

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

Annie-Ève Gagnon
Geneviève Arsenault-Labrecque
Gaétan Bourgeois
Line Bourdages
Patrick Grenier
Michèle Roy

Janvier 2013

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres.



RÉSUMÉ EXÉCUTIF

CONTEXTE

Le secteur agricole devra s'adapter aux changements climatiques (CC) de diverses manières. L'une des contraintes à laquelle il devra faire face concerne les ennemis des cultures puisque la biologie des organismes nuisibles est très sensible aux variations du climat. Dans ce contexte, les CC anticipés d'ici 2050 affecteront potentiellement les relations cultures/ennemis des cultures (Trumble et Butler, 2009). Il est essentiel de réaliser dès maintenant que la pression causée par les ennemis des cultures changera selon les variations du climat. Ceci est particulièrement vrai dans le contexte où le secteur cherche à diminuer le recours aux produits de lutte antiparasitaire ayant des effets néfastes sur l'environnement et la santé humaine.

Impacts potentiels des CC sur les insectes

Organismes poïkilothermes, les insectes dépendent directement des conditions climatiques extérieures en régulant la vitesse de leur métabolisme (Andrewartha et Birch, 1954). Le réchauffement climatique aura donc un effet sur leur vitesse de développement en modifiant le voltinisme (le nombre de générations par année) (Altermatt, 2010), l'abondance de leurs populations (Estay *et coll.*, 2009), leur survie hivernale (Zhou *et coll.*, 1995) et leur aire de répartition (Porter *et coll.*, 1991). Une altération indirecte de la biologie d'un ravageur peut également survenir par la modification physiologique ou morphologique d'une plante cultivée en réponse aux CC. La diminution de la concentration des composés de défense, l'augmentation du ratio C:N et les modifications au niveau de la structure de la feuille sont autant de paramètres pouvant affecter le pouvoir de résistance des cultures face aux ravageurs.

Impacts potentiels des CC sur les agents pathogènes

Bien que les agents pathogènes dépendent également de la température, leur succès reproducteur ainsi que leur vitesse de développement sont extrêmement liés à l'humidité. L'impact des CC est plus difficile à prévoir avec ces organismes puisque l'incertitude liée aux prévisions pluviométriques dans un futur rapproché est plus grande que pour les moyennes de température. Néanmoins, plusieurs études démontrent que les CC auraient un effet positif sur certaines espèces en augmentant leur pouvoir d'établissement, leur taux de croissance et la durée de l'épidémie (Boland *et coll.*, 2004; Fuhrer, 2003; Patterson *et coll.*, 1999). Les extrêmes climatiques ont aussi un rôle à jouer dans le pouvoir d'infection d'un agent pathogène en favorisant son entrée, par exemple, par une blessure à la plante causée par la grêle, une sécheresse ou un gel. La résistance de la plante cultivée peut ainsi être compromise par ces blessures ou par des changements physiologiques ou morphologiques, tel que mentionné plus haut (Rillig, 2007).

OBJECTIFS

Afin d'aider les producteurs agricoles à s'adapter efficacement à cette nouvelle situation, une méthode d'analyse de risques en phytoprotection a été développée. Celle-ci permet aux décideurs d'évaluer les mesures à mettre en place pour protéger le rendement des cultures tout en réduisant les risques des pesticides pour l'environnement et la santé.

Le projet vise à développer une approche permettant :

- 1) d'effectuer des études de cas au niveau régional pour évaluer l'**impact des CC** sur différents ennemis des cultures;
- 2) d'évaluer les **vulnérabilités** du secteur agricole pour les cas étudiés ainsi que les risques encourus et finalement;
- 3) d'identifier et de documenter les **options d'adaptations** disponibles.

Le but est de fournir de l'information utile à la prise de décision à la ferme dans un contexte de lutte antiparasitaire intégrée favorisant une agriculture plus durable et porteuse de bénéfices pour la société tout en assurant une rentabilité des entreprises agricoles.

DÉMARCHE

Trois ennemis associés à des cultures diverses ont été sélectionnés fin d'effectuer les études de cas, soit deux insectes (la pyrale du maïs et le doryphore de la pomme de terre) et un agent pathogène (la fusariose de l'épi). Deux régions administratives ont ensuite été ciblées pour chaque ennemi des cultures. Les différentes étapes du projet sont:

- 1) Construction de **scénarios climatiques** pour chacune des régions ciblées;
- 2) Détermination de **régions analogues** pour chacune des régions ciblées
- 3) Évaluation de la situation de l'ennemi dans les régions analogues afin d'évaluer l'impact des CC et d'identifier des mesures d'adaptation propres à chaque ennemi;
- 4) **Modélisations bioclimatiques** en fonction des données des scénarios climatiques afin de valider les résultats obtenus avec les analogues spatiaux;
- 5) **Entrevue avec des producteurs** afin d'identifier les vulnérabilités du secteur agricole;
- 6) **Ateliers de consultation** avec les intervenants du secteur de la phytoprotection afin d'évaluer les mesures d'adaptation et les vulnérabilités ressortant de la présente étude;
- 7) Formulation de **recommandations** pertinentes pour élaborer une stratégie d'adaptation aux CC pour les cas étudiés et amorcer une stratégie d'adaptation pour le secteur de la phytoprotection au Québec;
- 8) **Information et sensibilisation** auprès des principaux acteurs intervenant dans les prises de décision pour lutter contre les ennemis des cultures (services gouvernementaux, conseillers, producteurs) afin de diminuer leur vulnérabilité aux CC et accroître leur capacité d'adaptation.

RÉSULTATS

1. Scénarios climatiques

Les régions administratives sélectionnées pour chaque espèce ont été choisies d'abord pour l'importance de la culture et de l'ennemi dans ces régions.

La **Montérégie** (Est et Ouest) est de loin la région où l'on cultive le plus le maïs sucré, avec ses 7 000 ha de production. Néanmoins, puisque la distribution des races univoltines et bivoltines suit un patron nord-sud, nous avons utilisé la région de la Montérégie pour suivre les populations de la race bivoltine ainsi que la région de la **Capitale-Nationale** afin d'observer la persistance de la dominance de la race univoltine.

Les régions de la **Capitale-Nationale** et de **Lanaudière** représentent les deux régions administratives où l'on cultive le plus de pommes de terre au Québec, avec une superficie d'environ 4 500 ha. Ces deux régions ont donc été utilisées dans l'élaboration des scénarios climatiques.

Le blé est cultivé majoritairement en **Montérégie** sur des superficies de plus de 16 000 ha. Nous avons donc choisi cette région ainsi que celle du Bas-Saint-Laurent pour les scénarios climatiques futurs.

Un ensemble de neuf simulations climatiques provenant du Modèle régional canadien du climat (MRCC 4.2.3) a été utilisé pour projeter le climat futur de différentes régions du Québec pour la période 2041-2070 (horizon 2050). Les indices retenus étaient la longueur de la saison de croissance, les cumuls de degrés-jours (bases 0, 3.6, 10 et 12.5 °C) et les précipitations en période de croissance pendant la période estivale.

Tableau 1. Différences climatiques entre la période de référence (1970-1999) et la période future (2041-2070) pour les régions administratives ciblées

	Montérégie	Capitale-Nationale	Bas-Saint-Laurent	Lanaudière	Saguenay-Lac-Saint-Jean
Température estivale (Juin-Juillet-Août)	+2,3 à +2,7 °C	+2,2 à +2,5 °C	+ 2,1 à +2,5 °C	+2,3 à +2,6 °C	+2,1 à +2,6 °C
Cumul des précipitations estivales	-4,3 à +7,5 %	+1,8 à +4,3 %	+ 3,9 à 7,2 %	+0,1 à +5,5 %	+3,7 à +12,9 %
Cumul des précipitations printanières (Mars-Avril-Mai)	+9,3 à +19,0 %	+6,6 à +19,5 %	+ 5,4 à +17,9 %	+ 11,9 à +20,5 %	+7,3 à +21,4 %
Longueur de la saison de croissance	+ 18,6 à 26,6 jours	+ 21,8 à 30,6 jours	+ 14,9 à 25,5 jours	+ 22,3 à 27,9 jours	+ 15,9 à 23,5 jours

2. Les régions analogues

En considérant ces modifications (température, précipitations et longueur de la saison de croissance), nous avons identifié les régions où le climat actuel possède des similitudes avec le climat futur des régions ciblées. Cette technique permet de comparer la problématique en phytoprotection et de faire des parallèles avec ce à quoi nous pourrions nous attendre au Québec. En observant la biologie de l'ennemi dans la zone analogue et en répertoriant les méthodes de contrôle utilisées, nous pouvons mieux préparer les stratégies d'intervention en phytoprotection en identifiant les besoins et les améliorations à apporter.

Sur la Figure 1, les couleurs de l'échelle identifient le nombre de scénarios climatiques identifiant la région comme analogue. Pour chaque ennemi des cultures, les analogues ont été sélectionnés en fonction du nombre de scénarios climatiques identifiant la région et en fonction de l'importance de la culture ciblée dans ces régions.

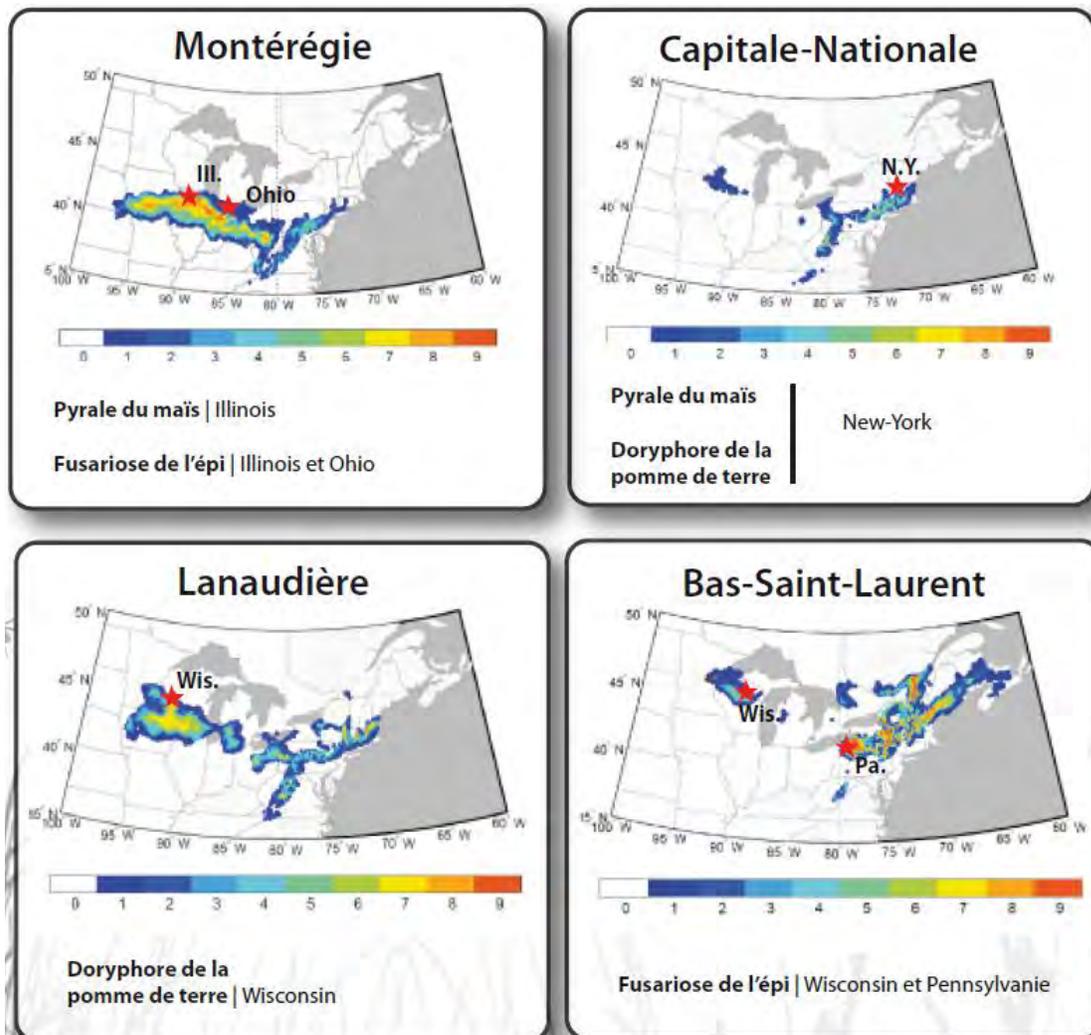


Figure 1. Cartes des régions analogues pour les quatre régions ciblées et régions analogues retenues en fonction des ennemis des cultures.

3. Impact des changements climatiques

Pour chacune des régions analogues ciblées, une revue de littérature a été exécutée sur le profil de la culture, la situation de l'ennemi de la culture et les méthodes de lutte utilisées pour contrôler cette espèce. Des entrevues avec les experts régionaux ont aussi permis d'obtenir une meilleure vision du territoire ainsi que leur opinion quant à l'impact des changements climatiques sur les ennemis des cultures et sur les méthodes de lutte à venir.

