la performance relative d'un réseau trophique: plante-herbivore-parasitoïde. (Essentiellement sur le modèle pomme de terre / puceron / parasitoïde).
Étudier l'impact des changements climatiques sur la biologie saisonnière des espèces, notamment la survie hivernale et les périodes d'entrée et de sortie de diapause.	En partie. L'équipe de l'IRDA et d'AAC réalise un projet Innovaction volet 1 sur: Adaptation de la surveillance phytosanitaire aux changements climatiques : mieux comprendre les facteurs influençant l'abondance de la pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*) au Québec pour mieux adapter la surveillance et gérer le risque futur du ravageur. Le Dr. Conrad Cloutier (Université Laval), étudie la résistance au froid des populations de *D. suzukii* au Lac St-Jean.
Développer des modèles permettant d'intégrer différents paramètres climatiques (température, CO_2, etc.) afin de prédire les conséquences sur le développement des populations d'insectes.	Pas réalisé, à notre connaissance
Développer des modèles prédictifs pour quantifier les seuils thermiques de tolérance des espèces aux événements climatiques extrêmes.	En partie. L'équipe d'AAC (G. Bourgois et A.-È. Gagnon) conceptualise et valide l'effet de températures non optimales sur les interactions trophiques des cultures dans le cadre des changements climatiques.
Étudier les changements climatiques et les espèces exotiques pour mieux comprendre comment ces deux thématiques interagissent et influencent la stabilité et la productivité des écosystèmes agricoles.	Pas réalisé, à notre connaissance
Gagnon et al. 2013	
Pyrale maïs	

Réaliser le dépistage plus tôt en saison pour mieux cibler la date de la première intervention, suite à l'atteinte des seuils agronomiques	Sensibilisation dans les avertissements du RAP.
Réaliser un meilleur suivi de dépistage pour assurer un bon contrôle des pyrales lors du moment critique de contrôle (entre le stade œuf et le deuxième stade larvaire).	Sensibilisation dans les avertissements du RAP.
Valoriser l'utilité de faire du dépistage pour faire un usage raisonné des insecticides.	Sensibilisation dans les avertissements du RAP.
Faire une rotation des insecticides afin de diminuer les risques de résistance.	Sensibilisation dans les avertissements du RAP.
Utiliser les insecticides les plus sensibles à la température en début de saison, pour réduire les risques de phytotoxicité.	Pas réalisé, à notre connaissance
Répertorier la sensibilité aux températures élevées des insecticides utilisés au Québec.	Pas réalisé, à notre connaissance
Effectuer un meilleur suivi auprès des producteurs pour l'utilisation des trichogrammes.	Programme lâchers de trichogrammes grande échelle (Prime-Vert) https://www.irda.qc.ca/fr/projets-recherche/trichogrammes-mais/
Ajuster les doses relâchées de trichogrammes selon les densités de pyrale.	Pas réalisé, à notre connaissance
Élaborer des projets de recherche pour optimiser la lutte biologique avec différentes espèces de trichogrammes mieux adaptées aux températures élevées.	Pas réalisé, à notre connaissance
Posséder une bonne connaissance de la population locale par rapport à son adaptation climatique et phytosanitaire.	En partie. L'équipe de l'IRDA et d'AAC réalise un projet Innovaction volet 1 sur: Adaptation de la surveillance phytosanitaire aux changements climatiques : mieux comprendre les facteurs influençant l'abondance de la pyrale du maïs (*Ostrinia nubilalis*) au Québec pour mieux adapter la surveillance et gérer le risque futur du ravageur.
Fusariose de l'épi	
Choisir les cultivars de blé les plus résistants à la fusariose de l'épi.	L'équipe du CÉROM (M. McElroy et S. Rosa) sélectionne des variétés

	résistantes à la fusariose. Le CÉROM possède une “pépinière” de fusariose.
Cultiver le blé d’hiver afin d’éviter les travaux au printemps dans un contexte où les précipitations sont plus élevées.	Culture de plus en plus implantée. https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Regions/centreduquebec/INPACQInfolettre/productionsvegetales/Pages/cerealesautomne.aspx Travaux de sélection variétale au CÉROM 2018: Publication du CRAAQ d’un guide sur la production des céréales d’automne.
Utiliser des outils pour mieux évaluer le risque de fusariose afin de limiter l’usage des fongicides.	Travaux du CÉROM (Prime-Vert CERO-1-16-1761): Validation et implantation d’un modèle prévisionnel de la fusariose de l’épi des céréales sur Agrométéo Québec Modèle prévisionnel disponible.
Adopter les engrais verts ou les couverts végétaux pour limiter les éclaboussures contaminées de fusariose provoquées par les fortes pluies.	Pas réalisé, à notre connaissance
Doryphore de la pomme de terre	
Adapter le système de dépistage pour prédire le risque de dommages selon l’abondance des doryphores sous les nouvelles conditions climatiques.	Pas réalisé, à notre connaissance
Offrir davantage de support aux producteurs pour l’utilisation de lutte antiparasitaire.	Sensibilisation dans les communiqués du RAP, mais les efforts doivent continuer.
Promouvoir les outils de lutte biologique.	Sensibilisation dans les communiqués du RAP, mais les efforts doivent continuer.
Posséder une bonne connaissance de la population locale par rapport à son adaptation climatique et phytosanitaire.	Pas réalisé, à notre connaissance
Mimee et al. 2014	
Développement de cultivars de soya résistants au nématode	Programme d’amélioration

à kyste du soya (NKS) adaptés aux conditions climatiques et de photopériode du Québec.	génétique afin de produire des cultivars résistants au NKS de groupes de maturité très hâtive (CEROM et AAC).
Mettre en place une stratégie afin de suivre l'évolution des populations de EEE qui colonisent actuellement le sud de l'Amérique, mais qui migrent chaque année au Québec.	En partie. Le CÉROM s'est associé à l'OMAFRA et à diverses "extensions" américaines pour mettre en place un réseau de suivi du ver-gris occidental du haricot.
Pour la punaise marbrée, caractériser les populations de punaises indigènes et leurs parasitoïdes.	En partie. Étude sur le parasitoïde de la punaise marbrée aux États-Unis et aussi par le laboratoire de Paul Abram. Caractérisation de la population de punaise marbrée dans la région de Montréal (Chouinard et al., 2018).
Pour chacun des ravageurs potentiels du soya, identifier les stades phénologiques de la plante qui sont les plus susceptibles d'être affectés par le ravageur et d'entraîner des pertes de rendement.	En partie. Dans le cadre du projet Saguez et al. 2019 (voir ci-après), nous avons identifié les périodes de vulnérabilité de plusieurs grandes cultures, dont le soya et le maïs, et les avons comparés avec les stades de développement des insectes (ex: punaise marbrée, punaise brune, chenille des épis du maïs).
Établir des seuils économiques pour les ravageurs qui causeront des dommages importants à la culture du soya.	Pas réalisé, à notre connaissance
Gagnon et al. 2015	
Multi-espèces de mauvaises herbes, ravageurs et maladies	
Pour éviter le lessivage des ingrédients actifs dans les cours d'eau: -Favoriser les produits les moins mobiles et les moins persistants dans l'environnement. -Favoriser l'utilisation des produits à incorporer dans le sol. -Décourager l'application de produits phytosanitaires trop peu de temps avant un événement de pluie important.	Ces recommandations sont en principe valides pour nombre de ravageurs/maladies/nuisances et sont régulièrement renforcées dans les avertissements du RAP des différentes cultures. L'exception étant l'utilisation de produits protectants contre des maladies qui doivent s'appliquer avant une pluie pour éviter l'infection sur des fruits ou de nouvelles feuilles.

Favoriser le développement d'outils prévisionnels qui tiennent compte des conditions météorologiques et du développement des phytoravageurs pour aider les producteurs à appliquer les pesticides contre des ennemis de la culture au bon moment et non avant un évènement important de précipitation	En réalisation continue avec différents projets d'élaboration de modèles bioclimatiques par l'équipe de recherche en bioclimatologie et modélisation d'AAC à Saint-Jean-sur-Richelieu
Favoriser l'utilisation des matières actives moins dommageables pour l'environnement, c'est-à-dire moins persistantes, moins mobiles et moins toxiques.	Ces recommandations sont en principe valides pour nombre de ravageurs/maladies/nuisances et sont régulièrement renforcées dans les avertissements du RAP des différentes cultures.
Boucher et al. 2017	
Augmenter l'utilisation des modèles bioclimatiques développés en les rendant disponibles sur la plateforme Agrométéo Québec.	En cours de réalisation avec la migration des modèles bioclimatiques de CIPRA vers Agrométéo Québec. Plusieurs modèles sont disponibles sur Agrométéo Québec
Prioriser les organismes pour lesquels aucun modèle n'a été développé ou validé au Québec afin d'optimiser les efforts de recherche vers les secteurs ayant les besoins les plus criants.	En cours: Optimisation d'outils d'aide à la décision pour faciliter l'adaptation du secteur petits fruits aux changements climatiques (Projet IRDA PV-3.2-DP-IRDA-32). Évaluation de modèles prévisionnels pour lutter contre le mildiou de l'oignon: *Perosnospora destructor*. (Projet Phytodata : PHYD-1-15-1728).
Exploiter les banques de données de certains insectes ravageurs (par exemple le ver gris occidental des haricots, la légionnaire uniponctuée et le ver de l'épi) disponibles via les réseaux du RAP pour développer et valider de nouveaux modèles.	Le CÉROM prévoit de le faire au cours de la prochaine année pour plusieurs insectes ravageurs.
Consulter les usagers pour déterminer les facteurs limitant l'utilisation des modèles disponibles. Offrir des formations et apporter des améliorations pour une meilleure appropriation de ces modèles par les usagers.	Un sondage auprès des utilisateurs a été effectué en février-mars 2018. De plus, des formations spécifiques et pilotées par le CRAAQ ont été effectuées en 2018 pour présenter les différents outils disponibles sur Agrométéo Québec

	(dont les modèles prévisionnels pour les cultures et leurs ravageurs).
Élaborer des modèles pour les espèces exotiques pour lesquels des connaissances biologiques seraient profitables au secteur.	En partie. Quelques modèles développés pour la punaise marbrée, la punaise verte et le scarabée japonais (Firlej et al. 2019; Saguez et al. 2019)
Étendre les réseaux de capteurs de spores développés par Phytodata et AAC à d'autres régions en assurant un transfert de la technologie vers d'autres laboratoires d'analyse.	En cours de réalisation: Amélioration de la surveillance phytosanitaire québécoise par le déploiement de réseaux de capteurs de spores sentinelles. (Projet Phytodata PV-3.2-DP-PHYT-22).
Prioriser les champignons phytopathogènes pour lesquels le développement d'un capteur de spores serait pertinent pour limiter l'usage des pesticides. Investir dans les efforts de recherche pour le développement de nouveaux réseaux de capteurs de spores des espèces ciblées.	En cours de réalisation: Amélioration de la surveillance phytosanitaire québécoise par le déploiement de réseaux de capteurs de spores sentinelles. (Projet Phytodata PV-3.2-DP-PHYT-22). Développement d'une méthode de détection pour la brûlure stemphylienne dans la culture de l'oignon. (Projet Phytodata: PHYD-1-17-1841).
Évaluer le potentiel d'installer des sites sentinelles de capteurs de spores à travers la province pour détecter la présence des principales maladies à fort potentiel de dispersion ou la présence de nouvelles espèces.	Pas réalisé, à notre connaissance
Exploiter les nouvelles techniques statistiques, plus modernes et plus robustes, pour le développement et la validation de modèles.	Pas réalisé, à notre connaissance
Investir dans le développement de procédés pour analyser l'ensemble des espèces provenant d'un échantillon environnemental.	Pas réalisé, à notre connaissance
Soutenir les réseaux sentinelles (décrit plus haut) afin d'identifier les espèces présentes à l'aide d'outils de séquençage.	Pas réalisé, à notre connaissance