Dans le cas de la pyrale du maïs et de la fusariose de l'épi, la méthodologie basée sur les analogues spatiaux a été validée à l'aide de modèles bioclimatiques développés par Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC). Le climat projeté sur les régions ciblées du Québec a été utilisé comme une entrée des modèles bioclimatiques pour simuler les caractéristiques futures des ennemis des cultures. Ces résultats ont été comparés aux caractéristiques bioclimatiques actuelles des ennemis des cultures de l'analogue spatial. La comparaison a permis d'évaluer en partie la validité de l'analogue et les impacts potentiels.

3.1 Pyrale du maïs

Illinois (Montérégie)

Arrivée depuis 1939 dans cette région, la pyrale du maïs attaque également la pomme de terre, le poivron et le haricot vert. On dénombre entre deux et trois générations par année, la race univoltine étant inexistante. La vitesse de développement de la race bivoltine en Illinois est plus rapide que celle observée au Québec, elle se développe effectivement entre 22 et 71 % plus rapidement que la race bivoltine du Québec. Depuis l'utilisation répandue du maïs-grain Bt, les populations de pyrale du maïs ont chuté significativement dans cet État et aux alentours. Néanmoins, la pyrale du maïs demeure toujours l'ennemi numéro un du maïs sucré dans cette région.

Lorsqu'il y a présence de dommages par les larves de pyrale ou présence de plusieurs adultes à l'émergence de la panicule, il est recommandé de traiter à l'aide d'insecticides chimiques à des intervalles variant entre 3 à 5 jours. Les températures élevées diminueraient toutefois l'efficacité des pyrèthroïdes (la classe d'insecticides la plus couramment utilisée), et ce, de façon plus marquée que chez d'autres classes de pesticides. Ceci diminuerait donc le contrôle exercé sur le ravageur, d'autant plus que les températures chaudes diminuent également la fenêtre d'action pour contrôler la pyrale du maïs puisqu'elle augmente sa vitesse de développement.

Depuis les années 90, les cultivars Bt sont disponibles pour le maïs sucré (Attribute). Les cultivars Bt demeurent toutefois sensibles à d'autres espèces de ravageurs, et il n'est pas rare que deux à quatre applications d'insecticides chimiques soient nécessaires au cours de la saison.

New York (Capitale-Nationale)

La pression du ravageur varie d'une année à l'autre et d'une région à l'autre (Niagara County et Long Island ont toujours des populations plus élevées). Les deux races sont présentes, soit la bivoltine dans les régions plus au sud et l'univoltine dans les régions plus au nord. On observe une arrivée plus hâtive des adultes comparativement à la région de la Capitale-Nationale. Le vol des premiers adultes de la race bivoltine peut être aperçu entre la mi-mai et la mi-juin, alors que le deuxième vol arrive habituellement entre la fin-juillet et la fin-août. Certaines années,

lorsque les étés sont chauds, une troisième génération peut se développer. Les pics de vols d'adultes pour la génération univoltine s'aperçoivent quant à eux à la mi-juillet.

La plupart des producteurs utilisent les insecticides pour contrôler la pyrale du maïs. Une faible proportion de producteurs utilise la lutte biologique avec le relâchement de trichogrammes alors que certains producteurs se sont tournés vers la technologie Bt.

Modélisation pour la pyrale du maïs

Le Tableau 2 présente les résultats de la modélisation pour les deux régions ciblées. Pour la région de la Capitale-Nationale, la date d'arrivée des adultes risque d'être devancée de 15 à 20 jours, ce qui nous rapporte à la mi-juillet, tel qu'observé pour la race univoltine dans l'état de New York. Quoique la race bivoltine soit présente dans la région analogue, les résultats de la modélisation ne prévoient pas de génération supplémentaire pour la Capitale-Nationale à l'horizon 2050.

Pour la Montérégie, la date d'arrivée des adultes sera aussi devancée, et on prévoit l'apparition d'une deuxième génération pour la race univoltine et possiblement une troisième pour la bivoltine. Ces résultats viennent corroborer la situation actuelle en Illinois où la pyrale effectue de deux à trois générations par année.

Pour les deux régions, on prévoit un développement plus rapide de l'insecte diminuant la durée de la période d'intervention au champ (entre l'éclosion des œufs et le deuxième stade larvaire). On prévoit aussi une augmentation de la période de vulnérabilité du maïs (du stade 6-feuilles à la récolte) causée par le devancement des semis.

Tableau 2. Synthèse des résultats de la modélisation pour la pyrale du maïs.

	Capitale-Nationale-univoltine-	Montérégie-univoltine-	Montérégie-bivoltine-
Date d'émergence des adultes	15 à 20 jours plus tôt	14 à 17 jours plus tôt	F1 9 à 14 jrs plus tôt
			F2 20 à 27 jrs plus tôt
Durée de la période d'intervention	2 à 3 jours de moins	1 jour de moins	F1 1 jour de moins
			F2 7 jours de moins
Possibilité d'une génération supplémentaire	Peu de chances de voir l'apparition d'une deuxième génération	Possibilité d'une deuxième génération partielle, voire complète	Possibilité d'une troisième génération partielle si la saison de culture s'étend jusqu'en octobre
Période de vulnérabilité du maïs sucré à la pyrale	9 à 14 jours de plus	11 à 16 jours de plus	

3.2. Fusariose de l'épi

Illinois et Ohio (Montérégie)

Autant pour l'Illinois que pour l'Ohio, l'incidence de fusariose est très variable d'une année à l'autre. Cette grande variabilité est principalement due aux conditions climatiques. En effet, la fusariose est beaucoup plus importante durant les étés pluvieux que durant les étés chauds et secs. La plus grande épidémie a eu lieu en 1996, alors que c'est tout récemment, en 2010, que la deuxième plus grande épidémie est survenue. Les problèmes de fusariose sont de plus en plus importants depuis les 10 dernières années dans ces régions.

Wisconsin et Pennsylvanie (Bas-Saint-Laurent)

Au Wisconsin, les épidémies se répètent à raison d'une à quatre aux huit ans. On retrouve toutefois la fusariose tous les ans, et lorsqu'aucune épidémie n'est observée, l'incidence se situe autour de 5 % ou moins. En Pennsylvanie, les épidémies sont généralement qualifiées de sévères à raison de trois à quatre fois aux 10 ans. Les trois dernières années (2009, 2010 et 2011) ont été les pires. Les niveaux de déoxinivaléniol (DON) sont très variables d'une année à l'autre, mais lors d'épidémies, c'est en moyenne entre 50 à 60 % du blé qui atteint des niveaux de DON au-dessus de 1 ppm (la norme maximale pour la commercialisation au Canada).

Modélisation pour la fusariose de l'épi

La modélisation s'est effectuée par l'analyse des paramètres météorologiques associés au développement de la fusariose durant quatre périodes phénologiques de la culture, soit la **pré-anthèse** qui est associée à la maturation des spores ou la dispersion de la maladie, l'**anthèse** où la culture est très sensible à l'infection par l'agent pathogène, la **post-anthèse** qui est associée au développement de mycotoxines dans le grain et la **pré-récolte** où des risques de développement de mycotoxines seraient aussi identifiés. Les différents paramètres météorologiques associés à ces quatre périodes phénologiques et leurs seuils sont présentés dans le Tableau 3.

Tableau 3. Paramètres climatiques et processus biologiques associés aux différentes périodes de développement du blé

Périodes	Paramètres climatiques	Processus biologique associé
Pré-anthèse	↗ # jours où T _{min} < 10 °C	↘ Maturation des spores ou dispersion
	↗ # jours où T _{max} > 32 °C	
	↘ # jours avec précipitations > 5 mm	
Anthèse	↗ # jours où T _{min} < 10 °C	↘ Sensibilité à l'infection
	↗ # jours où T _{max} > 32 °C	
	↘ # jours avec précipitations > 3 mm	
Post-anthèse	↗ # jours où T _{max} > 32 °C	↘ Développement de mycotoxines
Pré-récolte	↘ # jours avec précipitations > 3 mm	↘ Risque post-récolte

On pourrait croire que les hausses de températures prévues d'ici 2050 risquent d'accroître les risques d'épidémies de fusariose puisque les périodes plus chaudes augmenteraient la production d'inoculum, la germination et la croissance du champignon et ultimement, la production de mycotoxines. Il est vrai que *F. graminearum* est un organisme performant mieux à des températures élevées, sauf si celles-ci excèdent 32 °C. Les résultats de la modélisation prévoient d'ailleurs une diminution du nombre de jours sous 10 °C lors de la période de pré-anthèse, ce qui pourrait favoriser la maturation des spores. Ces résultats prévoient toutefois une augmentation des températures au-dessus de 32 °C lors de la période de post-anthèse, risquant donc de diminuer l'infection par les spores et la production de mycotoxines.

Par ailleurs, les producteurs sèment actuellement le blé le plus tôt possible pour éviter que la culture ne soit exposée à des températures élevées durant la période de floraison. Or, les hausses de température rendraient cette pratique inefficace, d'autant plus que l'augmentation des précipitations printanières perturberait l'entrée au champ lors du semis. La survie hivernale du champignon serait améliorée sous un climat plus clément, et la quantité d'inoculum au sol n'en serait qu'amplifiée. Les changements climatiques risquent donc de rendre la fusariose de l'épi plus performante et dommageable en optimisant ses conditions nécessaires à son développement durant la période de floraison et en augmentant son taux de survie hivernal. Il est à noter toutefois que les hausses de températures hivernales pourraient éventuellement permettre l'établissement de la culture du blé d'hiver. Cette culture permettrait une floraison beaucoup plus tôt en saison et ne nécessiterait pas d'entrée au champ durant la saison pluvieuse de printemps.

Pour les deux régions à l'étude, un accroissement du cumul de précipitations printanières était observé avec les changements climatiques. Cette hausse serait néfaste pour les cultures en augmentant le risque d'infection durant la période de floraison du blé et en retardant la date de semis du blé. C'est d'ailleurs pour ces raisons que les régions américaines analogues cultivent principalement du blé d'hiver afin d'éviter les risques plus tard en saison et limiter les entrées au champ au printemps. Par ailleurs, les précipitations estivales ne devraient pas augmenter pour les deux régions à l'étude. Les résultats de la modélisation prévoient même une diminution du nombre de jours où les précipitations sont supérieures à 5 mm lors de la pré-anthèse, ce qui pourrait nuire à la dispersion des spores. Ces résultats prévoient aussi une diminution des précipitations supérieures à 3 mm durant l'anthèse et avant la récolte, ce qui nuirait à l'infection et au développement des mycotoxines.

3.3. Le doryphore de la pomme de terre

New York (Capitale-Nationale)

L'ennemi principal demeure le doryphore de la pomme de terre, bien que l'utilisation massive l'imidaclopride ait diminué considérablement ses populations. Le doryphore de la pomme de terre dans l'état de New York présente deux générations par année, avec quelques fois une troisième. L'adulte sort de diapause autour de la mi-mai dans la région du Long Island et de 7 à 10 jours plus tard dans le centre de l'état de New York. Une fois les premières plantules de pomme de terre sorties de terre, les femelles doryphore y pondent leurs œufs. Les larves émergent une semaine après la ponte, consomment le feuillage et terminent leur développement en 18 à 21 jours. La pupe tombe alors au sol où une diapause est amorcée ou si la période y est propice une génération supplémentaire y est produite dans les 5 à 10 jours (Klass, 2009). À la mi-août la plupart des pontes cessent et les adultes amorcent leur période de dormance.

Ce ravageur est devenu très difficile à contrôler dû aux problèmes fréquents de résistance aux insecticides. Les problèmes de résistance sont plus importants dans les États de l'est puisqu'au cours des dernières décennies l'utilisation d'insecticides est plus importante. Pour les petites superficies, les méthodes naturelles comme l'utilisation du *Beauveria bassiana* (champignon entomopathogène qui parasite le doryphore adulte) sont efficaces, mais les traitements insecticides sont nécessaires pour les plus grandes superficies. D'autres méthodes alternatives sont aussi utilisées dans les programmes de lutte intégrée, telles que la rotation des cultures, l'utilisation de propane pour enflammer les populations migrantes, les plantes-trappes et les tranchées.

Wisconsin (Lanaudière)

Les adultes émergent très tôt au printemps, lorsque les premières pousses apparaissent. Une fois les œufs pondus, ces derniers émergeront quatre à neuf jours plus tard, pour passer tous les stades larvaires en deux à trois semaines. La larve retourne au sol pour puper, où l'imago émergera 10 à 14 jours plus tard (Delahaut 2000). Le Wisconsin compte une à deux générations par année dans les régions du nord et généralement trois (la troisième étant souvent partielle) pour les régions plus au sud (Groves, *comm. pers.*). Les traitements insecticides sont les plus employés pour lutter contre le doryphore, mais des précautions doivent par contre être prises puisque le doryphore a développé de la résistance à tous les produits utilisés. Bien que les traitements chimiques soient les plus utilisés au Wisconsin, quelques méthodes alternatives sont disponibles. Voici quelques exemples: ennemis naturels locaux (coccinelles et pentatomidés), rotation des cultures (permet de réduire de 75 % les infestations de doryphore), plants-trappes d'automne (permet l'agrégation des adultes et l'application d'insecticide avant leur comportement de dormance), plants-trappes de printemps (afin de rassembler le plus d'adultes émergeant de diapause et ainsi traiter), tranchées entre le lieu d'hivernation et la culture (afin de capturer les adultes se dirigeant vers les plants pour la reproduction).

4. Vulnérabilités

Entrevues avec les producteurs

Nous avons évalué les vulnérabilités du secteur agricole en s'attardant, dans un premier temps, sur la pression des ennemis des cultures ciblés par le projet à laquelle des producteurs font et devront faire face, ainsi qu'à leur capacité à gérer les problèmes phytosanitaires actuels et futurs. Ceci a été fait par le biais d'entrevues directement à la ferme avec des producteurs de maïs et de blé.

Ateliers de consultation

Dans un second temps, nous avons consulté les organisations chargées d'apporter un support aux producteurs dans le secteur de la phytoprotection (organismes de R&D, institutions, organismes de transfert technologique, regroupements de conseillers agricoles, syndicat agricole) afin d'évaluer qualitativement et de prioriser les principales vulnérabilités, dont celles soulevées par les producteurs lors des entrevues.

Le Tableau 4 présente un résumé des vulnérabilités qui ressortent de ces entrevues et des ateliers de consultation.

Tableau 4. Résumé des vulnérabilités proposées par les producteurs et lors des ateliers de consultation

Vulnérabilités	Producteurs	Intervenants du secteur
LUTTE PHYTOSANITAIRE		
Arrivée de nouveaux ennemis des cultures		✓
Adaptation des différents ennemis des cultures		✓
Inefficacité des outils de lutte pour les nouveaux ennemis des cultures	✓	✓
Manque de ressources humaines pour supporter les producteurs	✓	✓
Faible capacité financière des producteurs pour assumer les risques liés au climat	✓	
Perturbations au niveau du calendrier agricole (ex: retard pour le semis dû aux pluies printanières)	✓	
Désengagement de l'État		✓
LUTTE INTÉGRÉE		
Absence ou perte des outils de lutte intégrée (ex: dépistage, seuil d'intervention, modèles prévisionnels)	✓	✓
Spécialisation des cultures		✓
RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT		
Manque de ressources (financières – humaines) disponibles pour développer des méthodes de lutte		✓
Manque de coordination entre la recherche et développement (R&D) et le transfert technologique		✓
Absence d'un processus de veille technologique au Québec et ailleurs		✓

4. Mesures d'adaptation

Tirées des études de cas

Plusieurs mesures d'adaptation sont ressorties des études de cas lors de l'analyse de la situation dans les régions analogues. Elles ont été ici regroupées afin de s'appliquer au secteur de la phytoprotection en général. Les options d'adaptation spécifiques à chacun des ennemis des cultures étudiés sont toutefois présentées dans la section sur les recommandations.

Ateliers de consultation

Les ateliers de consultations ont aussi été l'occasion de faire ressortir différentes mesures d'adaptation pour le secteur de la phytoprotection. Tout comme pour l'évaluation des vulnérabilités, nous avons demandé aux intervenants du secteur de la phytoprotection d'évaluer qualitativement et de prioriser les principales mesures d'adaptation face aux CC, dont celles ressortant des études de cas.

Rapport final projet # 550004-PXI

Le Tableau 5 présente un résumé des mesures d'adaptation qui ressortent des études de cas et des ateliers de consultation.

Tableau 5. Résumé des mesures d'adaptation ressortant des études de cas et des ateliers de consultation

Mesures d'adaptation	Etude de cas	Intervenants du secteur
LUTTE PHYTOSANITAIRE		
Offrir davantage de support (financier et humain) aux producteurs et aux conseillers (service d'extension) pour l'utilisation de lutte antiparasitaire	✓	✓
Réseau de détection d'arrivée de nouveaux ravageurs		✓
Effectuer un sulvi de la résistance développée chez les ennemis des cultures	✓	
LUTTE INTÉGRÉE		
Développer une gestion des pesticides adaptée aux nouvelles conditions	✓	
Disponibilité d' outils de lutte intégrée adaptés aux nouvelles conditions (dépistage, seuil, modèles)	✓	✓
Disponibilités d' outils d'aide à la décision et de transfert d'informations adaptés aux nouvelles conditions (dépistage, seuil, modèles prévisionnels, utilisation des TIC)		✓
Planter et soutenir les méthodes de lutte intégrée en priorisant les moyens les plus efficaces (ex. : rotations des cultures, diversification, aménagement du territoire)		✓
RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT		
Disponibilité de cultivars adaptés aux nouvelles conditions	✓	✓
Accroître la recherche (nombre de chercheurs, durée de financement, support scientifique) pour développer des méthodes de lutte intégrée et approfondir les connaissances sur les ennemis des cultures (ex. : systèmes culturaux)		✓
Mettre en place des ressources (humaines et financières) et des structures qui permettent la concertation et l'optimisation des ressources en R&D, en transfert et en diffusion (pour une vision commune)		✓

Recommandation aux décideurs

Une des finalités du projet était de formuler des recommandations pertinentes pour élaborer une stratégie d'adaptation aux CC pour les cas étudiés et pour amorcer une stratégie d'adaptation pour le secteur de la phytoprotection au Québec.

1. Recommandations pour une stratégie d'adaptation aux CC pour les cas étudiés

Pour ce qui est d'une stratégie d'adaptation aux CC pour les cas étudiés, il est suggéré de mettre en application les mesures d'adaptation tirées des études de cas lors de l'analyse de la situation dans les régions analogues.

Pyrale du maïs

- Réaliser le dépistage plus tôt en saison pour mieux cibler la date de la première intervention.
- Réaliser un meilleur suivi de dépistage pour assurer un bon contrôle des pyrales lors du moment critique de contrôle (entre le stade œufs et le deuxième stade larvaire).
- Valoriser l'utilité de faire du dépistage pour faire un usage raisonné des insecticides.
- Faire une rotation des insecticides afin de diminuer les risques de résistance.
- Utiliser les insecticides les plus sensibles à la température en début de saison.
- Répertorier la sensibilité aux températures élevées des insecticides utilisés au Québec.
- Effectuer un meilleur suivi auprès des producteurs pour l'utilisation des trichogrammes.
- Ajuster les doses relâchées de trichogrammes selon les densités de pyrale.
- Élaborer des projets de recherche pour optimiser la lutte biologique avec différentes espèces de trichogrammes mieux adaptées aux températures élevées.
- Fournir une information claire et neutre par rapport à l'utilisation du maïs sucré Bt afin que les producteurs et les consommateurs puissent faire un choix éclairé.
- Posséder une bonne connaissance de la population locale par rapport à son adaptation climatique et phytosanitaire.

Fusariose de l'épi

- Choisir les cultivars de blé les plus résistants à la fusariose de l'épi.
- Cultiver le blé d'hiver afin d'éviter les travaux au printemps dans un contexte où les précipitations sont plus élevées.
- Utiliser des outils pour mieux évaluer le risque de fusariose afin de limiter l'usage des fongicides.
- Adopter les engrais verts ou les couverts végétaux pour limiter les éclaboussures contaminées de fusariose provoquées par les fortes pluies.

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.
- Offrir davantage de support aux producteurs pour l'utilisation de lutte antiparasitaire.
- Promouvoir les outils de lutte biologique.
- Posséder une bonne connaissance de la population locale par rapport à son adaptation climatique et phytosanitaire.

2. Recommandations pour une stratégie d'adaptation aux CC pour le secteur de la phytoprotection

Les mesures d'adaptation qui ont été retenues lors des ateliers de consultation permettent de compléter la stratégie d'adaptation en répondant aux besoins de l'ensemble du secteur de la phytoprotection du Québec. Ces différentes mesures d'adaptation ont été regroupées en fonction de leur cohérence avec diverses actions de la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021(SPQA). On remarque d'ailleurs que ces mesures s'intègrent bien aux actions retrouvées dans la SPQA. Cela semble démontrer que les changements climatiques viennent accentuer des problèmes déjà présents en phytoprotection. Par conséquent, il est recommandé de mettre en œuvre les actions de la SPQA qui sont cohérentes avec les mesures d'adaptation identifiées dans le projet, pour permettre d'amorcer la prise en compte des CC par le secteur.

Le Tableau 6 présente ces différents objectifs de la SPQA qui répondent aux mesures d'adaptation ressortant de la présente étude.

Tableau 6. Actions de la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021 répondant aux options d'adaptations proposées par l'étude

	Mesures d'adaptations provenant de l'étude	Stratégie Phytosanitaire Québécoise en Agriculture
Outils de lutte intégrée, d'aide à la décision et de transfert d'informations	Disponibilité d' outils de lutte intégrée adaptés aux nouvelles conditions (dépistage, seuil, modèles)	<p>5.2.1 Documenter les ennemis des cultures et les organismes bénéfiques.</p> <p>5.2.3 Établir, dans des conditions québécoises, des seuils d'intervention et des modèles prévisionnels pour lutter contre les ennemis des cultures.</p>
	Disponibilités d' outils d'aide à la décision et de transfert d'informations adaptés aux nouvelles conditions (dépistage, seuil, modèles prévisionnels, utilisation des TIC)	<p>5.3.1 Mettre au point des méthodes autres que les pesticides pour lutter contre les ennemis des cultures.</p> <p>5.3.3 Mettre en oeuvre un réseau d'essais des pesticides à moindre risque et des biopesticides afin de soutenir la gestion intégrée des ennemis des cultures.</p> <p>5.3.4 Mettre en oeuvre des essais d'efficacité pour appuyer les demandes d'extension d'homologation des pesticides à moindre risque et des biopesticides.</p> <p>6.1.2 Renforcer les activités du Réseau d'avertissements phytosanitaires.</p>
Recherche et développement	Augmenter les ressources humaines et matérielles pour la R&D	<p>5.3.1. Mettre au point des méthodes autres que les pesticides pour lutter contre les ennemis des cultures</p> <p>5.3.3 Mettre en oeuvre un réseau d'essais des pesticides à moindre risque et des biopesticides afin de soutenir la gestion intégrée des ennemis des cultures.</p>
	Accroître la recherche (nombre de chercheurs, durée de financement, support scientifique) pour développer des méthodes de lutte intégrée et approfondir les connaissances sur les ennemis des cultures (ex. : systèmes culturaux)	<p>5.3.4 Mettre en oeuvre des essais d'efficacité pour appuyer les demandes d'extension d'homologation des pesticides à moindre risque et des biopesticides.</p> <p>6.1.2 Renforcer les activités du Réseau d'avertissements phytosanitaires.</p>
Cultivars adaptés	Disponibilité de cultivars adaptés aux nouvelles conditions	5.3.2. Mettre en place des essais pour l'évaluation de la résistance de cultivars aux ennemis des cultures.
Réseau de détection	Réseau de détection d'arrivée de nouveaux ravageurs	<p>6.1.2 Renforcer les activités du Réseau d'avertissements phytosanitaires.</p> <p>6.1.3 Appuyer le développement de techniques de laboratoire et d'outils diagnostiques pour l'identification des problèmes phytosanitaires.</p> <p>6.1.4 Maintenir l'accès à des services spécialisés d'identification des ennemis des cultures.</p>

Support aux producteurs et aux conseillers agricoles	<p>Offrir davantage de support (financier et humain) aux producteurs et aux conseillers (service d'extension) pour l'utilisation de lutte antiparasitaire</p>	<p>6.1.1 Encourager les producteurs à mettre en oeuvre des activités de dépistage des ennemis des cultures</p>
	<p>Implanter et soutenir les méthodes de lutte Intégrée en priorisant les moyens les plus efficaces (ex. : rotations des cultures, diversification, aménagement du territoire)</p>	<p>6.1.2 Renforcer les activités du Réseau d'avertissements phytosanitaires. 6.3.1 Identifier les leviers et les freins liés à l'adoption par les producteurs de la gestion intégrée des ennemis des cultures. 6.3.2 Favoriser l'accès à des services-conseils en phytoprotection. 6.3.3 Favoriser l'accompagnement individuel des producteurs pour l'adoption de la gestion intégrée des ennemis des cultures priorisés. 6.3.4 Favoriser la mise en place d'incitatifs, d'outils de gestion du risque et de mesures de compensation pour soutenir les producteurs qui adoptent la gestion intégrée des ennemis des cultures.</p>
Transfert et diffusion	<p>Mettre en place des ressources (humaines et financières) et des structures qui permettent la concertation et l'optimisation des ressources en R&D, en transfert et en diffusion (pour une vision commune)</p>	<p>6.1.2 Renforcer les activités du Réseau d'avertissements phytosanitaires. 7.1.1 Renforcer les activités de maillage entre les producteurs, l'industrie et les organisations de recherche et de transfert. 7.1.2 Améliorer le réseautage des intervenants par production ou groupe de productions.</p>

3. Besoins en recherche

Il est recommandé de poursuivre les efforts en recherche tout en prenant en compte les besoins mis en lumière pour les différents ennemis des cultures décrits ci-dessous.