Investir dans les efforts de recherche pour la détermination des différents pathotypes/biotypes pour lesquels les interventions phytosanitaires peuvent être améliorées (choix d'un cultivar résistant, détection de résistance aux pesticides).	En partie. Développement de méthodes de détection de la résistance aux herbicides par AAC. Revue de littérature sur les insectes et acariens résistants aux pesticides réalisée par l'IRDA. Service de détection de la résistance aux herbicides chez les mauvaises herbes (CÉROM - AAC).
Soutenir les efforts de recherche dans la mise en place d'un essai pilote pour valider l'efficacité des pièges automatisés dans le contexte du réseau de surveillance.	Appel de projets en 2017 avec quatre projets réalisés à travers la province par l'IRDA, le CEROM, le CIEL et le Prisme.
Poursuivre l'implantation des pièges automatisés à d'autres réseaux de grande envergure pour les espèces où le suivi implique l'utilisation de pièges attractifs (le carpocapse de la pomme, la tordeuse à bandes obliques, la tordeuse orientale du pêcher, la légionnaire d'automne, le ver-gris occidental des haricots, la légionnaire uniponctuée, la punaise marbrée, le ver de l'épi, la pyrale du maïs, la fausse-teigne des crucifères et la drosophile à ailes tachetées).	Évaluation de l'efficacité des pièges automatisés en cours par différents organismes (CIEL, IRDA, CEROM et PRISME)
Mettre en place une plateforme informatique permettant d'accueillir des projets de science citoyenne pour les différentes espèces ciblées. Soutenir les efforts de coordination pour la mise en place de réseaux de science citoyenne.	En partie, un projet de science citoyenne a vu le jour pour la détection de la punaise marbrée. http://m.espacepourlavie.ca/blogue/la-punaise-marbree-une-nouvelle-venue-au-quebec
Poursuivre les efforts de recherche dans le but d'optimiser l'analyse de la cartographie permettant d'identifier les problèmes phytosanitaires et mettre en place une plateforme de partage afin de favoriser les échanges entre les différents intervenants du domaine pour accélérer le développement de cette technologie.	Pas réalisé, à notre connaissance
Saguez et al. 2019	
Envisager l'étude de l'impact des changements climatiques sur les espèces d'insectes qui migrent chaque année au Québec.	À réaliser
Évaluer l'impact des vents et masse d'air sur le transport et l'augmentation des aires de répartition des EEE.	À réaliser
Évaluer le risque de l'introduction de nouvelles EEE associées	À réaliser

aux cultures émergentes (chia, cannabis) sur les cultures déjà établies au Québec. L'introduction des nouvelles cultures pourrait être associée à l'introduction de nouvelles espèces envahissantes qui pourraient affecter les grandes cultures.	
En plus des régions analogues, étendre les recherches des mesures d'adaptation dans les zones nouvellement infestées pour déterminer les méthodes qui fonctionnent le mieux.	À réaliser
Étendre les modélisations à plus d'insectes ravageurs.	En cours de réalisation avec divers projets
Améliorer la modélisation des maladies.	À réaliser
Élargir les réseaux de surveillance et établir des seuils d'intervention pour le Québec.	À réaliser
Évaluer la pertinence de nouvelles méthodes de dépistage contre ces ennemis des cultures.	Le CÉROM teste actuellement de nouveaux pièges à phéromones et automatisés.
Envisager le recours à de nouvelles mesures d'adaptation et évaluer la possibilité de les implanter au Québec.	À réaliser
Firlej et al. 2019	
Canneberge (toutes les recommandations sont groupées considérant leur nombre élevé)	
Connaître la compatibilité des méthodes de lutte (parasitoïdes, confusion sexuelle, insecticide) et le moment d'application. Développer et homologuer de nouveaux produits phytosanitaires pour la tordeuse des canneberges. Améliorer le modèle prévisionnel de la tordeuse et le valider. Améliorer les connaissances sur les effets de l'inondation et la technique. Adapter le dépistage de début de saison pour les larves, développer des méthodes pour lutter contre la troisième génération. Développer un calendrier de gestion rationnelle des insecticides. Développer les connaissances sur les maladies, les méthodes de dépistage et les seuils d'intervention. Développer des outils prévisionnels (modèle bioclimatique). Augmenter les connaissances sur l'utilisation des	À réaliser. Mais certaines études sont actuellement en cours sur la confusion sexuelle et l'utilisation des trichogrammes par l'UQAM, le CETAQ et l'IRDA.

inondations pour gérer les maladies. Développer les connaissances sur l'efficacité des fongicides. Développer les connaissances sur les compatibilités entre fongicides et insecticides. Développer les connaissances sur les compatibilités des fongicides avec les abeilles.	
Fraise et framboise (toutes les recommandations sont groupées considérant leur nombre élevé)	
Tarsonème Développer une méthode de dépistage précoce (méthode à élaborer en pépinière afin de diminuer le risque de tarsonème à la transplantation). Effectuer des homologations en curatif pour les pépinières ou en post-rénovation. Optimiser la technique d'arrosage des produits phytosanitaires pour atteindre le coeur des plants. Améliorer les connaissances sur l'utilisation des prédateurs naturels et leur efficacité. Test sur les traitements des plants mères à l'eau chaude et au CO_2 (atmosphère contrôlée (CATTS))	Plusieurs projets sont en cours ou ont été réalisés depuis plusieurs années par le CIEL, l'Université Laval, le RLIO, mais les méthodes de lutte ne sont pas encore assez efficaces pour enrayer les populations.
Scarabée japonais Favoriser/diffuser la connaissance sur le ravageur. Connaître le seuil de tolérance du framboisier à la défoliation (%). Trouver des solutions biologiques contre les larves et/ou les adultes. Documenter des solutions physiques (exemple : filet) contre les adultes. Travailler pour favoriser la prédation du scarabée japonais par *Isotocheta aldrichi.*	À réaliser
Anthracnose Développer des modèles prévisionnels et diffusions de l'information. Homologuer de nouveaux produits (nouvelle matière active). Offre de service afin d'identifier la résistance. Développer des variétés résistantes. Planification des produits et traitements (calendrier). Effectuer de la recherche génomique. Connaître les meilleurs paramètres pour appliquer les fongicides (calibration, pH).	À réaliser. Cependant, validation en cours d'un modèle pour l'anthracnose dans le cadre du projet: Optimisation d'outils d'aide à la décision pour faciliter l'adaptation du secteur petits fruits aux changements climatiques (Projet IRDA PV-3.2-DP-IRDA-32)

Évaluer l'efficacité des traitements au CO_2 (atmosphère contrôlée (CATTS)) sur les plants avant plantation.	
Pomme (toutes les recommandations sont groupées considérant leur nombre élevé)	
Carpocapse de la pomme Obtenir les réponses des demandes de subventions aux producteurs pour la confusion sexuelle plus tôt en saison puisque la saison sera devancée. Légiférer l'obligation d'utiliser la confusion sexuelle lorsque les conditions s'appliquent. Homologuer la confusion sexuelle avec le diffuseur électronique (Shin Etsu). Homologuer de nouveaux produits phytosanitaires avec un délai avant récolte plus court. Développer le service de résistance au Québec pour les régions. Étudier les différents cultivars adéquats pour la production sous filet.	À réaliser
Punaise marbrée Développer et diffuser les connaissances sur les stratégies de lutte et seuils d'intervention. Financer l'augmentation à deux pièges pour le suivi des captures en vergers pilotes (RAP). Développer et diffuser les connaissances sur les risques économiques de la punaise en fonction des régions et du paysage agricole.	À réaliser
Pourriture amère Développer l'information sur les stratégies et méthodes de lutte pour cette maladie. Élaborer des méthodes de lutte en production biologique et conventionnelle.	À réaliser
Brûlure bactérienne Développer des variétés résistantes à la maladie. Effectuer des recherches sur la méthode d'éclaircissage à la floraison.	À réaliser
Autres Scarabée japonais : Adopter les mêmes recommandations que dans la fraise/framboise. Mouche de la pomme : développer les connaissances sur sa biologie afin de mieux connaître le moment idéal pour retirer les pièges.	À réaliser

3.2.4 Réalisation et utilisation de modèles prévisionnels

Plusieurs modèles prévisionnels ont été réalisés pour différents ennemis des cultures, notamment par l'équipe de recherche en bioclimatologie et modélisation du Dr Gaétan Bourgeois (Agriculture et Agroalimentaire Canada). Ces modèles sont intégrés dans le logiciel CIPRA (Centre informatique de prévision des ravageurs en agriculture). Des modèles phénologiques sont également disponibles pour plusieurs cultures. Dans ce logiciel, 123 modèles (dont 45 modèles en degrés-jours pour les insectes, 35 modèles de maladies, 30 modèles génériques pour la phénologie des cultures et 13 autres modèles) existent dans 26 cultures. Soixante-quatre de ces modèles bioclimatiques sont disponibles sur le site Web Agrométéo Québec, principalement pour les cultures fruitières et la pomiculture (voir **Annexe 2**). Un transfert de tous les modèles de CIPRA vers Agrométéo Québec est actuellement en cours. Certains de ces modèles ont été élaborés ou mis à jour dans le cadre de projets financés et réalisés avec l'appui du Fonds vert via le MAPAQ et Ouranos. Il s'agit de la punaise marbrée, de la punaise verte, de la fusariose de l'épi, du tarsonème du fraisier, de la tordeuse des canneberges, du scarabée japonais et de l'anthracnose de la fraise. Les modèles de la phénologie de la canneberge, de la fusariose du blé/épi et du carpocapse de la pomme ont été améliorés dans le cadre de ces projets. Il existe d'autres modèles disponibles pour le secteur horticole tel que le modèle Agropomme (développé par le Club-conseil du même nom) de prévision des risques d'infestation du carpocapse de la pomme et les modèles RIMpro de prévision des risques d'infection de la tavelure et du feu bactérien. Il serait également possible de s'inspirer d'autres modèles, par exemple le modèle français Mileos de prédiction des infections de mildiou dans la pomme de terre qui est actuellement en cours de validation par l'équipe du CIEL pour les conditions québécoises.

3.2.5 Transfert de connaissances

La réalisation de ces différents projets a conduit à la mise en place d'activités de transfert de connaissance et au développement de nouveaux outils pour les conseillers et les agronomes. Les projets ont permis la réalisation d'activités de diffusion (participation à des congrès et webinaires) et à la production de fiches techniques sur plusieurs ennemis des cultures. Ces fiches incluent des données sur la biologie, la distribution actuelle, les méthodes de lutte qui peuvent être envisagées pour contrôler ces ennemis des cultures. Tous ces projets ont également fait l'objet de rapports scientifiques et de fiches de synthèses qui sont rendues publiques sur le site internet d'OURANOS, et de plusieurs rencontres ont eu lieu avec les acteurs des différents

secteurs (ex. : association de producteurs) pour les informer des risques liés aux EEE. Plusieurs documents ont également été déposés sur le site Agri-Réseau.

La commission agrométéorologie du CRAAQ a également réalisé plusieurs activités de diffusion d'informations, notamment par la réalisation de six feuillets techniques et la réalisation de deux colloques en agroclimatologie en 2011 et 2012 (Bachand et al. 2012). Un sondage a été effectué en 2018 des retombées de la diffusion de ces feuillets et de l'Atlas agroclimatique (Bachand 2017). Ce sondage permettra d'enrichir l'outil et le rendre accessible à plus d'utilisateurs. Le CRAAQ a également développé une formation spécifique pour l'utilisation d'Agrométéo Québec.

D'autres projets de transfert de connaissances visent à mieux aborder l'adaptation aux changements climatiques dans les entreprises agricoles. C'est le cas du projet Agriclimat qui vise à former et à sensibiliser les producteurs et les intervenants agricoles aux changements climatiques, leurs impacts ainsi qu'aux mesures d'adaptation pouvant être mises en place (Delisle 2017). D'autres travaux visent également à évaluer l'impact et la pérennisation des biocorridors pour la conservation de la biodiversité comme adaptation aux changements climatiques (Dupras 2016). Un travail étroit va être effectué avec des producteurs et des institutions, pour les encourager à adopter des pratiques agro-environnementales et à installer des aménagements agro-fauniques (AAF). Le passage du théorique à la pratique représente un transfert de connaissances et une adaptation au changement climatique.