Pyrale du maïs

Le contrôle de la pyrale du maïs se fait en grande majorité à l'aide d'insecticides de synthèse, dont la plupart font partie de la classe des pyréthroides synthétiques. Or, ce groupe est très sensible à la température et les hausses du climat pourraient potentiellement diminuer son efficacité. Il y a donc un besoin criant pour de nouvelles molécules chimiques afin de contrôler la pyrale du maïs sous des conditions climatiques différentes. D'autant plus que les hausses de populations d'une seule race (la race bivoltine) pourraient accélérer les mécanismes de résistance chez ces insectes et ainsi rendre inefficaces certains de nos outils. Par ailleurs, la valorisation du dépistage pour justifier une intervention chimique devrait être renforcée pour limiter les quantités de pesticides répandues dans les champs. Quant aux producteurs biologiques, ils n'ont d'autres choix que d'utiliser les trichogrammes pour lutter contre la pyrale du maïs. Il serait donc pertinent d'évaluer les capacités de contrôle des trichogrammes avec une densité de pyrale plus élevée afin d'ajuster les densités à utiliser dans ces situations. Un meilleur soutien serait également souhaitable pour assurer le bon fonctionnement des trichogrammes au champ. Par ailleurs, la pression exercée par la pyrale du maïs risque d'être plus forte dans le futur et nous devons trouver les outils pour bien contrôler ces populations. Toutefois, certains ravageurs tels le ver de l'épi, la légionnaire d'automne et le ver-gris noir risquent également d'être plus problématiques dans les années futures. De nouveaux outils, mieux adaptés à ces ravageurs devront aussi être considérés.

Fusariose de l'épi

Les producteurs de blé souhaiteraient posséder de meilleurs outils pour contrôler la fusariose de l'épi. Les outils utilisés actuellement préviennent la maladie, mais aucun ne permet un contrôle total de la maladie. Les fongicides disponibles ont souvent peu d'effet sur la fusariose de l'épi lorsque le risque est très élevé, et encore faut-il l'appliquer au bon moment (lors de la mi-floraison) pour offrir un bon contrôle lorsque les risques sont plus faibles. Par ailleurs, le développement de cultivars de blé résistants à la fusariose de l'épi serait souhaitable. Ceci permettrait de diminuer les traitements fongiques dans cette culture céréalière.

Les outils pour la prévision du risque sont plus ou moins populaires auprès des producteurs puisque la plupart n'utilisent pas les informations météorologiques pour déterminer la justification d'un fongicide ou non. Les producteurs rencontrés utilisaient soit systématiquement un fongicide, ou n'en utilisaient aucun. Le développement d'un modèle prévisionnel robuste pour la fusariose serait nécessaire au Québec. En ayant des indices de risque plus fiables, les producteurs seraient probablement plus enclins à utiliser cet outil, et limiter ainsi les applications de fongicides en cas de faible risque.

L'utilisation des couverts végétaux et d'engrais verts pourrait limiter l'incidence de la fusariose en créant une barrière physique entre le sol et les résidus infectés de fusariose, si ces derniers couvrent le sol au moment de l'infection. Cette méthode mériterait d'être approfondie et transférée aux producteurs pour limiter les infections de fusariose de l'épi.

La compréhension de l'influence des hausses de concentration en CO₂ demeure une orientation de recherche à explorer. Certaines études ont démontré un accroissement des taux en DON et une perte d'efficacité des mécanismes de résistance lorsque le blé était sous conditions élevées en CO₂. Il serait toutefois nécessaire de valider cette information avec des cultivars que nous utilisons au Québec et sous des conditions de CO₂ représentant un horizon moins lointain.

Doryphore de la pomme de terre

Le doryphore est enclin à développer une résistance aux différents insecticides utilisés. La lutte chimique demeure toutefois le moyen le plus utilisé présentement pour lutter contre cet insecte. Le développement de nouvelles méthodes de contrôles alternatives serait donc nécessaire afin de diminuer le développement de résistance aux insecticides. Les producteurs de pommes de terre bénéficieraient aussi de la création d'un réseau de surveillance pour la détection du développement de résistance afin de réagir plus rapidement aux champs. L'intégration de pratiques culturales et de lutte biologique permettant de réduire les besoins en insecticides permettrait aussi de limiter l'usage exclusif de ceux-ci. Le développement de cultivars résistants et mieux adaptés aux nouvelles conditions climatiques permettrait finalement de pallier aux risques engendrés par les CC.

Rapport final projet # 550004-PXI

Table des matières

Listes des tableaux	v
Listes des figures.....	viii
1. Contexte.....	1
2. Objectifs.....	2
3. Cadre théorique / Revue de la littérature	3
3.1 Impact des changements climatiques sur les ennemis des cultures	3
3.1.1 <i>Les insectes ravageurs.....</i>	<i>3</i>
3.1.1.1. <i>Impacts des changements climatiques</i>	<i>3</i>
3.1.1.2. <i>Impacts sur l'interaction plante-insecte ravageur</i>	<i>4</i>
3.1.1.3. <i>Capacité d'adaptation des insectes ravageurs aux nouvelles conditions.....</i>	<i>5</i>
3.1.1.4. <i>Impact sur les mesures de gestion des insectes ravageurs.....</i>	<i>5</i>
3.1.2 <i>Les agents pathogènes</i>	<i>5</i>
3.1.2.1. <i>Impact des changements climatiques</i>	<i>6</i>
3.1.2.2. <i>Impacts sur l'interaction plante-agent pathogène.....</i>	<i>7</i>
3.1.2.3. <i>Impacts sur les mesures de gestion des agents pathogènes.....</i>	<i>7</i>
3.1.3 <i>Les mauvaises herbes.....</i>	<i>8</i>
3.1.3.1. <i>Impact des changements climatiques</i>	<i>8</i>
3.1.3.2. <i>Capacité d'évolution, d'adaptation et d'acclimatation des mauvaises herbes aux nouvelles conditions.....</i>	<i>8</i>
3.1.3.3. <i>Impacts sur les mesures de gestion des mauvaises herbes.....</i>	<i>8</i>
3.2 Analogues spatiaux.....	9
3.3 Modélisation.....	9
3.4 Vulnérabilités	10
4. Méthodologie / Données.....	12
4.1 Identification des ennemis des cultures, des cultures et des régions ciblés	12
4.1.1. <i>Pyrale du maïs.....</i>	<i>13</i>
4.1.1.1. <i>La situation de l'ennemi au Québec.....</i>	<i>13</i>
4.1.1.2. <i>Régions ciblées pour l'étude</i>	<i>14</i>
4.1.2. <i>Fusariose de l'épi.....</i>	<i>14</i>
4.1.2.1. <i>Situation de l'ennemi au Québec</i>	<i>14</i>
4.1.2.2. <i>Régions ciblées pour l'étude</i>	<i>15</i>
4.1.3. <i>Le doryphore de la pomme de terre</i>	<i>15</i>
4.1.3.1. <i>Situation de l'ennemi au Québec</i>	<i>15</i>
4.1.3.2. <i>Régions ciblées pour l'étude</i>	<i>15</i>
4.1.4. <i>La petite herbe à poux.....</i>	<i>16</i>
4.1.4.1. <i>Situation de l'ennemi au Québec</i>	<i>16</i>
4.1.4.2. <i>Régions ciblées pour l'étude</i>	<i>16</i>
4.1.5. <i>Punaise terne.....</i>	<i>17</i>
4.1.5.1. <i>Situation de l'ennemi au Québec</i>	<i>17</i>
4.1.5.2. <i>Régions ciblées pour l'étude</i>	<i>17</i>
4.2 Identification des indicateurs bioclimatiques	18
4.3. Détermination des analogues spatiaux.....	18
4.3.1. <i>Construction des scénarios climatiques de base</i>	<i>18</i>
4.3.1.1. <i>Méthodes de mise à l'échelle.....</i>	<i>18</i>
4.3.1.2. <i>Choix des données d'observations</i>	<i>19</i>
4.3.1.3. <i>Choix des simulations climatiques</i>	<i>20</i>
4.3.2. <i>Calcul des indicateurs bioclimatiques.....</i>	<i>22</i>
4.3.3. <i>Application des critères de sélection des analogues.....</i>	<i>22</i>

4.3.4. Sélection des meilleurs analogues spatiaux.....	23
4.4 Analyser les impacts potentiels des CC sur la base des analogues spatiaux	23
4.5 Vérifier les analyses d'impacts basées sur des analogues spatiaux par comparaison avec les sorties de modèles bioclimatiques.....	23
4.5.1 Modélisation sur la pyrale du maïs.....	24
4.5.2. Modélisation sur la fusariose de l'épi.....	26
4.5.2.1. Modèles prévisionnels de la fusariose de l'épi	26
4.5.2.2. Modélisation de la phénologie du blé.....	27
4.6 Analyser les vulnérabilités aux changements climatiques du secteur de la phytoprotection au Québec	28
4.6.1 Analyse des vulnérabilités des producteurs par le biais d'entrevues	28
4.6.2 Analyse et priorisation des vulnérabilités et des mesures d'adaptation par les intervenants en phytoprotection durant des ateliers de consultation	29
4.7 Identifier et documenter les options d'adaptation disponibles.....	30
4.8. Formuler des recommandations pertinentes pour élaborer une stratégie d'adaptation aux CC.....	30
4.9. Informer et sensibiliser les principaux acteurs intervenant dans les prises de décision pour lutter contre les ennemis des cultures afin de diminuer leur vulnérabilité aux CC et accroître leur capacité d'adaptation.....	30
5. Résultats	31
5.1. Les modifications attendues du climat.....	31
5.2. Les régions analogues.....	32
5.2.1. Pyrale du maïs.....	33
5.2.1.1. Montérégie.....	33
5.2.1.2. Capitale Nationale.....	34
5.2.2. La fusariose de l'épi.....	35
5.2.2.1. Montérégie.....	35
5.2.2.2. Bas-Saint-Laurent.....	35
5.2.3. Le doryphore de la pomme de terre	36
5.2.3.1. Capitale-Nationale.....	36
5.2.3.2. Lanaudière.....	37
5.2.4. Résumé des régions analogues.....	37
5.3. Situation de l'ennemi dans les régions analogues.....	38
5.3.1. Pyrale du maïs.....	38
5.3.1.1. La culture du maïs sucré aux États-Unis.....	38
5.3.1.2. Illinois.....	39
5.3.1.3. New York.....	40
5.3.2. Fusariose de l'épi.....	41
5.3.2.1. La culture du blé aux États-Unis	41
5.3.2.2. Illinois et Ohio.....	43
5.3.2.3. Wisconsin et Pennsylvanie	45
5.3.3. Doryphore de la pomme de terre.....	45
5.3.3.1. La culture de la pomme de terre aux États-Unis.....	45
5.3.3.2. New York.....	46
5.3.3.3. Wisconsin.....	47
5.4. Modélisation.....	49
5.4.1. Pyrale du maïs.....	49
5.4.1.1. Dates d'émergence de la pyrale du maïs.....	49
5.4.1.2. Durée de la période d'intervention	52
5.4.1.3. Possibilité d'une génération supplémentaire.....	54
5.4.1.4. Période de vulnérabilité du maïs sucré à la pyrale du maïs.....	56
5.4.1.5. Conclusion de la modélisation pour la pyrale du maïs	57
5.4.2. Fusariose de l'épi.....	58
5.4.2.1. Période pré-anthèse.....	58
5.4.2.2. Période de l'anthèse	60

5.4.2.3. Période de post-anthèse : Développement de la toxine.....	62
5.4.2.4. Période pré-récolte : Développement de la toxine	63
5.4.2.5. Conclusion de la modélisation pour la fusariose de l'épi.....	64
5.5. Synthèse des impacts des changements climatiques	65
5.5.1. Pyrale du maïs.....	65
5.5.1.1. Impacts sur le ravageur.....	66
5.5.1.2. Impacts sur les méthodes de contrôle.....	68
5.5.2. Fusariose de l'épi.....	69
5.5.2.1. Impacts sur l'agent pathogène	70
5.5.2.2. Impact sur les méthodes de contrôle	71
5.5.3. Doryphore de la pomme de terre.....	72
5.5.3.1. Impacts sur le doryphore de la pomme de terre.....	72
5.5.3.2. Impacts sur les méthodes de contrôle.....	73
5.6 Vulnérabilités	74
5.6.1. Résultats des entrevues avec les producteurs et conseillers agricoles	74
5.6.1.1. Situation actuelle.....	74
5.6.1.2. Inquiétudes face aux changements climatiques.....	75
5.6.1.3. Les mesures de gestion	75
5.6.1.4. Synthèse des vulnérabilités soulevées par les producteurs.....	76
5.6.2. Résultats des ateliers de consultations avec les intervenants en phytoprotection	77
5.6.2.1. Synthèse des vulnérabilités retenues et proposées lors des ateliers de consultation	80
5.7. Mesures d'adaptation.....	81
5.7.1. Tirées des études de cas.....	81
5.7.2. Résultats des ateliers de consultation	83
5.7.3. Synthèse des mesures d'adaptation.....	86
6. Conclusion et recommandations.....	88
6.1 Résumé des impacts, vulnérabilités et mesures d'adaptation.....	88
6.1.1. Synthèse des impacts des CC en fonction de l'ennemi étudié	88
6.1.2. Les mesures d'adaptation versus les vulnérabilités	89
6.2 Recommandations aux décideurs	90
6.2.1. Recommandations pour une stratégie d'adaptation aux CC pour les cas étudiés.....	90
6.2.2. Recommandations pour une stratégie d'adaptation aux CC pour le secteur de la phytoprotection	91
6.2.3.1. Pyrale du maïs	97
6.2.3.2. Fusariose de l'épi.....	98
6.2.3.3. Doryphore de la pomme de terre	99
6.2.3.4. Veille technologique.....	99
6.2.3. Conclusions générales	100
Glossaire.....	101
Références.....	102
ANNEXE 1	113
Superficies totales au Québec des cultures ciblées dans les études de cas.....	113
ANNEXE 2	117
Liste des pesticides utilisés au Québec en fonction de l'ennemi étudié.....	117
ANNEXE 3	120
Questionnaires pour les entrevues avec les producteurs et les conseillers agricoles	120
Déroulement des ateliers de consultations.....	132
ANNEXE 4	134

Résultats obtenus pour la petite herbe à poux et la punaise terne	134
ANNEXE 5	137
Modifications attendues du climat Résultats détaillés	137
ANNEXE 6	140
Compte-rendu des entrevues avec les producteurs	140
ANNEXE 7	150
Entrevues réalisées avec différents spécialistes aux États-Unis pour connaître la situation des ennemis des cultures dans les différentes régions analogues	150

Listes des tableaux

Tableau 1. Liste non exhaustive de l'impact de l'augmentation du CO ₂ et de la température sur l'interaction entre la plante hôte et un agent pathogène.....	7
Tableau 2. Portrait des experts consultés pour la sélection des ennemis à l'étude.....	12
Tableau 3. Espèces retenues pour les études de cas ainsi que les cultures associées, les régions ciblées et les indicateurs bioclimatiques.....	17
Tableau 4. Liste des simulations utilisées dans l'étude.....	20
Tableau 5. Cumul de degrés-jours (en base 10 °C) nécessaires pour compléter les stades (5-50-95 %) de développement de la pyrale du maïs (race univoltine) pour des populations actuelles (une génération) et futures (deuxième génération partielle et complète).....	25
Tableau 6. Cumul de degrés-jours (en bas 10 °C) nécessaires pour compléter les stades (5-50-95 %) de développement de la pyrale du maïs (race bivoltine) pour des populations actuelles et futures (troisième génération partielle et complète).....	25
Tableau 7. Stades Zadocks, paramètres climatiques et processus biologiques associés aux différentes périodes de développement du blé.....	28
Tableau 8. Synthèse des résultats disponibles pour chaque espèce étudiée.....	31
Tableau 9. Différences climatiques entre la période de référence (1970-1999) et la période future (2041-2070) pour les régions administratives ciblées.....	32
Tableau 10. Superficie moyenne cultivée en maïs sucré dans les régions analogues à la Montérégie (Source : USDA-NASS).....	33
Tableau 11. Superficie moyenne cultivée en maïs sucré dans les régions analogues à la Capitale-Nationale (Source : USDA-NASS).....	34
Tableau 12. Superficie moyenne (2006-2010) cultivée en blé dans les régions analogues à la Montérégie. (Source : USDA-NASS).....	35
Tableau 13. Superficie moyenne (2006-2010) cultivée en blé dans les régions analogues au Bas-Saint-Laurent. (Source : USDA-NASS).....	36
Tableau 14. Superficie moyenne cultivée en pommes de terre dans les régions analogues à la Capitale-Nationale (Source : USDA-NASS).....	36
Tableau 15. Superficie moyenne cultivée en pommes de terre dans les régions analogues à la Lanaudière (Source : USDA-NASS).....	37
Tableau 16. Résumé des différentes régions analogues pour les cinq ennemis des cultures étudiés.	38
Tableau 17. Comparaison du développement de la première et deuxième génération (race bivoltine) de la pyrale du maïs au Québec et en Illinois, selon le cumul de degrés-jours (base 10 °C).....	40
Tableau 18. Principaux insecticides utilisés dans l'état de New York (Source: Cornell University).	41
Tableau 19. Développement du Doryphore au Wisconsin (Delahaut, 1997).....	48
Tableau 20. Dates d'émergence des adultes de la pyrale du maïs – race univoltine pour le climat actuel (1970-1999) et futur (2041-2070) dans la région de la Montérégie.....	49
Tableau 21. Dates d'émergence des adultes de la pyrale du maïs – race univoltine pour le climat actuel (1970-1999) et futur (2041-2070) dans la région de la Capitale-Nationale.....	50
Tableau 22. Dates d'émergence des adultes de la pyrale du maïs – race bivoltine pour le climat actuel (1970-1999) et futur (2041-2070) dans la région de la Montérégie.....	51
Tableau 23. Dates d'émergence des adultes de la pyrale du maïs – race bivoltine pour le climat actuel (1970-1999) et futur (2041-2070) dans la région de la Capitale-Nationale.....	52
Tableau 24. Durée de la période d'intervention pour un traitement phytosanitaire (entre la ponte des œufs et l'émergence des larves de premier stade) contre la pyrale du maïs univoltine pour le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) de la région de la Montérégie.....	52
Tableau 25. Durée de la période d'intervention pour un traitement phytosanitaire (entre la ponte des œufs et l'émergence des larves de premier stade) pour le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) de la région de la Capitale-Nationale.....	53

Tableau 26. Durée de la période d'intervention pour un traitement phytosanitaire (entre la ponte des œufs et l'émergence des larves de premier stade) contre la pyrale du maïs -bivoltine pour le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) de la région de la Montérégie.....	53
Tableau 27. Durée de la période d'intervention pour un traitement phytosanitaire (entre la ponte des œufs et l'émergence des larves de premier stade) contre la pyrale du maïs bivoltine pour le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) de la région de la Capitale-Nationale.....	54
Tableau 28. Possibilité de développer une génération supplémentaire pour la pyrale du maïs univoltine sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) de la région de la Montérégie..	55
Tableau 29. Possibilité de développer une génération supplémentaire pour la pyrale du maïs - univoltine sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) de la région de la Capitale-Nationale.....	55
Tableau 30. Possibilité de développer une génération supplémentaire pour la pyrale du maïs - bivoltine sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) de la région de la Montérégie...	56
Tableau 31. Date du début de la période de vulnérabilité du maïs face à la pyrale du maïs et durée de cette période (jusqu'au 15 septembre) sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) de la région de la Capitale-Nationale.....	56
Tableau 32. Date du début de la période de vulnérabilité du maïs face à la pyrale du maïs et durée de cette période (jusqu'au 15 septembre) sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) de la région de la Montérégie.....	57
Tableau 33. Synthèse des résultats de la modélisation pour la pyrale du maïs.....	57
Tableau 34. Dates de début de la période de pré-anthèse sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie...	58
Tableau 35. Durée de la période de pré-anthèse sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie.....	59
Tableau 36. Nombre de jours où la température est supérieure à 32°C ou inférieure à 10°C durant la période de pré-anthèse sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie.....	59
Tableau 37. Nombre de jours où les précipitations sont supérieures à 5 mm durant la période de pré-anthèse sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie.....	60
Tableau 38. Dates de début de la période d'anthèse sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie.....	61
Tableau 39. Nombre de jours où la température est supérieure à 32°C ou inférieure à 10°C durant la période d'anthèse sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie.....	61
Tableau 40. Nombre de jours où les précipitations sont supérieures à 3 mm durant la période d'anthèse sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie.....	62
Tableau 41. Dates de début de la période de pré-anthèse sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie...	62
Tableau 42. Durée de la période de post-anthèse sous le climat de référence (1970-1999) et futur....	63
Tableau 43. Nombre de jours où la température est supérieure à 32°C durant la période de post-anthèse sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie.....	63
Tableau 44. Dates de début de la période de pré-récolte sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie...	64
Tableau 45. Durée de la période de pré-récolte sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie.....	64
Tableau 46. Nombre de jours où les précipitations sont supérieures à 3 mm durant la période de pré-récolte sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie.....	64
Tableau 47. Synthèse des impacts répertoriés dans la présente étude et dans la littérature pour la pyrale du maïs.....	65

Tableau 48. Dates d'arrivée des adultes de la pyrale du maïs – race univoltine et bivoltine de l'État de New York pour le climat actuel et de la Capitale-Nationale pour le climat actuel (1970-1999) et futur (2041-2070).....	66
Tableau 49. Synthèse des impacts répertoriés dans la présente étude et dans la littérature pour la fusariose de l'épi.....	70
Tableau 50. Synthèse des impacts répertoriés dans la présente étude et dans la littérature pour le doryphore de la pomme de terre.....	72
Tableau 51. Vulnérabilités des producteurs et des conseillers agricoles face aux CC en fonction de l'ennemi ciblé.....	76
Tableau 52. Priorisation des vulnérabilités proposées par les producteurs lors des entrevues et par le comité de suivi du projet lors des ateliers de consultation.....	78
Tableau 53. Priorisation des vulnérabilités proposées par les producteurs lors des entrevues et par divers intervenants du secteur de la phytoprotection lors des ateliers de consultation.....	79
Tableau 54. Résumé des vulnérabilités proposées par les producteurs et lors des ateliers de consultation.....	80
Tableau 55. Priorisation des mesures d'adaptation tirées des études de cas et proposées par le comité de suivi du projet lors des ateliers de consultation.....	84
Tableau 56. Priorisation des mesures d'adaptation tirées des études de cas et proposées par le comité de suivi du projet lors des ateliers de consultation.....	85
Tableau 57. Résumé des mesures d'adaptation.....	86
Tableau 58. Liens entre les vulnérabilités et les mesures d'adaptation proposées par les membres du comité de suivi.....	89
Tableau 59. Liens entre les vulnérabilités et les mesures d'adaptation proposées par les intervenants du secteur de la phytoprotection.....	90
Tableau 60. Actions de la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021 répondant aux options d'adaptations aux changements climatiques proposées par l'étude – Axe 1.....	92
Tableau 61. Actions de la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021 répondant aux options d'adaptations proposées par l'étude – Axe 2.....	93
Tableau 62. Actions de la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021 répondant aux options d'adaptations proposées par l'étude – Axe 3.....	94
Tableau 63. Actions de la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021 répondant aux options d'adaptations proposées par l'étude – Axe 4.....	95
Tableau 64. Actions de la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021 répondant aux options d'adaptations proposées par l'étude – Axe 5.....	96
Tableau 65. Actions de la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021 répondant aux options d'adaptations proposées par l'étude – Axe 6.....	97