4 MESURES ACTUELLES ET IDENTIFICATION DES ÉLÉMENTS À AMÉLIORER POUR POURSUIVRE LES ADAPTATIONS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES AU QUÉBEC

4.1 LES MESURES ACTUELLES DISPONIBLES

Actuellement, il existe un plan d'intervention contre les espèces exotiques envahissantes au niveau fédéral (ACIA et ARLA) ainsi qu'au provincial, à la Direction de la phytoprotection du MAPAQ.

Le gouvernement fédéral via l'Agence canadienne d'inspection des aliments (ACIA) réalise une veille des insectes et maladies à risques d'être introduits au Canada via l'importation dû au commerce. L'ACIA est responsable de la réglementation des

espèces invasives, c'est-à-dire de définir si une espèce doit être placée sur la liste des espèces en quarantaine ou non. Leur service est aussi responsable de la mise en place de mesure d'éradication ou sinon de définir les produits phytosanitaires à évaluer pour donner des outils aux producteurs (section des homologations mineures). Rappelons que l'ACIA invite tous les Canadiens à signaler la présence de tout nouveau phytoravageur, via son site internet. Le site de l'ACIA fournit également de l'information sur plusieurs phytoravageurs et les espèces envahissantes sous surveillance. Les changements climatiques font partie d'un ensemble de facteurs considérés pour effectuer cette veille, mais pas uniquement. L'impact des échanges commerciaux et des transports est également un facteur prépondérant.

Le gouvernement provincial (MAPAQ) est quant à lui responsable de mettre en place le contenu agronomique permettant la gestion des ravageurs par les producteurs (recommandations agronomiques, bonnes pratiques, techniques d'identification, bulletins d'information et communiqués du RAP). Dans le cadre de son programme Prime-Vert en appui au développement de la lutte antiparasitaire intégrée (ADLAI), le MAPAQ finance des projets sur plusieurs pesticides à faibles risques. De son côté, le MELCC effectue une veille sur les espèces invasives agricoles et contribue aux respects des réglementations sur l'utilisation des pesticides. Ils comptent sur les réseaux de surveillance et d'avertissements dans les différents domaines de l'agriculture pour assurer la veille et la diffusion des informations (alertes, avertissements, bulletins d'information et fiches techniques).

Les différents intervenants de la filière agricole peuvent s'appuyer sur des outils tels qu'IRIIS phytoprotection pour les aider à identifier les ennemis des cultures, SAgE pesticides pour trouver des informations sur les molécules disponibles permettant de les contrôler (l'ingrédient actif, la fréquence d'utilisation, la dose recommandée, les indices de risque pour la santé et l'environnement et la toxicité) et sur les services du laboratoire d'expertise et de diagnostic en phytoprotection du MAPAQ qui réalise des analyses (identification visuelle et moléculaire). Les services de la Direction de la phytoprotection se documentent et effectuent une veille régulière de la situation afin d'être préparés et outillés face à l'arrivée d'une nouvelle espèce. Cependant, cela n'est pas toujours possible. Selon Bruno Gosselin, coordonnateur du RAP, la surveillance des espèces exotiques envahissantes récemment arrivées au Québec (drosophile à ailes tachetées et punaise marbrée) a permis à la Direction de la phytoprotection de mettre en place une procédure efficace de surveillance et de gestion qui s'améliorera avec le temps et les différents nouveaux cas d'invasion.

Une fois l'espèce exotique établie sur le territoire québécois, le suivi est pris en charge par les réseaux concernés du RAP qui collectent les informations sur ces ravageurs/maladies afin de tenir à jour le secteur en produisant des documents d'informations. Les différents réseaux doivent aussi s'informer de la situation concernant ces espèces en consultant les réseaux américains (« extensions ») ou européens. Les réseaux du RAP doivent adapter les seuils d'intervention pour le Québec en se basant sur les méthodes de lutte disponibles et efficaces, comme cela est également réalisé pour les espèces de phytoravageurs indigènes.

4.2 Éléments à considérer pour poursuivre l'adaptation

Voici quelques recommandations ou idées que nous avons identifiées et qui pourraient aider à mieux préparer le Québec à l'introduction d'espèces exotiques envahissantes en milieu agricole.

4.2.1 Poursuivre l'acquisition de connaissances

L'un des principaux facteurs limitants lors d'études sur l'impact des changements climatiques sur les ennemis des cultures est la disponibilité des jeux de données complets et rigoureux sur les paramètres climatiques associés au développement et la répartition géographique des espèces étudiées. Sans ces paramètres, il est impossible de faire de la modélisation. Actuellement, la disponibilité d'une base de données compilant les données de dépistage des différents réseaux du RAP permettrait d'avoir une formidable base pour l'édition de rapports de suivis des populations de ravageurs et maladies durant la saison et à travers les années en fonction des régions. La présence de cette base de données permettrait de faciliter la documentation des changements subis par les espèces présentes au Québec sous l'influence des changements climatiques. En se basant sur les données historiques de captures, il serait intéressant de déterminer si l'on peut réaliser des modèles de distribution spatiotemporelle. Suite à l'introduction de nouvelles espèces, on s'intéresse plus souvent à comment les dépister et comment les contrôler, alors qu'une bonne gestion passe avant tout par une bonne connaissance de la biologie et le comportement des ennemis des cultures.

Les études menées au Québec montrent également qu'il y a très peu d'études et d'informations disponibles sur l'impact des changements climatiques en ce qui concerne les espèces migratrices qui n'hibernent pas au Québec. Il existe plusieurs ravageurs qui sont suivis depuis plusieurs années par le Réseau d'avertissements phytosanitaires (ex. : le puceron du soya, la légionnaire uniponctuée ou le ver-gris

occidental du haricot) qui migrent chaque année au printemps depuis les États-Unis, attaquent les cultures au Québec et qui meurent ensuite (ne complètent pas leur cycle de développement sous nos latitudes) ou retournent ensuite vers le Sud (Jean, 2010; Lemaire et al. 2018; Saguez et Fréchette 2018). Plusieurs de ces ravageurs sont également arrivés au Québec depuis les années 2000. Il faudrait envisager d'effectuer une synthèse sur l'évolution des aires de répartition de ces espèces au Québec afin de déterminer si l'impact des changements climatiques, au cours des dernières années, a induit un déplacement des populations vers le nord et si des dommages ont été observés dans ces régions. Il serait également important de savoir si ces espèces migratrices choisiront de migrer vers des régions plus nordiques pour effectuer leur cycle de reproduction ou si elles préféreront devancer leur cycle reproducteur dans des régions situées plus au sud. Des études devraient donc être menées sur ces espèces et leurs ennemis naturels afin de connaître comment la situation a évolué au cours des dernières années et comment elle pourrait évoluer dans un futur proche. De plus, il existe aussi très peu de connaissances sur l'impact des vents, du couvert neigeux et des évènements extrêmes (ex. : précipitations abondantes) qui peuvent affecter les migrations, la dispersion et les densités de population des insectes ou maladies et donc de leurs impacts sur les cultures. Il pourrait être intéressant d'utiliser des applications, telles que Ventusky, Windyapp, Windfinder et autres, qui prédisent les directions du vent et permettraient, à l'aide de diverses méthodes de dépistage, de mieux prédire les zones à risque où pourraient se trouver les ennemis des cultures. Pour des projections à plus long terme, on pourrait aussi envisager l'utilisation de modèles du climat.

Il serait aussi important d'augmenter les études de cas ou de réaliser des tests sur l'impact du réchauffement climatique sur les mauvaises herbes (ex. : acquisition de connaissance sur la vitesse de croissance en fonction de la température, date de floraison, succès reproducteur, aire de répartition) puisque peu d'informations sont actuellement disponibles au Québec. Ces données pourraient aussi avoir un impact sociétal. Par exemple, la gestion de l'herbe à poux est une problématique importante dans les grandes cultures, mais aussi en milieu urbain puisqu'elle est responsable de problèmes de santé publique (allergies). De plus, l'augmentation des températures peut induire des modifications physiologiques et anatomiques sur les plantes (ex. : épaississement de la cuticule des feuilles de chénopodes), qui peuvent réduire l'effet des herbicides et affecter la gestion des mauvaises herbes (Gagnon et al. 2012). Tout comme pour les insectes, il faudrait aussi intégrer l'impact des vents sur la dispersion des graines de mauvaises herbes et des spores de champignons. Des études ont été réalisées sur la télédétection et le développement de modèle prédictif de l'herbe à poux au Québec (Smargiassi et al. 2013, Ngom et al. 2017). D'autres études ont également

été menées sur le roseau commun et la renouée japonaise, des espèces envahissantes au Québec et qui pourraient affecter le milieu agricole. Des modélisations ont été effectuées pour suivre l'évolution et l'impact des changements climatiques sur la croissance de ces plantes au Québec (Blois et al. 2013).

4.2.2. Le futur des études de cas

Au cours des dernières années, plusieurs études ont été financées et réalisées sur les ennemis des cultures et sur les mesures d'adaptation (Gagnon et al. 2013; Brodeur et al. 2013; Mimee et al. 2014; Firlej et al. 2019; Saguez et al. 2019). Des synthèses bibliographiques ont été réalisées et ont permis d'identifier des centaines d'ennemis potentiels dans les différentes cultures étudiées. Toutefois, dans chacun des projets, une sélection de quelques espèces pour des études de cas a dû être effectuée afin de respecter la durée des projets. Ces études de cas mobilisent beaucoup d'énergie et de ressources humaines si l'on souhaite réaliser une étude complète (synthèse bibliographique, modélisation, cartographie, recherche d'analogues spatiaux et recherches de méthodes d'adaptation). Le choix des espèces sélectionnées pour ces études est basé sur le niveau de connaissance de la littérature, ce qui a pour conséquence d'écarter certains ennemis qui pourraient être de très bons candidats pour des études plus poussées.

Dans ces études, il y a une sous-représentation ou une absence des espèces migratrices (papillons noctuelles, pucerons) qui peuvent être très dévastatrices pour les cultures. Souvent, les études de cas réalisées sont liées au secteur de prédilection des chercheurs qui soumettent les projets et les réalisent. Les études de cas effectuées dans la dernière décennie ont été essentiellement focalisées sur quelques cultures (le soya, la pomme et les petits fruits) pour lesquelles des modèles phénologiques existent déjà (Gagnon et al. 2013; Mimee et al. 2014; Firlej et al. 2019; Saguez et al. 2019). On peut regretter l'absence ou le nombre restreint d'études de cas pour le secteur maraîcher. De même, très peu de travaux ont été réalisés sur l'impact des changements climatiques sur les mauvaises herbes et les maladies. Et pour cause, pour étudier l'impact des changements climatiques, il faut suivre les paramètres ciblés en lien avec les espèces sur de longues périodes de temps (pour certaines des décennies…). Ce type d'étude cadre malheureusement mal dans le contexte actuel du financement de la recherche principalement en partenariat avec l'industrie.

Enfin, les études de cas sont intéressantes, car elles permettent de compiler de l'information à un moment donné, mais si ces informations ne sont pas mises à jour, elles deviendront vite obsolètes. Il semble plus intéressant de créer et de mettre à jour des fiches techniques comme celles réalisées par le RAP ou celles disponibles sur le site IRIIS phytoprotection. Ces fiches constituent des outils qui ont plus de chance d'être consultés puisqu'elles sont régulièrement mises à jour en fonction des données de dépistages récentes et de la veille bibliographique qui est réalisée par les groupes qui les rédigent. D'autres outils comme Agrométéo Québec permettent également un suivi quotidien des ennemis des cultures. Ce type de plateforme pourrait également servir à relayer l'information disponible dans ces fiches techniques produites par le RAP et celles disponibles sur IRIIS phytoprotection.

Si de nouvelles études de cas complètes (comprenant l'information de la revue de littérature jusqu'à la modélisation) devaient être réalisées dans l'avenir, il conviendrait de bien les cibler, en identifiant correctement les espèces faisant l'objet d'une étude. Peut-être qu'il serait important de faire des études de cas pour les espèces présentes au Québec et pour lesquelles il existe de nombreuses données sur le dépistage, sur la biologie et sur la phénologie, mais pour lesquelles il n'existe pas ou peu de modèles. Pour les espèces exotiques envahissantes, il faudrait se focaliser sur les espèces présentes dans les provinces canadiennes et les états américains voisins ayant un plus grand risque d'introduction. Cela passe par une amélioration de la veille bibliographique en renforçant le réseautage avec les services « d'extension » dans les autres provinces et états et à suivre l'évolution des problématiques dans ces régions. Pour toutes les espèces étudiées, il faudrait s'assurer de connaître les réponses à la température pour chaque stade de référence (œufs, larves, pupes, adultes) et de tenir compte d'autres facteurs qu'uniquement la température qui peuvent influencer les performances d'un insecte ou d'une maladie pour réaliser les modèles prévisionnels (ex. : influence de la photopériode et de l'humidité relative pour les insectes).

4.2.3 Développer et valider de nouveaux modèles prévisionnels

Les modèles prévisionnels sont utilisés comme outils d'aide à la décision en temps réel dans une saison pour une culture donnée, mais ils ont aussi été utilisés pour réaliser des études d'impacts des changements climatiques. Dans les deux cas, les types de paramètres nécessaires ne sont pas forcément les mêmes, tout comme la précision. Pour réaliser de la projection climatique, nous pouvons penser que le niveau de complexité des modèles peut limiter leur utilisation avec les scénarios climatiques alors qu'au contraire, dans le cas d'utilisation de modèles prévisionnels en temps réel, la

complexification des modèles pour intégrer le plus de variables explicatives est alors préférable. Quelle que soit leur utilisation, pour du temps réel ou de la projection future, il existe plusieurs freins à la création de modèles prévisionnels.

Pour les insectes, le principal frein est la disponibilité d'études sur leur biologie. Plusieurs modèles se basent sur les temps de développement en fonction des données sur la température ou du nombre de degrés-jours issus de la littérature, qui ne sont pas forcément des données québécoises. Certains insectes possèdent également des cycles de vie particuliers sous nos latitudes, avec des périodes de dormance (ou diapause) obligatoire ou facultative en fonction des conditions climatiques ou de la photopériode. Les facteurs qui déclenchent l'entrée ou la sortie de diapause ne sont pas toujours connus. Les modèles devraient alors tenir compte du couvert nival, de la température du sol et l'humidité. L'acquisition et la prise en compte de ces données pourraient permettre d'améliorer les modèles prévisionnels. Dans la majorité des cas, les modèles actuels ne se basent que sur l'accumulation de degrés-jours à partir d'une date donnée et des températures de l'air.

Dans de nombreux cas, il conviendrait d'acquérir des données sur le développement des insectes à différentes températures. Cela implique de faire des élevages en laboratoire pour prendre des mesures régulièrement ou bien de disposer de données historiques de dépistage effectués à différentes températures sur de longues périodes de temps et dans différents sites. Par exemple, les données des différents réseaux du RAP pourraient être exploitées pour réaliser des validations de modèles. Des essais peuvent aussi être réalisés en champ pour valider les modèles, dans des conditions réelles de terrain. D'autre part, pour de nombreux insectes, seulement des données de dépistage sont disponibles. De plus, le dépistage n'est souvent fait que sur un stade de développement, généralement les adultes et il n'existe donc pas de données sur le développement de certains insectes. Saguez et al. (2019) ont été confrontés à ce problème lorsqu'ils souhaitaient modéliser le développement du méligèthe des crucifères (*Brassicogethes viridescens*) dans la culture du canola au Québec. Il existe une base de données des captures de cet insecte sur plusieurs années, car un dépistage est effectué tous les ans pour déterminer la présence des adultes dans les champs de canola. En revanche, bien que l'espèce soit endémique au Québec, on connaît très peu de choses sur sa biologie. Ainsi, on ne sait pas quand l'espèce émerge du sol et à quelle vitesse s'effectue le cycle complet de développement de l'insecte.

Actuellement, contrairement au secteur pomicole, il existe peu de modèles bioclimatiques pour les insectes ravageurs de différentes grandes cultures et cultures

maraîchères et fruitières au Québec. De plus, certains insectes sont migrateurs (légionnaire uniponctuée, ver-gris noir, puceron du soya) et les dates d'arrivée de ces insectes au Québec sont très variables d'une année à l'autre et dépendent énormément des vents et des conditions rencontrées par ces insectes durant leur migration (stade des cultures, disponibilité en nourriture, etc.). Or, il existe un besoin de la part des différents réseaux du RAP, des agronomes et des producteurs de mieux comprendre la biologie de ces espèces afin de mieux prédire les dates et les risques de dommages. Également, les modèles actuels permettent de déterminer à quelles dates apparaîtront les différents stades de développement d'une espèce, mais ils ne permettent pas de prédire les niveaux possibles d'infestation, alors que le nombre d'ennemis des cultures présent dans un champ est un paramètre important pour déterminer si les cultures sont menacées et si elles doivent faire l'objet d'une intervention phytosanitaire.

Concernant les maladies, il y a très peu de modèles bioclimatiques qui existent au Québec (voir **Annexe 1**) car le développement phénologique et les conditions pour que les maladies se développent sont plus difficiles à modéliser et nécessitent d'intégrer plusieurs facteurs (ex. : durée et intensité du mouillage des feuilles). Dans le cas particulier des maladies virales, la présence de ces maladies dans les champs dépend essentiellement de la présence de leurs vecteurs. De plus, les virus peuvent être transmis selon un mode persistant ou non persistant dans le cas où les vecteurs sont des pucerons (Harris et Maramorosch 1977); dans le premier cas, le simple contact des pièces buccales de l'insecte avec les tissus de la plante permet la transmission du virus alors que pour les virus persistants, il y a des périodes de latence qui allongent les temps entre l'acquisition de l'agent infectieux et sa transmission à une autre plante. Pour toutes les maladies virales, le succès du virus et le développement de symptômes sont multifactoriels et peuvent dépendre de la quantité d'inoculum injectée dans la plante et de la résistance développée par les plantes pour faire face à ces virus (Pallas et Garcia 2011). Cela fait qu'il est compliqué de pouvoir faire des prédictions et donc de modéliser leur multiplication et leur développement. Les modélisations concernant les maladies virales reposent essentiellement sur les modélisations effectuées pour leurs insectes vecteurs. La modélisation des maladies fongiques est également complexe du fait qu'il faut aussi tenir compte de plusieurs facteurs et de la complexité des cycles de développement des champignons. Comme pour les insectes, les champignons peuvent entrer dans des phases de dormance avec l'apparition de formes de résistance à l'hiver et dans certains cas, l'enkystement peut durer plusieurs saisons ou plusieurs années avant que les conditions soient à nouveau favorables au développement du pathogène et de la maladie. Les spores des champignons peuvent également être véhiculées par l'eau et le vent. Ces facteurs ne sont pas pris en compte dans les modélisations alors

qu'ils participent fortement à la dissémination des espèces (Ingold 1953). Pour les modèles concernant les maladies fongiques, il faut également tenir compte de paramètres tels que l'humidité, la durée et l'intensité du mouillage du feuillage (Huber et Gillespie 1992).

Les prédictions sont en constante évolution, car l'utilisation des modèles prévisionnels génère des résultats différents selon les années de référence qui sont prises en compte, l'acquisition de nouvelles données sur le développement des espèces, l'espèce hôte et les différents scénarios climatiques envisagés qui peuvent changer après plusieurs années. Dans le cadre des travaux menés sur la distribution future de la punaise marbrée au Québec et en Amérique du Nord, les prédictions des modèles avec les scénarios ont déjà évolué comparativement à l'étude de Mimee et al. (2014). Cela a notamment conduit à la révision des cartes de distribution potentielle de l'espèce (Firlej et al. 2019, Saguez et al. 2019). Enfin, pour que les modèles soient fiables, il est important de pouvoir les valider avec des observations sur le terrain et en intégrant régulièrement ces nouvelles données dans les modèles, ce qui implique de devoir faire régulièrement du dépistage sur plusieurs années consécutives, puisque les conditions climatiques sont très variables d'une année sur l'autre.

Le développement de modèles prédictifs ou prévisionnels est donc un processus long qui peut expliquer qu'il y en ait peu de disponibles au Québec. De plus, il y a très peu d'équipes de recherche qui travaillent sur le développement de modèles. Il n'en reste pas moins que des programmes comme le logiciel CIPRA et Agrométéo Québec peuvent s'avérer de bons outils pour obtenir en temps réel des informations sur les risques liés à la présence d'ennemis des cultures. Ces outils sont souvent utilisés par les agronomes et les producteurs pour avoir des prévisions en temps réel.

4.2.4 Utiliser, adapter ou développer de nouveaux outils prévisionnels

Afin de mieux prédire l'introduction de nouvelles espèces, de nouvelles pistes pourraient être envisagées. Plusieurs dépisteurs et agronomes participant aux réseaux de surveillance souhaiteraient avoir la possibilité de régionaliser les risques d'avoir la présence d'ennemis.

Au Québec, il serait possible de s'inspirer des cartes prédictives de distribution réalisées par le Prairie Pest Monitoring Network pour créer des outils prévisionnels à court terme (saison à venir). Ces cartes sont établies à partir de modèles CLIMEX développés par Agriculture et Agroalimentaire Canada. Pour certaines espèces, grâce aux données

historiques de dépistage, il est possible de prédire où les phytoravageurs pourraient être présents et causer des dommages. Les modèles utilisés devraient permettre de prendre en compte d'autres facteurs que la température ou le nombre de degrés-jours accumulés. Une bonne connaissance des déplacements des ennemis des cultures peut également permettre de réaliser des cartes. En effet, lorsque l'on connaît la région d'origine des espèces migratrices et que l'on tient compte des facteurs climatiques et biologiques, il est possible de créer des cartes de prédiction du risque. C'est par exemple le cas d'Insect Forecast qui permet, en fonction d'une date déterminée, de savoir où sera une espèce. Le site Web donne des prédictions pour cinq insectes différents. D'autres exemples existent comme des outils qui se basent sur les historiques de captures.

4.2.5 Développer ou utiliser de nouveaux outils de dépistage

L'intelligence artificielle prend une place de plus en plus importante dans notre quotidien et il est possible de l'intégrer à de nouveaux outils pour améliorer le suivi des ennemis. Plusieurs exemples de technologies nouvelles ont fait leur apparition au cours des dernières années.

Le CÉROM, le CIEL, l'IRDA et Prisme/Phytodata réalisent des projets visant l'utilisation de pièges automatisés pour la reconnaissance et le dénombrement automatiques des insectes capturés dans les pièges. Grâce à la prise de photos et l'analyse de celles-ci par des algorithmes, ce type de piège permet d'améliorer la précision concernant les dates de captures dans le temps et d'affiner les dates d'intervention. Ces pièges permettraient également de mettre en place des suivis et des dépistages plus efficaces, dans lesquels l'acquisition et le traitement des données seraient plus rapides et permettraient d'améliorer et d'accélérer le transfert d'informations auprès des agronomes et des producteurs. Ces pièges offrent également la possibilité de faire du dépistage dans des régions et secteurs plus éloignés et permettraient donc de réduire les déplacements pour aller vérifier les contenus des pièges.

D'autres technologies comme les radars, le LIDAR (télédétection par laser) par exemple, peuvent être utilisées pour faire de la surveillance d'insectes. Il est également possible d'introduire de nouveaux robots ou des drones équipés de systèmes de détection de maladies, d'adventices ou de ravageurs dans les champs grâce à l'analyse d'imagerie basée sur des photos multispectrales. Toutefois, il existe actuellement quelques restrictions sur l'usage des drones (ex. : permis et certifications pour les pilotes,

interdiction de transport d'organismes vivants, et autres nouvelles règles qui seront en vigueur en juin 2019) qui peuvent freiner l'utilisation de ces technologies.

Les maladies peuvent également être dépistées *in situ*, directement dans le champ, grâce à des kits d'identification ou de détection. Par exemple, Pocket Diagnostic a développé des trousses pour le dépistage de maladies dans le soya, la pomme de terre, etc.). De plus, un projet de Phytodata sur le potentiel d'un appareil portable de détection de maladies dans la fraise est actuellement en cours.