Listes des figures

- Figure 1.** Distribution des changements saisonniers projetés de température et précipitation sur le sud du Québec entre l'horizon 2050 (2046-2065) et la période de référence (1971-2000), par les simulations décrites au Tableau 4. Les symboles gris indiquent les simulations disponibles. Les lignes pleines, tiretées et en traits et pointillés correspondent dans l'ordre à la médiane, au 75^e et au 95^e percentiles. Les scénarios d'émissions (SRES)A2, A1B et B1 sont représentés respectivement par des carrés, cercles et triangles. Chaque saison est indiquée par les premières lettres des trois mois la composant : DJF, MAM, JJA et SON pour l'hiver, le printemps, l'été et l'automne.....21
- Figure 2.** Nombre de scénarios climatiques identifiant la région comme analogue au climat futur projeté (2041-2070) de la région de la Montérégie.....33
- Figure 3.** Nombre de scénarios climatiques identifiant la région comme analogue au climat futur projeté (2041-2070) de la région de la Capitale-Nationale.....34
- Figure 4.** Nombre de scénarios climatiques identifiant la région comme analogue au climat futur projeté (2041-2070) de la région du Bas-Saint-Laurent.....35
- Figure 5.** Nombre de scénarios climatiques identifiant la région comme analogue au climat futur projeté (2041-2070) de la région de Lanaudière.....37
- Figure 6.** Nombre moyen de larves de pyrale du maïs par 100 plants et pourcentage d'utilisation des cultivars Bt dans le maïs grain pour la période entre 1962-2010 en Illinois. La courbe avec les cercles blancs représente la moyenne de larves de pyrale par 100 plants de maïs et la courbe avec les cercles noirs représente le pourcentage d'utilisation de maïs-grain Bt en Illinois (Hutchison *et coll.*, 2010).....39
- Figure 7.** Répartition géographique des types de blé cultivés aux États-Unis : A) Blé dur (en orange) et blé tendre à grain mou « soft red » d'hiver (en bleu); B) Blé tendre à grain mou « soft white »; C) blé tendre vitreux « hard red » d'hiver et D) blé tendre vitreux « hard red » de printemps (Source : *Minnesota Association of Wheat Growers*).....41
- Figure 8.** Zones de grandes épidémies de fusariose de l'épi aux États-Unis, entre 1991 et 1996. (Tiré de McMullen *et coll.* 1997). Les étoiles bleues représentent l'Illinois et l'Ohio, les deux régions analogues à la Montérégie à l'horizon 2041-2070, alors que les étoiles jaunes représentent le Wisconsin et la Pennsylvanie, régions analogues au Bas St-Laurent à l'horizon 2041-2070.....42
- Figure 9.** Intensité de la fusariose de l'épi pour l'Ohio, le Dakota du Nord, l'Indiana et le Kansas. Notez que la méthode pour évaluer l'intensité de l'infestation peut varier d'une région à l'autre. (Tiré de Kriss *et coll.* 2010).....42
- Figure 10.** Évaluation de résistance des cultivars de blés disponibles en Illinois (2011). Source : <http://vt.cropsci.illinois.edu/wheat.html>.....43
- Figure 11.** Évaluation de résistance des cultivars de blés disponibles en Ohio (2011). Source : <http://oardc.osu.edu/wheattrials/>.....44
- Figure 12.** Système de prévision du risque pour la fusariose de l'épi pour tout l'est des États-Unis. Source : www.wheatcab.psu.edu.....44
- Figure 13.** Expansion du doryphore de la pomme de terre aux États-Unis. (Source : Perpillou, 1933).46
- Figure 14.** Représentation de la phénologie des deux générations de doryphore de la pomme de terre dans l'État du Wisconsin (Source : Groves, *comm.pers*)......47
- Figure 15.** Distribution temporelle du stade adulte (5-50-95 %) de la pyrale du maïs univoltine selon le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) de la région de la Montérégie.....50
- Figure 16.** Distribution temporelle du stade adulte (5-50-95%) de la pyrale du maïs univoltine selon le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) de la région de la Capitale-Nationale.....51
- Figure 17.** Nombre cumulatif d'ingrédients actifs auxquels une résistance a été rapportée chez le doryphore de la pomme de terre. (Alyokin *et coll.*, 2008).....73

1. Contexte

Le secteur agricole devra s'adapter aux changements climatiques (CC) de diverses manières. L'une des contraintes à laquelle il devra faire face concerne les ennemis des cultures puisque la biologie des organismes nuisibles (insectes, organismes phytopathogènes et mauvaises herbes) est très sensible aux variations du climat, particulièrement la température ainsi que les précipitations pour ce qui est des agents pathogènes et des mauvaises herbes. Dans ce contexte, les changements climatiques anticipés d'ici 2050 affecteront potentiellement les relations cultures/ennemis des cultures (Trumble et Butler, 2009). On suppose que certains ennemis qui ne sont actuellement présents que plus au sud atteindront nos régions et envahiront nos cultures alors que d'autres, déjà présents, pourraient agrandir leur aire de distribution ou augmenter le nombre de générations produites par année (Ulrichs et Hopper, 2008). D'autres ravageurs secondaires, qui ne causent actuellement que peu de tracas aux producteurs agricoles, pourraient devenir des ennemis importants (Wolfe *et coll.*, 2008). Certains ennemis, voyant leur vitesse de développement augmenter (p. ex. le charançon de la carotte ou la punaise velue), pourraient potentiellement causer plus de dommages et de pertes de rendements, ce qui obligerait les producteurs agricoles à modifier voire même augmenter les efforts de dépistage et de gestion intégrée des ennemis des cultures. Sans un tel effort de dépistage, il est possible de présumer une utilisation systématique de pesticides d'où une augmentation de la quantité utilisée. La prise de conscience d'une pression accrue des ennemis des cultures liée aux changements climatiques est essentielle dès maintenant, particulièrement dans le contexte où le secteur cherche à diminuer le recours aux produits de lutte antiparasitaire qui ont des effets néfastes sur l'environnement et la santé humaine (Gregory *et coll.*, 2009). On peut aussi s'attendre à voir un impact des changements climatiques non seulement sur les ravageurs, mais aussi sur les ennemis naturels, qui pourraient voir leur capacité de prédateur ou de parasite affectée par un manque de synchronisme entre l'ennemi naturel et le ravageur, ou par des variations phénologiques chez les plantes (Thomson *et coll.*, 2010).

L'enjeu de notre initiative consiste à identifier les risques et les options d'adaptation pour certains ennemis des cultures qui pourraient devenir des espèces nuisibles à la faveur des changements climatiques et auxquelles il faudra porter une attention particulière. Le but est de fournir ultimement de l'information utile à la prise de décision dans un contexte de lutte antiparasitaire intégrée favorisant une agriculture plus durable et porteuse de bénéfices pour la société.

2. Objectifs

Le projet vise à développer une approche permettant 1) d'effectuer des études de cas au niveau de la grande région du Québec pour évaluer l'impact des changements climatiques sur les ennemis des cultures ciblés (mauvaise herbe / organisme phytopathogène / insecte ou acarien ravageur), 2) d'évaluer les vulnérabilités du secteur agricole pour les cas étudiés et finalement 3) d'identifier et de documenter les options d'adaptations disponibles.

Dans ce projet, on fait l'hypothèse que les analogues spatiaux nous permettront de définir les impacts intégrés des changements climatiques pour les cas étudiés. Le projet identifiera les forces et faiblesses de cette approche et prévoit, notamment, que les impacts estimés à partir des analogues spatiaux seront vérifiés par comparaison avec les sorties de modèles bioclimatiques pour un sous-ensemble des ennemis des cultures retenus pour les études de cas.

Les objectifs spécifiques sont:

1. Identifier les ennemis des cultures, les cultures et les régions ciblés pour les études de cas ;
- 2- Effectuer une analyse des impacts potentiels des CC sur les ennemis des cultures retenus pour des études de cas en utilisant des analogues spatiaux et des modèles bioclimatiques ;
- 3- Analyser les vulnérabilités aux changements climatiques identifiées par des producteurs et des intervenants en phytoprotection au Québec pour les cas étudiés et les prioriser ;
- 4- Identifier et documenter les options d'adaptation disponibles pour les cas étudiés ;
- 5- Formuler des recommandations pertinentes pour l'élaboration d'une stratégie d'adaptation aux CC pour les cas étudiés et pour amorcer une stratégie d'adaptation pour le secteur de la phytoprotection au Québec en général ;
- 6- Informer et sensibiliser les principaux acteurs intervenant dans les prises de décision pour lutter contre les ennemis des cultures (services gouvernementaux, conseillers, producteurs) afin de diminuer leur vulnérabilité aux CC et accroître leur capacité d'adaptation.

Au niveau gouvernemental, la mise en place de ce projet a permis au ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ) d'assumer un leadership en encourageant les principaux acteurs du secteur de la phytoprotection à travailler en réseau en disposant d'une approche qui pourra être actualisée dans le futur avec l'apport de nouvelles données issues d'observations et de projets de recherche pour évaluer les impacts des CC sur les ennemis des cultures. De par son expertise dans les diverses disciplines de la phytoprotection, la Direction de la phytoprotection du MAPAQ a été en mesure d'appuyer les chargées de projet.

Sur le plan de l'acquisition de connaissances, le projet a permis de développer une nouvelle expertise tant sur le plan du développement de scénarios climatiques pertinents pour la thématique que sur le plan de l'avancement des connaissances en impacts et adaptation dans le domaine de la phytoprotection. Ces acquis pourront être mis à profit dans le futur par les intervenants en phytoprotection.

3. Cadre théorique / Revue de la littérature

3.1 Impact des changements climatiques sur les ennemis des cultures

Les informations contenues dans cette section constituent la synthèse du document « Impacts directs et indirects des changements climatiques sur les ennemis des cultures », une revue de littérature préparée dans le cadre de ce projet (Gagnon, 2011). Le document complet est disponible sur le site d'Agri-Réseau : (<http://www.agrireseau.qc.ca/lab/documents/Revue%20de%20litt%20c3%a9rature%20CCphyto.pdf>).

Les changements climatiques se font sentir depuis quelques années tant au niveau mondial (GIEC, 2007) que sur le territoire québécois. Au cours du passé récent (1960-2005) la température journalière du sud du Québec a augmenté de 0,2 à 0,4 °C par décennie, provoquant un raccourcissement de la durée de la saison de gel et une augmentation du nombre de *degrés-jours* durant la saison de croissance (Ouranos, 2010). On observe aussi une augmentation du nombre de jours avec précipitations de faible intensité, une diminution des précipitations sous forme de neige dans le sud du Québec alors qu'une augmentation a été observée dans le nord du Québec (Ouranos, 2010).

Toujours selon Ouranos (2010), le climat projeté pour l'horizon 2050 prédit un réchauffement climatique sur l'ensemble du territoire québécois qui sera toutefois plus marqué en hiver ainsi que dans le nord du Québec. Ainsi, les températures augmenteraient de 2.5 °C à 3.8 °C en hiver dans le sud du Québec et de 1.9 °C et 3 °C en été. L'augmentation des précipitations hivernales engendrerait une accumulation de neige au sol plus marquée dans les régions au nord du Québec alors qu'elle diminuerait dans le sud du Québec (région située au sud du 48^e parallèle) en raison de la hausse des températures et du raccourcissement de la saison froide. Durant la saison estivale, aucun changement des précipitations n'est attendu dans le Sud alors que la hausse des précipitations serait de 3 à 12,1 % dans le Nord.

3.1.1 Les insectes ravageurs

Les études sur l'impact chez les insectes portent principalement sur les espèces *phytophages puisqu'elles dominent la biodiversité locale, entrent en interaction avec plus d'un niveau trophique (la plante hôte et l'ennemi naturel) et peuvent avoir un impact économique majeur sur l'agriculture (Ladanyi et Horvath, 2010).**

3.1.1.1. Impacts des changements climatiques

Les insectes sont des organismes poïkilothermes*, dépendant directement des conditions climatiques extérieures qui régulent la vitesse de leur métabolisme (Andrewartha et Birch, 1954). Par conséquent, ils sont extrêmement influencés par les variations de température. Lors d'une augmentation de température, la plupart des études démontrent une **augmentation du taux de croissance** des insectes ravageurs (Etsay *et coll.* 2009; Fuhrer, 2003; Patterson *et coll.*, 1999). Plusieurs études ont aussi démontré une possible **augmentation du voltinisme*** avec les changements climatiques (Kocmankova *et coll.* 2011

* On retrouve la définition des mots suivis d'un astérisque dans le glossaire à la fin du document.

; Porter *et coll.*, 1991). Chez la pyrale du maïs, par exemple, différentes études prévoient le développement d'une génération additionnelle dans le futur (Trnka *et coll.*, 2007 ; Porter *et coll.*, 1991). Une étude plus exhaustive démontre l'augmentation du voltinisme chez plus de 250 espèces de lépidoptères européens, depuis le début des années 80 (Altermatt, 2010). Toutefois, il n'est pas certain que le réchauffement climatique aura un effet direct et linéaire sur le voltinisme de toutes les espèces, car chez certaines d'entre elles, la diapause est obligatoire au développement d'une nouvelle génération et les stades *de diapause** sont régis par des signaux découlant de la photopériode et non de la température, ce qui peut limiter le multivoltinisme dans des conditions plus chaudes (Tobin *et coll.*, 2008). Dans la présente étude, on suppose que chez la race univoltine de la pyrale du maïs, la diapause n'est pas obligatoire, et que celle-ci aurait donc l'opportunité d'effectuer plus d'une génération durant une même saison de croissance.