Pour la biosurveillance des ennemis des cultures, il serait également possible de s'inspirer du Projet BioSAFE, dirigé par le Dr Richard Hamelin et impliquant de nombreux chercheurs, postdoctorants et étudiants de différentes organisations pour la biosurveillance des ennemis envahissants des forêts. Ce projet se base sur l'utilisation de la génomique pour décoder le génome des espèces envahissantes et des agents pathogènes afin d'identifier les sources d'épidémie et de déterminer quels sont les traits associés à leur pouvoir envahissant. Ces outils génomiques permettent de développer des techniques à la pointe de la technologie afin de mieux prévenir et prédire les invasions de nouvelles espèces. Ils pourraient ensuite être utilisés au niveau des points d'entrée au Canada (routes, ports et aéroports). L'ACIA effectue déjà des inspections dans les ports et les aéroports pour suivre l'introduction d'espèces exotiques envahissantes (Desplanques et Duchaine - Journal de Montréal - 24 novembre 2018)

Enfin, il conviendrait de développer des applications numériques pour le Québec, pour suivre les ennemis des cultures. Ces applications pourraient s'inspirer de eButterfly et de Mission Monarque (développées par l'Insectarium de Montréal), eTick (développée par l'Université Bishop) ou encore iNaturalist, et dans lesquelles il est possible d'entrer des observations de différentes espèces (selon l'application) à partir de photos et de géolocaliser ces observations. Les données sont ensuite colligées dans des bases de données et validées par des experts. Cela permet de suivre en temps réel le déplacement des insectes et de déterminer leurs aires de répartition. Ces applications reposent beaucoup sur la science citoyenne et la participation du public, mais elles permettent aussi de compiler de précieuses données qui sont parfois utilisées par des scientifiques dans divers projets de recherche. Dans certains cas, ce type d'application permet aussi de rapporter la présence de spécimens rares grâce à l'implication du grand public. Il existe d'autres applications comme Survey123 for ArcGIS, initialement développées pour effectuer des sondages et qui ont été adaptées pour permettre d'entrer des données de dépistage. Ce système est notamment utilisé par la Canadian

Corn Pest coalition pour suivre en temps réel l'évolution des populations de ver-gris occidental du haricot à travers plusieurs états américains et provinces canadiennes. L'Ontario a également mis en place un programme de sensibilisation sur les espèces invasives et a développé une application pour le suivi des espèces invasives. De telles applications pourraient être développées au Québec et être utilisées par les conseillers agricoles ainsi que les producteurs pour compiler les données sur les espèces présentes au Québec. La validation des spécimens pourrait être effectuée par le Laboratoire d'expertise et de diagnostic en phytoprotection du MAPAQ ou par les membres des groupes de travail des réseaux du RAP.

4.2.6 Identifier ou développer de nouvelles méthodes de lutte

Afin d'être mieux préparé à l'introduction de nouvelles espèces au Québec, il conviendrait d'envisager l'identification ou le développement de nouvelles méthodes de lutte ou de tester certaines méthodes existantes sur des ennemis proches des espèces envahissantes, car réaliser des travaux directement sur les EEE nécessite d'avoir des laboratoires avec un haut niveau de confinement et d'obtenir les permis d'importation, afin d'éviter la dispersion de ces EEE (voir paragraphe 4.1).

Des programmes de recherche pourraient être mis en place pour encourager le développement de biopesticides, notamment à partir de plantes bio-industrielles. Il serait également important d'encourager les études et les recherches sur les ennemis naturels, afin de déterminer entre autres si certains de ceux connus pour lutter contre les espèces exotiques envahissantes sont déjà présents au Québec et pourraient permettre de contrôler les ravageurs en cas d'introduction. Il existe plusieurs règles à respecter notamment pour l'introduction et l'utilisation d'ennemis naturels au Canada (voir paragraphe 4.1).

4.2.7 Accroître le maillage entre les différents réseaux de surveillance, les groupes de recherche et les acteurs de la phytoprotection

Au Québec, on travaille souvent dans des réseaux locaux ou régionaux et plutôt restreints, notamment en raison de la barrière linguistique avec le reste du pays. Plusieurs réseaux anglophones ne peuvent pas prendre en compte les données québécoises, car les informations sont généralement publiées en français uniquement. Toutefois, les Québécois parlant davantage couramment en anglais que les Canadiens des provinces anglophones en français, il leur est possible d'intégrer ces réseaux de surveillance, d'aller chercher de l'information chez leurs voisins et de collaborer à plusieurs projets en commun. La participation à des activités de réseautage

(conférences, webinaires, congrès, rencontre entre réseaux provinciaux et « extensions » américaines) devrait être encouragée, notamment en permettant la diffusion de résultats dans des congrès nationaux et internationaux et le partage d'information et la mise en commun de données. L'agrandissement des réseaux peut passer par les chercheurs, les coordinateurs des réseaux d'avertissements phytosanitaires qui ont la possibilité de présenter leurs travaux de recherche dans ce type d'évènement. Cela permet également aux chercheurs de réseauter avec leurs homologues des autres provinces et d'établir des collaborations qui peuvent être bénéfiques pour des problématiques communes. Cela évite parfois certaines compétitions entre centres de recherche ou le dédoublement des projets. Toutefois, la plupart des programmes provinciaux ne permettent pas actuellement de pouvoir effectuer des déplacements à l'extérieur de la province, ce qui peut limiter la diffusion des résultats et le réseautage.

Le réseau des 19 centres de recherche d'Agriculture et Agroalimentaire Canada constituent un bel exemple de mise en commun des forces de travail. De l'Atlantique au Pacifique, les équipes de recherche de ces centres peuvent travailler en synergie en faisant appel à des compétences situées à travers tout le pays. Ce réseau de centres peut aussi s'appuyer sur d'autres expertises fédérales dont l'ACIA et Environnement Canada. Le très bon maillage qui existe entre ces structures fédérales constitue une force de travail non négligeable permettant l'avancée rapide des recherches.

Au Québec, il conviendrait de renforcer les réseaux de surveillance entre provinces et d'établir de meilleures collaborations avec les réseaux « d'extension » aux États-Unis, notamment pour le suivi des espèces migratrices. L'un des premiers exemples à avoir été mis en place et que l'on peut citer est la Canadian Corn Pest Coalition qui a développé un réseau de surveillance pour le ver-gris occidental du haricot et qui regroupe des partenaires de l'Ontario, du Québec, des Maritimes et de l'état du Michigan. D'autres états américains (New York et Vermont) se joindront prochainement à ce grand réseau nord-américain. Ce réseau prévoit même d'élargir la compilation des données de dépistage de plusieurs autres espèces de ravageurs. Le partage des connaissances à travers ce réseau permettra de mieux gérer cet ennemi des cultures qui représente une nouvelle menace pour les cultures de maïs. Un groupe de travail pancanadien sur la surveillance, entre autres priorités, a été mis en place à l'hiver 2019 dans le cadre de la Stratégie sur la santé des végétaux et des animaux pour le Canada. Des intervenants de plusieurs secteurs et provinces font partie de ce groupe de travail dont l'objectif principal est de coordonner et d'améliorer les activités de surveillance et de contrôle phytosanitaires au Canada. Sont inclus dans ce projet les organismes

nuisibles émergents, endémiques et réglementés. Le groupe de travail comprend plusieurs membres des autorités gouvernementales fédérales (AAC, ACIA, Ressources naturelles Canada), des provinces de l'Alberta, du Manitoba, de l'Ontario et du Québec ainsi que d'autres associations.

Il est nécessaire que les recherches réalisées sur les espèces invasives en lien avec les changements climatiques aient une envergure internationale et qu'elles impliquent des équipes provenant de plusieurs provinces et même de plusieurs états ou pays. Le Laboratoire de diagnostic et d'expertise du MAPAQ, les avertisseurs du RAP et les gestionnaires d'IRIIS phytoprotection seraient les personnes qui devraient en premier lieu être des acteurs du réseautage hors Québec.

Enfin, il serait important d'impliquer des groupes comme la **Coordination services-conseils** et les **Réseaux Agriconseils** qui développent des outils et assurent du transfert de connaissances auprès des dispensateurs de services-conseils et des producteurs agricoles au Québec.

4.2.8 Améliorer le transfert des connaissances

L'un des facteurs clés de la réussite de l'adaptation en agriculture est la transmission de l'information auprès des acteurs de la filière agricole (producteurs, conseillers en agroenvironnement, chercheurs). Une bonne connaissance de l'impact des changements climatiques sur les cultures et leurs ennemis permettra de les outiller afin de faire face aux risques et de mettre en place des bonnes pratiques de gestion intégrée des ennemis des cultures. Gagnon et al. (2013) ont identifié les meilleures sources d'informations et les outils de communication pour rejoindre les différents acteurs de la filière agricole. Il est possible de constater qu'il existe des différences selon les types de producteurs et de cultures. Actuellement, Agri-Réseau est l'une des principales plateformes pour la diffusion des documents en lien avec l'agriculture au Québec. Bien qu'elle regroupe une quantité importante d'information, cette plateforme est souvent critiquée pour son manque de convivialité, notamment concernant la navigation dans l'outil et la recherche de documents archivés. Cela peut être dû au référencement inadéquat des documents lors de leur dépôt sur la plateforme. En février 2019, l'équipe de coordination d'Agri-Réseau annonçait avoir apporté des modifications à son site, pour le rendre plus intuitif et plus simple à utiliser.

Pour une meilleure transmission des connaissances, plusieurs voies sont envisageables, parmi lesquelles:

- La publication de fiches techniques détaillées sur les espèces exotiques envahissantes par le Réseau d'avertissements phytosanitaire;
- L'enrichissement d'IRIIS phytoprotection avec une section consacrée aux espèces exotiques envahissantes qui aiderait à reconnaître ces nouveaux ravageurs potentiels. Toutefois, cela peut être difficile, car il faut prendre des accords avec des laboratoires internationaux pour obtenir des spécimens et les prendre en photos vivants ou avoir l'autorisation des auteurs pour publier leurs photos;
- L'augmentation et la modernisation de la diffusion via les différents réseaux du RAP en utilisant de nouveaux supports (ex. : messagerie texte). Chaque réseau devrait s'appuyer sur une équipe forte et ayant un bon réseau de contacts avec les provinces et états voisins pour effectuer une meilleure veille scientifique et surveillance;
- Une meilleure utilisation des médias sociaux;
- L'utilisation d'applications numériques pour pouvoir envoyer des notifications sur les appareils intelligents;
- Un meilleur réseautage avec les sociétés savantes (Sociétés d'entomologie du Québec, Société d'entomologie du Canada, Société de Protection des Plantes du Québec, Société de phytopathologie, etc.);
- Un meilleur maillage avec les associations de producteurs pour favoriser la diffusion de l'information à leurs membres;
- Un meilleur maillage avec les médias grands publics pour conscientiser la population aux risques liés à l'introduction de nouvelles espèces et faire connaître les avancées en phytoprotection (lutte intégrée).

Actuellement le centre d'expertise Ouranos crée un maillage entre les différents chercheurs sur les changements climatiques et regroupe les publications des projets qu'ils ont financé. Cependant, ils ne jouent actuellement pas un rôle d'organisme centralisateur pour la phytoprotection particulièrement. D'autres voies pourraient être explorées comme la création d'une plateforme ou d'un centre d'expertise dédié spécifiquement à la phytoprotection en lien avec les changements climatiques. Cette structure pourrait regrouper plusieurs acteurs de la filière, à l'image du Centre SÈVE. Cela permettrait de mutualiser les forces de travail, regroupant des experts multidisciplinaires et permettrait d'éviter le dédoublement des projets de recherche.
Enfin, il serait également possible d'organiser au Québec une rencontre ou un sommet sur l'impact des changements climatiques sur les espèces invasives et les conséquences que cela générera pour l'agriculture. Les chercheurs québécois pourraient aussi être encouragés à participer à des rencontres de ce type comme le *Grand Challenge Agenda*

for Entomology organisé à Vancouver en novembre 2018 et au cours duquel plusieurs pistes ont été envisagées pour mieux gérer les espèces exotiques envahissantes.