Une augmentation de la température moyenne hivernale permettrait aussi une **meilleure survie hivernale chez certaines espèces**. Par exemple, la migration printanière de cinq espèces de pucerons serait devancée de 4 à 19 jours suite à une augmentation de 1 °C de la température moyenne hivernale en Angleterre (Zhou *et coll.*, 1995), leur permettant de se nourrir sur une plus grande période et d'augmenter par conséquent les dommages causés aux plantes et les risques de transmission de virus si la plante hôte est aussi présente plus tôt en saison. Ces hausses de température hivernale pourraient aussi permettre l'établissement d'espèces provenant du sud en rendant leur **survie hivernale possible**. Finalement, une **extension de l'aire de répartition** des espèces, particulièrement vers le nord, serait à prévoir pour bon nombre d'espèces (Olfert et Weiss, 2006 ; Rafoss et Saethre, 2003 ; Jeffree et Jeffree, 1996 ; Porter *et coll.*, 1991) à la condition qu'elles ne soient pas limitées par d'autres facteurs tels que leurs capacités migratrices, la disponibilité des ressources, les interactions avec les autres espèces ou encore la fragmentation des habitats.

D'autres paramètres liés au climat peuvent aussi affecter les insectes. Les inondations pourraient affecter **la reproduction et la survie des insectes (et autres invertébrés)** au sol, alors que les sécheresses, en **concentrant les glucides**, pourraient rendre la plante plus attrayante pour les insectes (Ziska et Runion, 2007). L'impact de l'augmentation de CO₂ sur les insectes est moins documenté, mais peut entre autres **stimuler l'oviposition** chez certains insectes, comme la chrysomèle des racines du maïs (Schroeder *et coll.*, 2006).

3.1.1.2. Impacts sur l'interaction plante-insecte ravageur

Les cycles saisonniers des insectes herbivores et de leur plante hôte sont fortement liés et une simple modification de la température pourrait altérer le synchronisme plante-insecte et ainsi augmenter ou diminuer les dommages causés à la plante. Aurambout *et coll.* (2009) ont démontré que l'accroissement prévu de la température augmenterait le nombre de générations du ravageur *Diaphorina citri* (Hemiptera : Psylloidea) dans les vergers d'agrumes en Australie, mais raccourcirait également la période de sensibilité de l'hôte au ravageur. Au final, l'impact serait donc moindre que si l'on considérait uniquement la biologie de l'insecte. Cette étude illustre bien la pertinence de s'attarder aux deux niveaux trophiques dans les analyses de risques liés aux insectes ravageurs.

Indirectement, les changements physiologiques de la plante-hôte en conditions élevés de CO₂ pourraient modifier les **comportements alimentaires des insectes**. Ainsi, l'augmentation de la concentration en CO₂ **accroît le ratio C : N** des plantes, ce qui peut avoir plusieurs impacts sur l'interaction plante - insecte herbivore. La diminution de la qualité de la plante (diminution de l'apport en azote) **pourrait augmenter le taux de consommation des insectes**

herbivores afin de combler leurs besoins en nutriments. Par ailleurs, les hausses de concentrations en CO₂ augmentent la concentration de sucre dans la plante, pouvant attirer un plus grand nombre d'herbivores. Ballhorn *et coll.* (2010) ont également démontré une hausse de consommation du jeune feuillage des plants de fèves de Lima par la coccinelle mexicaine des haricots en conditions élevées de CO₂. Cette hausse serait en partie due à la **diminution des composés de défense à base d'azote** chez les jeunes feuilles. Les composés de défense à base de carbone seraient quant à eux favorisés étant donné un ratio C : N plus élevé. Certaines études ont aussi démontré une **diminution des performances de certains insectes herbivores** se nourrissant sur des plantes en condition de CO₂ atmosphérique élevée (Cannon, 1998; Hunter, 2001). Un ralentissement du développement de l'insecte herbivore augmenterait les risques de parasitisme ou de prédation chez celui-ci (Wolfe *et coll.*, 2008). La réponse des insectes face à l'augmentation de la concentration de CO₂ est toutefois variable selon l'espèce, et aussi selon la plante hôte (Cannon, 1998; Fuhrer, 2003).

3.1.1.3. Capacité d'adaptation des insectes ravageurs aux nouvelles conditions

La capacité d'adaptation des insectes à ces nouvelles conditions demeure incertaine. Il a été démontré que l'évolution morphologique est improbable sous des changements climatiques et que l'évolution physiologique ou comportementale est plutôt rare (Lawton, 1995). La paléoentomologie* fait aussi ressortir une constance morphologique exemplaire au niveau des espèces au cours de l'histoire. La migration vers des milieux plus optimaux serait donc privilégiée chez les insectes plutôt qu'une adaptation morphologique ou comportementale. Ce type d'adaptation est toutefois limité par la présence d'hôtes non optimaux dans ces nouvelles régions, réduisant la valeur adaptative (*fitness**) des insectes ravageurs.

Il faut aussi prendre en ligne de compte la plasticité phénotypique des insectes. Lors d'un changement rapide, la plasticité phénotypique permet à l'insecte de répondre aux changements dans une certaine mesure, et ce sans que son génotype soit affecté. Puis il y a sélection naturelle et un glissement du génotype se produit, entraînant à sa suite la plasticité phénotypique.

3.1.1.4. Impact sur les mesures de gestion des insectes ravageurs

Les changements climatiques risquent d'avoir un impact sur l'efficacité de différentes mesures de gestion des insectes ravageurs. Les **cultivars transgéniques** produisant des protéines toxiques pourraient s'avérer moins efficaces dans des conditions de températures et de CO₂ élevées. Les cultivars de maïs Bt, par exemple, produiraient moins de protéines Bt en conditions élevées de CO₂ (Wu *et coll.*, 2011). Ces conditions pourraient également modifier l'efficacité des **insecticides ou la diminuer**. Les insectes consommant plus de feuillage en conditions élevées de CO₂, ingéreraient ainsi une plus grande quantité de composés chimiques. Inversement ces mêmes conditions diminueraient l'entrée des insecticides systémiques dans la plante par la fermeture des stomates, diminuant d'autant leur efficacité. Au champ, les **seuils d'interventions** risquent d'être diminués par le développement accéléré des insectes alors que le dépistage des ravageurs devra s'effectuer plus tôt en saison.

3.1.2 Les agents pathogènes

Bien que les agents pathogènes des plantes englobent plusieurs types d'organismes, cette section se concentre principalement sur les infections fongiques, dominantes au Québec. On note d'ailleurs des lacunes dans la recherche au sujet de l'impact des changements

climatiques sur les bactéries, les virus et les nématodes, ennemis qui risquent de causer des dommages considérables aux cultures alors que les méthodes de lutttes sont presque inexistantes.

3.1.2.1. Impact des changements climatiques

La température et l'humidité sont les principaux facteurs bioclimatiques influençant le développement des maladies alors que le CO₂ et l'O₃ ont un effet indirect sur les agents pathogènes via la physiologie de la plante (Boland *et coll.*, 2004). L'adoucissement des hivers assurera, de façon générale, une **meilleure conservation des agents pathogènes**, augmentant ainsi la quantité d'inoculum au sol le printemps suivant (Fuhrer, 2003). La diminution future attendue du couvert nival dans le sud du Québec et de son pouvoir d'isolation risque toutefois de nuire à certaines maladies des céréales par exemple, qui pourraient voir leur taux de survie hivernale chuter. Les genres vivant dans le sol (Exemples : *Botrytis*, *Fusarium*, *Phytophthora*, *Pythium*, *Rhizoctonia*, *Sclerotinia*, *Sclerotium*, *Verticillium*) ont moins de risques d'être affectés par ce phénomène grâce à des structures de survie comme les *sclérotés* ou les *hyphes* (Boland *et coll.*, 2004). Les périodes chaudes accompagnées de sécheresses risquent de **réduire l'intensité de certains agents pathogènes**, mais risquent aussi de réduire la résistance des plantes face aux maladies (Gregory *et coll.*, 2009). Certaines espèces comme *Podosphaera*, *Sphaerotheca*, *Uncinula* et *Ustilago* pourraient toutefois bénéficier d'un climat plus sec et chaud (Boland *et coll.*, 2004). Une étude sur le mildiou de la vigne, une maladie se développant à des températures plutôt fraîches (10° à 24 °C), prévoit une **augmentation de l'intensité des infections** avec une augmentation de température et une diminution des précipitations (Salinari *et coll.*, 2006 ; Del Ponte *et coll.*, 2011). Une **expansion de l'aire de répartition** des agents pathogènes est aussi à prévoir (Coakley *et coll.*, 1999) en lien avec l'augmentation des températures. L'extension de la durée de la saison de croissance permettrait une **plus grande production d'inoculum** pour certaines espèces et augmenterait la fréquence et l'intensité des infections. L'humidité étant un facteur essentiel au développement de la plupart des infections fongiques, une augmentation des précipitations favorisait la dispersion des spores de certaines espèces (Fuhrer, 2003). Les quantités de précipitations accumulées au sud du Québec ne devraient toutefois pas varier énormément d'ici 2050 pour la période estivale. (Ouranos, 2010).

En ce qui concerne les effets du CO₂, la réponse de l'agent pathogène est encore peu étudiée et apparaît très spécifique selon l'interaction plante-maladie (Tableau 1). Par exemple, Eastburn *et coll.* (2010) ont observé une augmentation de la gravité/intensité de la tache brune dans le soya (*Septoria glycines*) à forte concentration de CO₂ (550 ppm) alors que l'incidence du mildiou (*Peronospora manshurica*) dans cette même culture était diminuée. L'interaction entre l'augmentation des concentrations d'ozone (O₃) et l'agent pathogène dépend essentiellement du moment où la plante sera exposée à l'ozone, du stade phénologique de la plante et d'autres facteurs prédisposant à l'infection (Fuhrer, 2003; Manning et Tiedemann, 1995). L'ozone a peu de chance d'affecter directement les agents pathogènes (Manning et Tiedemann, 1995), mais peut avoir un impact en augmentant ou diminuant la susceptibilité d'une plante face à l'ennemi (Fuhrer, 2003), par exemple en élicitant les réactions de défense (Sandermann *et coll.*, 1998).

Peu d'études se sont penchées sur la modélisation des impacts des CC sur les agents pathogènes. En effet, ces derniers ont besoin d'humidité à différents stades de leur cycle de vie et la modélisation des précipitations et surtout de l'humidité relative présente une plus grande plage d'incertitude que la modélisation de la température. Cette incertitude se traduit par une gamme de réponses biologiques potentielles très variables. De plus, la biologie des

agents pathogènes est aussi très différente d'une espèce à l'autre en ce qui a trait à leurs réponses aux paramètres climatiques, ce qui rend difficile l'établissement de généralités sur l'impact de CC sur ceux-ci.

3.1.2.2. Impacts sur l'interaction plante-agent pathogène

Les changements climatiques auront un effet sur la physiologie des plantes, pouvant par ricochet modifier le pouvoir de résistance passive de ces dernières face aux maladies. Le Tableau 1 dresse un portrait des principaux impacts des CC à l'échelle de la relation plante-agent pathogène.

Tableau 1. Liste non exhaustive de l'impact de l'augmentation du CO₂ et de la température sur l'interaction entre la plante hôte et un agent pathogène

	Impact sur la plante	Impact sur l'agent pathogène	Références
CO ₂	Augmentation de la densité des stomates	Augmentation de l'établissement des colonies	(Lake et Wade, 2009)
	Épaississement de la feuille ou lignification de la plante	Diminution du pouvoir de pénétration de l'agent pathogène; établissement initial de l'agent pathogène retardé	(Boland <i>et coll.</i> , 2004; Coakley <i>et coll.</i> , 1999)
	Augmentation de l'activité métabolique de la plante	Une fois le pathogène entré, croissance accélérée	(Ziska et Runion, 2007)
	Augmentation de la croissance de la canopée, créant plus de connectivité entre les plants et plus d'humidité	Possibilité d'échange accrue d'agents pathogènes entre les plants; augmentation de la reproduction	(Chakraborty et Datta, 2003; Coakley <i>et coll.</i> , 1999; Rillig, 2007)
	Augmentation de l'efficacité à utiliser l'eau	Augmentation de la sporulation des champignons foliaires	(Ziska et Runion, 2007)
	Augmentation des sucres des feuilles	Augmentation de la croissance et de la reproduction	(Boland <i>et coll.</i> , 2004)
	Délai de la sénescence des feuilles	Augmentation de la gravité/intensité des maladies	(Ziska et Runion, 2007)
Température	Fermeture des stomates pour limiter l'évaporation lorsque la température est élevée	Limitation de l'entrée de certains agents pathogènes	(Ziska et Runion, 2007).
	Augmentation de la lignification sous des conditions climatiques plus chaudes	Favorise une meilleure tolérance de la plante hôte	(Fuhrer, 2003)

3.1.2.3. Impacts sur les mesures de gestion des agents pathogènes

Les modifications physiologiques ou physiques de la plante, en lien avec les changements climatiques, pourraient diminuer ou augmenter sa sensibilité aux agents pathogènes (Boland *et coll.*, 2004; Chakraborty et Datta, 2003; Coakley *et coll.*, 1999; Fuhrer, 2003; Lake et Wade, 2009; Rillig, 2007; Ziska et Runion, 2007) (Tableau 1). Une augmentation de l'incidence des maladies et de la sensibilité de la plante pourrait éventuellement **limiter la gamme de cultures / cultivars disponibles dans le futur**. Concernant les **fongicides**, leur efficacité pour lutter contre les agents pathogènes risque d'être modifiée par les hausses de température qui pourraient diminuer leur toxicité ou lors de précipitations fréquentes qui augmenteraient le lessivage avant leur pénétration dans la plante (Chakraborty *et coll.*, 2000; Rosenzweig *et coll.*, 2000).