Au-delà de toutes ces considérations, une consultation des utilisateurs (producteurs, experts, agronomes, étudiants, associations, etc.) serait le meilleur moyen de définir les outils pour favoriser le transfert des connaissances sur la phytoprotection et les changements climatiques.

4.2.9 Le financement de la recherche

Le financement de la recherche est la pierre angulaire de l'avancée des recherches en phytoprotection en lien avec les changements climatiques. Actuellement, la plupart des programmes provinciaux permettent de réaliser des projets sur une durée maximale de trois ans voire cinq ans pour certains projets ciblés. De plus, les budgets sont généralement restreints et ne permettent pas d'effectuer un réseautage à grande échelle avec les provinces ou les états voisins. Souvent, les projets de recherche nécessitent également l'implication de l'industrie, mais des projets de recherche fondamentale attirent beaucoup moins les investisseurs que les projets en recherche appliquée. Il conviendrait donc de continuer à subventionner les méthodes d'adaptation via les programmes actuels, mais aussi de peut-être mettre en place des programmes spécifiques en lien avec les changements climatiques qui représentent l'un des grands enjeux mondiaux actuellement. Les fonds publics devraient servir à mettre au point des technologies novatrices et indispensables pour la détection, l'intervention et la gestion des ennemis des cultures, mais aussi pour former et employer les personnes impliquées dans ces recherches. D'autres leviers devraient également être recherchés pour mettre en commun les forces de recherche.

Cependant, il est ressorti de nos consultations spécifiquement en lien sur la phytoprotection que pour l'instant, il est très difficile de savoir quels résultats de projets de recherche se rendent jusqu'à la ferme et sont adoptés par les producteurs. Il n'existe quasiment pas d'analyses économiques sur l'utilisation des pratiques de lutte biologique ou intégrée au Québec, hormis celle de Belzile et Ndefo (2018). Les organismes de subvention injectent énormément de fonds en recherche pour le domaine de la phytoprotection (également en lien avec les changements climatiques aussi), mais n'ont aucune idée de l'état d'adoption des pratiques ou de l'acquisition des connaissances. Également, une fois le projet terminé, il n'est pas rare que le transfert au secteur ne soit pas encore réalisé ou s'arrête tout simplement, faute de fonds. Il a également été soulevé que les consultations avec les associations et les producteurs sur

la faisabilité des projets ne sont pas toujours présentes pour l'élaboration des projets de recherche. Il y a matière à s'inspirer de certains programmes qui imposent un comité de suivi sur lesquels peuvent siéger un producteur ou le président d'une association de producteurs. Le lien avec les utilisateurs directs des résultats de la recherche est souvent déficient et devrait être une obligation.

CONCLUSIONS

Cette synthèse démontre que le Québec possède plusieurs atouts pour faire face aux changements climatiques et mettre en place des programmes d'adaptation en agriculture. Plusieurs groupes de recherche incluant des chercheurs, professionnels, agronomes et étudiants génèrent beaucoup de nouvelles connaissances à travers de multiples projets sur l'effet des changements climatiques sur la phytoprotection. La création du Fonds vert et le Consortium de recherche Ouranos sont responsables pour une bonne partie de ce dynamisme tout comme la conscientisation du public et des gouvernements. Plusieurs points importants sont à retenir :

Les recherches sur les impacts

Les études d'impact et d'adaptation réalisées depuis quelques années ciblant majoritairement les grandes cultures et les cultures fruitières ont donné des résultats très intéressants.

Les adaptations

Grâce à du financement ciblé depuis quatre ans, plusieurs des recommandations issues des projets ont pu être suivies et de nombreuses mesures d'adaptation sont en cours de développement.

Les services et outils

Le Québec peut s'appuyer sur plusieurs entités fournissant un excellent service aux intervenants du secteur agricole (le RAP, IRIIS, SAgE pesticides, divers laboratoires de détection et de diagnostic, Agrométéo Québec, etc.). Plusieurs outils ont également été développés, permettant déjà de mettre en place des mesures d'adaptations et d'effectuer du transfert de connaissance auprès des producteurs.

Les financements

Les divers programmes des gouvernements du Québec et du Canada permettent d'assurer une certaine diversification des sources de financement pour les recherches en lien avec les changements climatiques et la phytoprotection.

Certes le Québec possède de grands atouts, mais plusieurs défis restent à relever dans les années à venir si la province souhaite s'adapter rapidement et efficacement aux changements climatiques. De manière générale, il sera important pour le Québec de:

- ★ Poursuivre l'acquisition de connaissances pointues et sur du long terme en:
  - Développant et en mettant en place des bases de données des ennemis des cultures (insectes, maladies, mauvaises herbes et nématodes);
  - Finançant certaines études d'impacts, mais très ciblées pour des domaines orphelins notamment les ravageurs des cultures maraîchères, les espèces migratrices, les relations ravageurs et ennemis naturels, les mauvaises herbes, les maladies, etc.

- ★ Poursuivre les efforts de développement d'outils de modélisation et de dépistage pour mieux :
  - Prédire et voir évoluer les espèces présentes à risques avec les changements climatiques au Québec;
  - Reconnaître et prévenir les arrivées d'EEE.

- ★ Poursuivre le développement de nouvelles méthodes de lutte pour favoriser l'adaptation aux changements climatiques, mais en :
  - Impliquant des utilisateurs de première ligne lors de la réalisation des projets et la formation de comité de suivi;
  - Intensifiant le transfert des résultats de recherche vers les utilisateurs;
  - Intégrant le plus souvent possible des études économiques (pour les projets appliqués);
  - Mesurant les projets dont les outils et les connaissances sont réellement intégrés par les utilisateurs ciblés.

- ★ Intensifier le maillage et le transfert de connaissances pour accélérer l'adaptation d'une:
  - Nouvelle structure organisationnelle autour des changements climatiques et de la phytoprotection qui pourrait être créée pour maintenir le dynamisme actuel, mais surtout pour faciliter le réseautage, le développement de projet de recherche et la diffusion des connaissances;
  - Meilleure connaissance des outils de transfert adéquats pour les publics ciblés serait à obtenir.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abram P.K., Talamas E.J., Acheampong S., Mason P.G. et Gariepy T.D. 2019. First detection of the samurai wasp, *Trissolcus japonicus* (Ashmead) (Hymenoptera, Scelionidae), in Canada. *Journal of Hymenoptera Research*, **68**: 29-36.

Andrew N.R. et Hughes L. 2004. Species diversity and structure of phytophagous beetle assemblages along a latitudinal gradient: predicting the potential impacts of climate change. *Ecological Entomology*, **29:** 527-542.

Audet R., Côté H., Bachand D. et Mailhot A. 2012. Atlas agroclimatique du Québec : Évaluation des opportunités et des risques agroclimatiques dans un climat en évolution. Rapport Ouranos.

Bachand D. 2017. Bilan de l'utilisation et promotion de l'atlas agroclimatique du Québec et d'autres outils en agrométéorologie. Fiche projet OURANOS, 1 page.

Bachand D., L. Lauzon et G. Bourgeois. 2012. Sensibilisation et diffusion d'informations sur les opportunités et les risques associés aux changements climatiques pour l'agriculture au Québec. Rapport Ouranos.

Belzile L. et Ndefo, F. 2018. Impact de l'adoption de la gestion intégrée des ennemis des cultures sur la rentabilité des entreprises de grandes cultures. IRDA, 2 pages.

Berteaux D. 2009. Les effets des changements climatiques sur la biodiversité du Québec. *In Vivo,* **29:** 8-10.

Bianchi F., Booij C.J.H. et T. Tscharntke. 2006. Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: A review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, **273:** 1715-1727.

de Blois S., Boisvert-Marsh L., Schmucki R., Lovat CA, Byun C., Gomez-Garcia P., Otfinowski R., Groeneveld E. et Lavoie C. 2013. Outils pour évaluer les risques d'invasion biologique dans un contexte de changements climatiques. Rapport Ouranos, 80 pages.

Boland G.J., Melzer M.S., Hopkin A., Higgins V. et Nassuth A. 2004. Climate change and plant diseases in Ontario. Canadian Journal of Plant Pathology. **26:** 335–350.

Boucher A.C., Gagnon A.-É. et Chouinard G. 2017. Analyse des approches et des technologies novatrices en termes de surveillance phytosanitaire dans les grandes cultures et les cultures horticoles au Québec. Rapport final CÉROM-IRDA, 231 pages.

Brodeur J. Boivin G., Bourgeois G., Cloutier C., Doyon J., Grenier P. et Gagnon A.-É. 2013. Impacts des changements climatiques sur le synchronisme entre les ravageurs et leurs ennemis naturels : conséquences sur la lutte biologique en milieu agricole au Québec Rapport Ouranos, 124 pages.

Chapin F.S., Zavaleta E.S., Eviner V.T., Naylor R.L., Vitousek P.M., Reynolds H.L., Hooper D.U., Lavorel S., Sala O.E., Hobbie S.E., Mack M.C. et Diaz S. 2000. Consequences of changing biodiversity. *Nature*, **405:** 234-242.

Chouinard G., Lamothe S., Bellerose S., Roy M., Bourgeois G. et Lease N. 2007. Réchauffement climatique et culture du pommier. IRDA, 1 page.

Chouinard G., Larose M., Légaré J-P., Bourgeois G., Racette G. et Barrette M. 2018. Interceptions and captures of Halyomorpha halys (Hemiptera: Pentatomidae) in Quebec from 2008 to 2018. *Phytoprotection*, **98(1):** 1-50.

Delisle A. 2017. Bilan de l'utilisation et promotion de l'atlas agroclimatique du Québec et d'autres outils en agrométéorologie. Fiche projet OURANOS, 1 page.

Diaz S., Fargione J., Chapin F. S. et Tilman D. 2006. Biodiversity loss threatens human well-being. *PLoS Biology*, **4:** 1300-1306.

Dieni A. et Firlej A. 2018. Amélioration des techniques d'identification moléculaires des ravageurs pour répondre aux besoins en diagnostic du secteur agricole dans le contexte des changements climatiques. Rapport IRDA, 37 pages.

Dupras J. 2016. Pérennisation des pratiques agroenvironnementales et des aménagements agro-fauniques. Fiche projet Ouranos, 1 page.

FAO. 2019. The State of the World's Biodiversity for Food and Agriculture, J. Bélanger & D. Pilling (eds.). FAO Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture Assessments. Rome. 572 pages.

Firlej A., Ricard M.-P., Bourgeois G., Dieni A., Ménard E. et Grenier P. 2019. Adaptation des mesures phytosanitaires pour les ravageurs et maladies des cultures fruitières à l'égard des impacts des changements climatiques. Rapport final pour Ouranos et le MAPAQ (in prep.).

Firlej A. et Brodeur J. 2010. Prédire l'effet de l'augmentation du CO_2 sur les populations de pucerons…La réponse est-elle dans l'azote? Réunion annuelle de la Société d'entomologie du Québec. Présentation donnée à Trois-Rivières (Canada).

Firlej A., Légaré J.-P., Landry J.-F., Hogue R., Chouinard G. et Cormier D. 2013. DNA barcoding: an innovative tool to identify internal lepidopterans in apples. *IOBC Bulletin*, **91:** 269-271.

Firlej A., Tocco A. et Brodeur J. 2011. L'effet du CO_2 et de la fertilisation azotée sur les pucerons et leurs ennemis naturels en culture de poivron. Forum innovation et recherche en serriculture. Présentation donnée à Montréal (Canada)

Firlej A., Veilleux J., Vanoosthuyse F., Deland J.-P., Plouffe D., Bourgeois G. et Cormier D. 2014. Adaptation d'un outil de dépistage des adultes de la cécidomyie des atocas (*Dasineura oxycoccana*) pour la culture des canneberges. Rapport final présenté au CDAQ dans le cadre du PCAA. Rapport IRDA, 29 pages.

Gagnon A.-È., Arsenault-Labrecque G., Bourgeois G., Bourdages L., Grenier P. et Roy M. 2013. Études de cas pour faciliter une gestion efficace des ennemis des cultures dans le contexte de l'augmentation des risques phytosanitaires liés aux changements climatiques. Rapport OURANOS.

Gagnon P., Sheedy C., Rousseau A.N., Bourgeois G., Chouinard G. et Lafrance P. 2015. Impact des changements climatiques sur la contamination de l'eau de ruissellement par les pesticides. Rapport d'Agriculture et Agroalimentaire Canada.

Gardiner M.M., Landis D.A., Gratton C., DiFonzo C.D., O'Neal M., Chacon J.M. et al. 2009. Landscape diversity enhances biological control of an introduced crop pest in the north-central USA. *Ecological Applications*, **19:** 143-154.

Gendron St-Marseille A-F., Bélair G., Brodeur J. et Mimee B. 2015. Impact des changements climatiques sur les interactions moléculaires entre le nématode à kyste du soya (*Heterodera glycines*) et son hôte principal, le soya (*Glycine max*) *Phytoprotection*, **95(1):** 41.

Giroux I. 2019. Présence de pesticides dans l'eau au Québec : Portrait et tendances dans les zones de maïs et de soya – 2015 à 2017, Québec, ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement, 64 pages.

Hajjar R., Jarvis D.I. et Gemmill-Herren B. 2008. The utility of crop genetic diversity in maintaining ecosystem services. *Agriculture Ecosystems & Environment*, **123:** 261-270.

Harris K.F. et Maramorosch K. 1977. Aphids as virus vector. Academic Press Inc, New york

Huber L. et Gillespie T.J. 1992. Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology. *Annual Review of Phytopathology*, **30:** 553-577.

Hughes A.R., Inouye B.D., Johnson M.T.J., Underwood N. et Vellend M. 2008. Ecological consequences of genetic diversity. *Ecology Letters*, **11:** 609-623.

Ingold C.T. 1953. Dispersal in fungi. Oxford University Press, London. 197 pages.

Jean C. 2010. Lutte intégrée contre le puceron du soya. Ed. Fédération des producteurs de cultures commerciales du Québec. 20 pages.

Jochems L., Boisclair J., Belzile L., Leblanc M., Boislard T., Chaussé S. et Mougeot S. 2018. Le chia : une nouvelle culture pour la production biologique au Québec. IRDA. 2 pages.

Jones N.K. 2012. The influence of recent climate change on wine regions in Quebec, Canada. *Journal of wine research*, **23:** 103-113.

Lemaire S., Neau M., Fréchette I., Fournier V., Saguez J.2018. La légionnaire uniponctuée: un ennemi des grandes cultures sous haute surveillance au Québec. Journée Phytoprotection du CRAAQ. 12 Juillet 2018. CÉROM. (Poster).

Lobell A.B. et Gourdji S.M. 2012. The Influence of Climate Change on Global Crop Productivity. Plant Physiology, 160: 1686–1697

Loboda S., Savage J., Buddle C.M., Schmidt N.M. et Høye T.T. 2018. Declining diversity and abundance of High Arctic fly assemblages over two decades of rapid climate warming. *Ecography*, **41:** 265-277.

McNaughton S.J. 1977. Diversity and stability of ecological communities: a comment on the role of empiricism in ecology. *The American Naturalist*, **111:** 515 –525.

Mimee B., Brodeur J., Bourgeois G., Moiroux J., Gendron Saint-Marseille A. et Gagnon A.-É. 2014. Quels enjeux représentent les changements climatiques en lien avec les espèces exotiques envahissantes pour la culture du soya au Québec? Rapport Ouranos, 51 pages.

Ngom R. et Gosselin P. 2017. Télédétection, cartographie extensive et surveillance de la présence de l'herbe à poux (*Ambrosia artemisiifolia*). Fiche technique Ouranos, 1 page.

Pallas V. et Garcia J.A. 2011. How do plant viruses induce disease? Interactions and interference with host components. *Journal of General Virology*, **92:** 2691–2705.

Parmesan C. 2006. Ecological and Evolutionary Responses to Recent Climate Change. *Evolution and Systematics*, **37:** 637-669.

Peters K., Breitsameter L. et Gerowitt G. 2014. Impact of climate change on weeds in agriculture: a review. *Agronomy for Sustainable Development,* **34(4):** 707-721.

Reusch T.B.H., Ehlers A., Hammerli A. et Worm B. 2005. Ecosystem recovery after climatic extremes enhanced by genotypic diversity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **102:** 2826-2831.

Saguez J. 2017. Impact des changements climatiques et mesures d'adaptations pour les ravageurs présents et potentiels en grandes cultures au Québec. Synthèse bibliographique. CÉROM, 70 pages.

Saguez J. 2019. Impact des changements climatiques et mesures d'adaptations pour les ravageurs présents et potentiels en grandes cultures au Québec. CÉROM. Rapport final pour Ouranos et le MAPAQ (in prep.).

Saguez J. et Fréchette I. 2018. Le ver-gris occidental du haricot : un ennemi du maïs placé sous surveillance. Grains **28(5):** 28-29.

Saguez J., Lasnier J. et Vincent C. 2013. First record of *Drosophila suzukii* in Quebec vineyards. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, **47(1):** 69-72

Sentis A. 2012. Effet de la température sur les interactions trophiques et intraguildes au sein d'un système plante-herbivore-ennemis naturels : modélisation et approches expérimentales. Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier; Université de Montréal, 119 pages.

Smargiassi A., Plante C., Goudreau S., Hubert F. et Fradette J. 2013. Développement, implantation et évaluation d'une intervention pour le contrôle du pollen de l'herbe à poux. Rapport Ouranos, 25 pages.

Zhao et collaborateurs. 2017. Temperature increase reduces global yields of major crops in four independent estimates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **114(35):** 9326-9331.

Ziska L.H. et Runion B. 2007. Future weed, pest, and disease problems for plants. Dans: Newton, P.C.C., Carran, R.A., Edwards, G.R., Niklaus, P.A. (Éds.), Agroecosystems in a changing climate. Taylor & Francis group, New York, pp. 261-279.

Ziska L.H., Teasdale J.R. et Bunce J.A. 1999. Future atmospheric carbon dioxide may increase tolerance to glyphosate. *Weed Science* **47:** 608-615.

ANNEXES

Annexe 1: Liste des experts et institutions consultés pour la collecte des informations pour réaliser la synthèse.

Nom	Institution	Fonction
Marianne St-Laurent	MAPAQ, Direction de la phytoprotection	Responsable programme Prime-Vert Volet 3, 2013-2018
Thierry Poiré	CFIA-ACIA	Biologiste des enquêtes
Annie-Ève Gagnon	AAC (Saint-Jean-sur-Richelieu)	Chercheuse
Mégane Vankosky	AAC (Saskatchewan)	Chercheuse
Valérie Fournier	Université Laval (Québec)	Professeure
Conrad Cloutier	Université Laval (Québec)	Professeur
Amélie Gervais	Université Laval (Québec)	Étudiante, Candidate au doctorat
Benjamin Mimee	AAC (Saint-Jean-sur-Richelieu)	Chercheur
Joseph Moisan-De Serres	MAPAQ Direction de la phytoprotection Laboratoire d'expertise et de diagnostic en phytoprotection	Biologiste-entomologiste
Sophia Boivin	MAPAQ, Direction de la	Coordonnatrice mesures

	phytoprotection	législatives et d'urgence en phytoprotection
Isabelle Duchesne	La Financière agricole du Québec	
Bruno Gosselin	MAPAQ Direction de la phytoprotection, Réseau d'avertissements phytosanitaires	Coordonnateur du RAP
Sonia Néron et Janique Lemieux	MELCC	Chef de la division des pesticides
Gérald Chouinard	IRDA	Chercheur
Josée Boisclair	IRDA	Chercheuse
Maryse Leblanc	IRDA	Chercheuse
Hervé van der Heyden	Phytodata	Chercheur
Anne Blondlot	Ouranos	Coordinatrice programme agriculture, pêches et aquacultures commerciales
Richard Bélanger	Université Laval	Professeur
Russell Tweddell	Université Laval	Professeur

Annexe 2 : Liste des modèles disponibles dans le logiciel CIPRA en février 2019 (Gracieuseté Dominique Plouffe, Agriculture et Agroalimentaire Canada - CDR Saint-Jean-sur-Richelieu).

Culture	Modèle	Type	Modèle	Agrométéo Québec
Blé de printemps	Punaise verte	Insecte	DJ	oui
Blé de printemps	Fusariose de l'épi (De Wolf B modifié)	Maladie	Maladie	
Blé de printemps	Fusariose de l'épi (De Wolf A modifié)	Maladie	Maladie	
Blé de printemps	Fusariose de l'épi (CAM 2017)	Maladie	Maladie	
Blé de printemps	Fusariose de l'épi (CAM 2018)	Maladie	Maladie	oui
Blé de printemps	Phénologie	Phénologie	DJ	oui
Blé de printemps	Phénologie	BMT Robertson	Autre	
Bleuet	Phénologie bleuet corymbe	Phénologie	DJ	oui
Bleuet	Phénologie bleuet nain - production (Qc)	Phénologie	DJ	oui
Bleuet	Phénologie bleuet nain - production (White)	Phénologie	DJ	
Bleuet	Phénologie bleuet nain - végétation (White)	Phénologie	DJ	
Brocoli	Phénologie Domador	Phénologie	Générique	
Brocoli	Phénologie Legacy	Phénologie	Générique	
Brocoli	Phénologie Monaco	Phénologie	Générique	
Brocoli	Phénologie Patron	Phénologie	Générique	
Brocoli	Fausse teigne-ponte	Insecte	DJ	oui

Brocoli	Fausse teigne-larves	Insecte	DJ	oui
Brocoli	Piéride-ponte	Insecte	DJ	oui
Brocoli	Piéride-larves	Insecte	DJ	oui
Canneberge	Cécidomyie canneberge	Insecte	DJ	DJ seul.
Canneberge	Pyrale atocas	Insecte	DJ	DJ seul.
Canneberge	Tordeuse des canneberges	Insecte	DJ	oui
Canneberge	Phénologie	Phénologie	DJ	oui
Carotte	Charançon	Insecte	DJ	DJ seul.
Carotte	Mouche de la carotte	Insecte	DJ	DJ seul.
Carotte	Brûlure alternarienne	Maladie	Maladie	
Carotte	Brûlure cercosporéenne	Maladie	Maladie	
Carotte	Phénologie	Phénologie	Générique	
Chou	Fausse teigne-ponte	Insecte	DJ	oui
Chou	Fausse teigne-larves	Insecte	DJ	oui
Chou	Piéride-ponte	Insecte	DJ	oui
Chou	Piéride-larves	Insecte	DJ	oui
Chou de Bruxelles	Fausse teigne-ponte	Insecte	DJ	oui
Chou de Bruxelles	Fausse teigne-larves	Insecte	DJ	oui
Chou de Bruxelles	Piéride-ponte	Insecte	DJ	oui
Chou de Bruxelles	Piéride-larves	Insecte	DJ	oui

Fraisier	Anthonome de la fleur du fraisier	Insecte	DJ	oui
Fraisier	Scarabée japonais	Insecte	DJ	
Fraisier	Anthracnose	Maladie		
Fraisier	Moisissure grise	Maladie		
Fraisier	Tache commune	Maladie		
Fraisier	Phénologie Jewel	Phénologie	DJ	oui
Fraisier	Phénologie Jewel (BBCH)	Phénologie	Générique	
Framboisier	Scarabée japonais	Insecte	DJ	
Framboisier	Phénologie Killarney	Phénologie	DJ	oui
Gazon	Charançon du pâturin-adultes+larves	Insecte	DJ	
Gazon	Aphodius	Insecte	DJ	
Gazon	Scarabée noir-adultes+larves	Insecte	DJ	
Gazon	Ver gris-adultes	Insecte	DJ	
Gazon	Ver gris-ravages	Insecte	DJ	
Haricot	Phénologie maturité hâtive	Phénologie	DJ	oui
Haricot	Phénologie maturité semi-hâtive	Phénologie	DJ	oui
Haricot	Phénologie maturité tardive	Phénologie	DJ	oui
Laitue	Mildiou	Maladie	Maladie	
Laitue	Phénologie laitue pommée	Phénologie	Générique	
Maïs grain	Punaise verte	Insecte	DJ	oui

Maïs grain	Punaise marbrée	Insecte	DJ	oui
Maïs grain	Pyrale maïs univoltine	Insecte	DJ	
Maïs grain	Pyrale du maïs bivoltine	Insecte	DJ	
Maïs sucré	Pyrale maïs univoltine	Insecte	DJ	oui
Maïs sucré	Pyrale du maïs bivoltine	Insecte	DJ	oui
Maïs sucré	Phénologie maturité hâtive	Phénologie	DJ	oui
Maïs sucré	Phénologie maturité semi-hâtive	Phénologie	DJ	oui
Maïs sucré	Phénologie maturité tardive	Phénologie	DJ	oui
Melon	Alternariose-MELCAST	Maladie	Maladie	
Melon	Anthracnose-MELCAST	Maladie	Maladie	
Oignon	Mouche de l'oignon	Insecte	DJ	oui
Oignon	Brûlure de la feuille Lacy modifié	Maladie	Maladie	
Oignon	Brûlure de la feuille BOTCAST	Maladie	Maladie	
Oignon	Mildiou-DOWNCAST	Maladie	Maladie	
Orge	Fusariose de l'épi (De Wolf B modifié)	Maladie	Maladie	
Orge	Fusariose de l'épi (De Wolf A modifié)	Maladie	Maladie	
Orge	Phénologie	Phénologie	DJ	oui
Plantes fourragères	Phénologie fléole des prés 'Champ'	Phénologie	DJ	
Plantes fourragères	Phénologie fléole des prés 'Clair'	Phénologie	DJ	
Plantes fourragères	Phénologie fléole des prés 'Climax'	Phénologie	DJ	

Plantes fourragères	Phénologie luzerne	Phénologie	DJ	
Plantes fourragères	Phénologie trèfle rouge	Phénologie	DJ	
Poireau	Teigne du poireau	Insecte	DJ	DJ seul.
Pois	Phénologie maturité hâtive	Phénologie	DJ	oui
Pois	Phénologie maturité semi-hâtive	Phénologie	DJ	oui
Pois	Phénologie maturité tardive	Phénologie	DJ	oui
Pomme de terre	Doryphore	Insecte	DJ	DJ seul.
Pomme de terre	Mildiou (Hyre-Tartier)	Maladie	Maladie	
Pomme de terre	Mildiou (Wallin)	Maladie	Maladie	
Pomme de terre	Mildiou (Blitecast-Tartier)	Maladie	Maladie	
Pomme de terre	Mildiou (Blitecast)	Maladie	Maladie	
Pommier	Carpocapse	Insecte	DJ	oui
Pommier	Carpocapse avec biofix	Insecte	DJ	oui
Pommier	Cécidomyie du pommier	Insecte	DJ	oui
Pommier	Charançon de la prune	Insecte	Taux activité	oui
Pommier	Hoplocampe	Insecte	DJ	oui
Pommier	Mineuse marbrée	Insecte	DJ	oui
Pommier	Mouche de la pomme	Insecte	DJ	oui
Pommier	Mouche de la pomme avec biofix	Insecte	DJ	oui
Pommier	Noctuelle du fruit vert	Insecte	DJ	oui

Pommier	Punaise marbrée	Insecte	DJ	DJ seul.
Pommier	Punaise terne	Insecte	DJ	oui
Pommier	Sésie du cornouiller	Insecte	DJ	oui
Pommier	Tétranyque rouge	Insecte	DJ	oui
Pommier	Tordeuse à bandes obliques	Insecte	DJ	oui
Pommier	Tordeuse à bandes rouges	Insecte	DJ	oui
Pommier	Tordeuse du pommier	Insecte	DJ	oui
Pommier	Tordeuse orientale du pêcher (Penn/AAC)	Insecte	DJ	
Pommier	Tavelure du pommier (AAC/IRDA)	Maladie	Maladie	
Pommier	Brûlure bactérienne	Maladie	Maladie	oui
Pommier	Phénologie McIntosh	Phénologie	DJ	oui
Pommier	Phénologie McIntosh	Phénologie	Générique	
Pommier	Fermeté de la McIntosh	Phénologie	Autre	
Pommier	Brunissement humide de la chair (QC)	Désordre	Désordre	
Pommier	Brunissement vasculaire	Désordre	Désordre	
Pommier	Échaudure molle (QC)	Désordre	Désordre	
Pommier	Échaudure superficielle	Désordre	Désordre	
Pommier	Tache amère (QC)	Désordre	Désordre	
Soya	Punaise verte	Insecte	DJ	oui
Soya	Punaise marbrée	Insecte	DJ	oui

Sureau	Phénologie cultivar indigène	Phénologie	DJ	DJ seul.
Sureau	Phénologie floraison hâtive	Phénologie	DJ	DJ seul.
Sureau	Phénologie floraison semi-hâtive	Phénologie	DJ	DJ seul.
Tomate	TOMCAST	Maladie	Maladie	
Vigne	Cicadelles-4 espèces combinées	Insecte	DJ	oui
Vigne	Phylloxera de la vigne	Insecte	DJ	oui
Vigne	Punaise terne	Insecte	DJ	oui
Vigne	Scarabée japonais	Insecte	DJ	info envoyée
Vigne	Tordeuse de la vigne	Insecte	DJ	oui
Vigne	Blanc de la vigne	Maladie	Maladie	
Vigne	Phénologie Seyval blanc	Phénologie	DJ	oui
Vigne	Phénologie débourrement hâtif	Phénologie	DJ	oui
Vigne	Phénologie débourrement semi-tardif	Phénologie	DJ	oui
Vigne	Résistance au froid Cabernet Sauvignon	Autre		
Vigne	Résistance au froid Chardonnay	Autre		
Vigne	Résistance au froid Concord	Autre		
Vigne	Résistance au froid Pinot gris	Autre		
Vigne	Résistance au froid Riesling	Autre		

Annexe 3 : Modèles CLIMEX publiés pour certains insectes dans l'Ouest canadien

Dosdall, L.M., Weiss, R.M., Olfert, O. and Carcamo, H.A. 2002. Temporal and geographical distribution patterns of cabbage seedpod weevil (Coleoptera: Curculionidae) in canola. Canadian Entomologist 134: 403-418. doi:http://dx.doi.org/10.4039/Ent134403-3.

Dosdall, L.M., Weiss, R.M., Olfert, O.O., Mason, P.G. and Soroka, J.J. 2006. Diamondback moth, Plutella xylostella (L.), as a pest of canola in Canada: Its historical impact on the crop and predicted effects of climate change on its pest status. In Proceedings of the Fifth International Workshop on the Management of Diamondback Moth and Other Crucifer Pests, Beijing China.

Floate, K., Watson, D., Weiss, R. and Olfert, O. 2017. Bioclimatic analyses for the distributions of Onthophagus nuchicornis, Onthophagus taurus, and Digitonthophagus gazella (Coleoptera: Scarabaeidae) in North America. The Canadian Entomologist 00:1-21. doi:doi:10.4039/tce.2017.20.

Hallett, R.H., Goodfellow, S.A., Weiss, R.M. and Olfert, O. 2009. MidgEmerge, a new predictive tool, indicates the presence of multiple emergence phenotypes of the overwintered generation of swede midge. Entomologia Experimentalis et Applicata 130(1): 81-97.

Haye, T., Olfert, O., Weiss, R.M., Gariepy, T.D., Broadbent, B. and Kuhlmann, U. 2013. Bioclimatic analyses of distributions of a parasitoid Peristenus digoneutis and its host species Lygus spp. in Europe and North America. Agricultural and Forest Entomology 15: 43-55. doi:10.1111/j.1461-9563.2012.00590.x.

Mason, P.G., Olfert, O., Sluchinski, L., Weiss, R.M., Boudrealt, C., Grossrieder, M. and Kuhlmann, U. 2003. Actual and potential distribution of an invasive canola pest, Meligethes viridescens (Coleoptera: Nitidulidae), in Canada. Canadian Entomologist 135: 405-413.

Mason, P.G., Weiss, R.M., Olfert, O., Appleby, M. and Landry, J.-F. 2011. Actual and potential distribution of Acrolepiopsis assectella (Lepidoptera: Acrolepiidae), an invasive alien pest of Allium spp. in Canada. The Canadian Entomologist 143: 185-196.

Mika, A., M, Weiss, R.M., Olfert, O., Hallett, R.H. and Newman, R.H. 2008. Will climate change be beneficial or detrimental to the invasive swede midge in North America? Contrasting predictions using climate projections from different general circulation models. Global Change Biology 14: 1721-1733.

Olfert, O., Hallett, R.H., Weiss, R.M., Soroka, J. and Goodfellow, S. 2006. Potential distribution and relative abundance of swede midge, Contarinia nasturtii, an invasive pest in Canada. Ent exp & appl 120: 221-228.

Olfert, O., Haye, T., Weiss, R., Kriticos, D. and Kuhlmann, U. 2016. Modelling the potential impact of climate change on future spatial and temporal patterns of biological control agents: Peristenus digoneutis (Hymenoptera: Braconidae) as a case study. The Canadian Entomologist 148: 579-594. doi:doi:10.4039/tce.2016.4.

Olfert, O. and Weiss, R.M. 2006. Bioclimatic model of Melanoplus sanguinipes (Fabricius) (Orthoptera: Acrididae) populations in Canada and the potential impacts of climate change. Journal of Orthoptera Research 15: 65-77.

Olfert, O. and Weiss, R.M. 2006. Impact of climate change on potential distributions and relative abundances of Oulema melanopus, Meligethes viridescens and Ceutorhyncus obstrictus in Canada. Agriculture, Ecosystems & Environment 113: 295-301.

Olfert, O., Weiss, R.M., Cárcamo, H.A. and Meers, S. 2012. The Influence of Abiotic Factors on an Invasive Pest of Pulse Crops, Sitona lineatus (L.) (Coleoptera: Curculionidae), in North America. Psyche 2012: 11. doi:10.1155/2012/746342.

Olfert, O., Weiss, R.M. and Elliott, R.H. 2016. Bioclimatic approach to assessing the potential impact of climate change on wheat midge (Diptera: Cecidomyiidae) in North America. The Canadian Entomologist 148: 52-67. doi:doi:10.4039/tce.2015.40.

Olfert, O., Weiss, R.M., Elliott, R.H. and Soroka, J.J. 2017. Bioclimatic approach to assessing the potential impact of climate change on two flea beetle (Coleoptera: Chrysomelidae) species in Canada. The Canadian Entomologist 149: 616-627. doi:doi.org/10.4039/tce.2017.39.

Olfert, O., Weiss, R.M. and Kriticos, D. 2011. Application of General Circulation Models to Assess the Potential Impact of Climate Change on Potential Distribution and Relative Abundance of Melanoplus sanguinipes (Fabricius) (Orthoptera: Acrididae) in North America. Psyche 2011: 1-9.

Olfert, O., Weiss, R.M., Soroka, J.J. and Elliott, R.H. 2016. Bioclimatic approach to assessing factors influencing shifts in geographic distribution and density of two flea beetle species (Coleoptera: Chrysomelidae) in North America. Canadian Entomologist 150: 66-79. doi:https://doi.org/10.4039/tce.2017.51.

Olfert, O., Weiss, R.M., Turkington, K., Beckie, H. and Kriticos, D., (eds.) 2012. Bioclimatic approach to assessing the potential impact of climate change on representative crop pests in North America. Canadian Weed Science Society, Pinawa, MB.

Olfert, O., Weiss, R.M., Woods, S., Philip, H. and Dosdall, L. 2004. Potential distribution and relative abundance of an invasive cereal crop pest, Oulema melanopus (Coleoptera: Chrysomelidae), in Canada. Canadian Entomologist 136: 277-287.

von Virag, A., Bon, M.C., Cloşca, C., Diaconu, A., Haye, T., Weiss, R.M., Müller-Schärer, H. and Hinz, H.L. 2016. Phenology and temperature-dependent development of Ceutorhynchus assimilis, a potential biological control agent for Lepidium draba. Journal of Applied Entomology: n/a-n/a. doi:10.1111/jen.12322.