3.1.3 Les mauvaises herbes

3.1.3.1. *Impact des changements climatiques*

De façon générale, l'augmentation du CO₂ risque d'engendrer une **augmentation du taux photosynthétique, du taux de croissance, de la biomasse, du ratio C : N et des composés de défense à base de carbone chez la plante** (Hunter, 2001; Patterson *et coll.*, 1999). Les plantes de type C4 sont capables de photosynthétiser à des teneurs atmosphériques de CO₂ bien inférieures à celles qui sont nécessaires pour les plantes de type C3, mais aussi, elles répondent moins bien que ces dernières à une augmentation des teneurs en CO₂. Ceci implique que globalement, dans un scénario d'augmentation du CO₂ atmosphérique, **les plantes de type C3 seront avantagées par rapport au type C4**. Or, en Amérique du Nord, 9 des 15 espèces de mauvaises herbes les plus problématiques sont de type C3, alors que certaines cultures sont de type C4 (maïs, millet, sorgho et canne à sucre) (Fuhrer, 2003). L'augmentation du CO₂ risque aussi d'engendrer une hausse des efforts de reproduction des plantes, se traduisant par une **plus grande production de pollen**, comme cela a été démontré chez la petite herbe à poux (Ziska et Caulfield, 2000). La température et les précipitations affectent la distribution géographique des mauvaises herbes (Patterson *et coll.*, 2009). La **migration des espèces vers les pôles et en altitude** sera favorisée par des températures plus clémentes. Des hivers plus doux pourraient favoriser l'accroissement vers le nord d'espèces actuellement limitées par les conditions hivernales trop froides pour leur survie, par exemple le Kudzu (Wolfe *et coll.*, 2008).

Les modélisations disponibles utilisant des simulations climatiques démontrent toutes une augmentation de l'aire de répartition des espèces vers le nord ou une redistribution de ces espèces en diminuant les populations du sud (Bradley, 2009; Bradley *et coll.*, 2010; Jarnevich et Stohlgren, 2009; Jeffree et Jeffree, 1996). Néanmoins, les risques associés aux mauvaises herbes reposent davantage sur l'augmentation des échanges commerciaux provoquant l'introduction de nouvelles espèces que sur les CC à proprement parler. Les risques phytosanitaires associés à une augmentation de l'aire de répartition des espèces seront donc d'autant plus importants si l'on considère également la globalisation des marchés, favorisant la dispersion des propagules*.

3.1.3.2. *Capacité d'évolution, d'adaptation et d'acclimatation des mauvaises herbes aux nouvelles conditions*

La diversité génétique des cultures actuelles ne cesse de diminuer au fil des ans, au détriment du pouvoir d'adaptation de ces cultures (Fernandez-Quintanilla *et coll.*, 2008). Le bagage génétique des mauvaises herbes demeure quant à lui très diversifié et conserve ainsi une plasticité phénotypique beaucoup plus grande que celle des plantes cultivées (Wolfe *et coll.*, 2008; Ziska et Runion, 2007). Le succès reproducteur des adventices, couplé à cette diversité génétique, leur permet de mieux s'acclimater aux variations climatiques, conférant aux mauvaises herbes un avantage compétitif (Hovenden, 2007).

3.1.3.3. *Impacts sur les mesures de gestion des mauvaises herbes*

Différentes études démontrent une augmentation de la tolérance aux herbicides chez certaines mauvaises herbes comme le chénopode blanc et la folle-avoine, en conditions élevées de CO₂ (Archambault, 2007; Ziska *et coll.*, 1999). Patterson *et coll.* (1999) ont aussi rapporté différents impacts négatifs de l'élévation de CO₂ sur les mesures de gestion des mauvaises herbes : une saturation des stomates et l'épaississement des cuticules nuiraient à l'absorption de l'herbicide par la plante, une plus grande concentration en amidon interférerait

avec l'activité de l'herbicide tandis que la plus grande croissance des rhizomes et des tubercules rendrait difficile le contrôle des plantes pérennes comme le chardon des champs (Ziska, 2010). Une augmentation de la température entraînerait pour sa part une augmentation de l'activité métabolique de la plante, favorisant la translocation et l'efficacité de l'herbicide une fois entré dans la plante (Archambault, 2007).

3.2 Analogues spatiaux

En climatologie, un lieu dont le climat du passé récent est similaire au climat futur projeté pour un autre lieu (de référence) constitue un analogue spatial (Mearns *et coll.*, 2001). L'identification d'analogues spatiaux représente un outil de communication relativement clair, qui permet à des non-experts de mieux saisir l'ampleur des CC. Cet outil peut par ailleurs faciliter la mise en place de plans d'adaptation, lorsque des mesures d'intervention existent déjà dans les lieux identifiés comme analogues spatiaux (Hallegatte *et coll.*, 2007). Ce type de méthodologie repose souvent sur l'hypothèse suivant laquelle des lieux similaires par rapport à certains aspects peuvent aussi l'être par rapport à d'autres aspects (Ford *et coll.*, 2010). Le degré de pertinence des méthodologies impliquant des analogues spatiaux dépend donc du degré de validité des similarités considérées.

Les analogues spatiaux ont déjà été utilisés dans des études relatives à l'agriculture. Par exemple, Ramírez-Villegas *et coll.* (2011) ont analysé l'évolution potentielle des cultures dans une ville du Ghana à l'aide de cet outil. D'autres méthodologies n'identifient pas directement des analogues spatiaux, mais les utilisent de manière implicite (Ford *et coll.*, 2010). Par exemple, Mendelsohn et Dinar (1999) ont illustré les impacts des CC sur l'agriculture en Inde et au Brésil, en déduisant les distributions futures des cultures à partir des déplacements des zones agro-écologiques. O'Brien *et coll.* (2004) ont aussi utilisé le principe de raisonnement par analogie dans le but d'identifier des mesures d'adaptation aux changements socio-économiques et climatiques en Inde (cartographie de vulnérabilité). Enfin, les analogues spatiaux ont aussi été utilisés pour identifier des invasions potentielles d'insectes ravageurs en Nouvelle-Zélande (Peacock et Worner, 2006).

Pour identifier les meilleurs analogues spatiaux, il est nécessaire d'évaluer le degré de similarité entre le climat de chacun des analogues potentiels et le climat de référence. Ceci implique le choix d'un ensemble d'indicateurs (quels aspects du climat comparer ?) ainsi que d'une méthode de comparaison des indicateurs (quels tests statistiques utiliser ?). Autant pour l'ensemble d'indicateurs que pour les méthodes de comparaison, il importe d'évaluer la sensibilité des résultats aux différents choix méthodologiques. Par exemple, Kopf *et coll.* (2008) ont trouvé que le meilleur analogue pour chacune des 12 villes européennes de référence tel que déterminé en considérant comme indicateurs un indice d'aridité (IA) et les degrés-jours de climatisation (DDC-) s'avérait être un plutôt mauvais analogue lorsque les degrés-jours de chauffage (DDC+) remplaçaient les DDC- ou étaient ajoutés comme troisième indicateur.

3.3 Modélisation

Les modèles bioclimatiques sont des représentations mathématiques et graphiques des relations qui caractérisent le développement de certains organismes vivants et qui dépendent directement du climat. Les simulations effectuées avec ces modèles ont pour but de faciliter la compréhension des mécanismes observés dans un milieu. Les modèles utilisent des mesures météorologiques (température, humidité, précipitations) pour prédire le développement d'une

culture, de ses ravageurs et l'apparition de certaines maladies. En ce sens, ils sont des outils précieux d'aide à la décision quand il s'agit de protéger une culture par des traitements phytosanitaires.

Les agriculteurs doivent composer dans leurs activités quotidiennes avec une variabilité importante d'éléments météorologiques. De plus, plusieurs scénarios associés aux changements climatiques prédisent une accentuation de cette variabilité. L'utilisation de modèles bioclimatiques permet d'intégrer cette variabilité afin de prédire le développement des cultures et de leurs ravageurs.

Le Centre informatique de prévisions des ravageurs en agriculture (CIPRA), mis au point par l'équipe de recherche en bioclimatologie et modélisation d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) à Saint-Jean-sur-Richelieu, regroupe plusieurs modèles prévisionnels (près de 90 indices et modèles bioclimatiques pour une vingtaine de cultures) dans une infrastructure commune. Il permet de prédire le développement des cultures (phénologie) et des ravageurs (insectes et maladies) en s'appuyant sur des données météorologiques horaires ou quotidiennes, et des modèles bioclimatiques développés à partir d'observations effectuées au champ ou en verger. Ainsi, en temps réel, le logiciel permet de cibler le meilleur moment pour les interventions phytosanitaires visant à protéger les cultures. De plus, il s'appuie non seulement sur des observations météorologiques provenant de différentes stations automatiques, mais aussi sur des prévisions météorologiques.

Dans le cadre d'études sur l'impact des changements climatiques, de tels modèles et indices bioclimatiques peuvent être adaptés pour répondre à des questions spécifiques concernant le développement des cultures et de leurs ravageurs. Toutefois, puisque les données climatiques dans les scénarios climatiques futurs sont surtout limitées à la température de l'air et aux précipitations sur une base quotidienne, des adaptations sont requises pour certains modèles, plus spécifiquement les modèles prévisionnels des maladies des cultures qui utilisent des données météorologiques horaires.

3.4 Vulnérabilités

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) décrit la vulnérabilité de la façon suivante : « *La vulnérabilité est fonction de la sensibilité d'un système aux changements du climat (le degré auquel un système va réagir à un changement quelconque dans le climat, y compris les effets bénéfiques et néfastes), la capacité d'adaptation (le degré selon lequel des ajustements aux pratiques, aux processus ou aux structures peuvent modérer ou compenser les dommages potentiels de profiter des opportunités créées par un changement quelconque dans le climat), et le degré d'exposition (impacts des CC sur les ennemis des cultures ciblés) d'un système aux dangers climatiques* » (GIEC, 2007).

L'évaluation de la vulnérabilité du secteur agricole face aux CC a pour but de proposer des mesures appropriées permettant de réduire le risque associé à ces changements climatiques. Deux options sont possibles pour réduire ces risques de façon anthropique : la diminution des CC et l'adaptation à ces changements (Fussler et Klein, 2006). Ce projet mise sur l'adaptation aux CC, décrit par Bradshaw *et coll.* (2004) comme les différentes réponses des individus, groupes ou gouvernements aux changements climatiques ou autres stimuli, dans le but de réduire la vulnérabilité ou la sensibilité aux divers impacts ou dommages potentiels. L'agriculture est par sa nature déjà sensible aux conditions climatiques, et est donc fréquemment citée comme un secteur vulnérable aux CC prévus (Rosenzweig et Parry, 1994). Différentes études ont démontré

par le passé qu'avec des mesures d'adaptation, ce secteur peut réduire sa vulnérabilité et que les opportunités pouvant être réalisées sont nombreuses (Smit et Skinner, 2002).

La première étape pour évaluer les vulnérabilités et les mesures d'adaptation pour le secteur agricole consiste à déterminer les vulnérabilités et la capacité d'adaptation actuelle des producteurs agricoles, qui sont les premières personnes concernées par les risques phytosanitaires. La seconde étape est d'évaluer avec eux, en regard des impacts des changements climatiques, les contraintes et opportunités auxquelles ils devront faire face et les conséquences sur leur capacité d'adaptation (Ford et Smit, 2004). Cette approche se fait par l'entremise d'entrevues semi-structurées avec questions ouvertes qui permettent aux répondants de décrire leurs expériences et actions envisagées selon leur perspective et leurs priorités (Pearce *et coll.*, 2010). Les résultats de ces entrevues sont présentés aux intervenants du secteur de la phytoprotection (agronomes, chercheurs, professeurs) et aux décideurs dans le cadre d'ateliers participatifs d'évaluation des vulnérabilités. Ces ateliers permettent d'inclure différents facteurs autres que le climat influençant la capacité d'adaptation du secteur agricole tel que les considérations politiques, culturelles, économiques, institutionnelles et technologiques (Smit et Wandel, 2006). Cela permet d'intégrer les mesures d'adaptation identifiées dans les programmes déjà mis en place dans le secteur de la phytoprotection. Il est d'ailleurs largement accepté que l'efficacité des mesures d'adaptation est plus grande lorsqu'elles sont intégrées ou généralisées à des mesures déjà en places par le gouvernement ou autres institutions (Pearce *et coll.*, 2010). Smit et Skinner (2002) regroupent ces différentes mesures d'adaptation en quatre catégories : 1) les mesures concernant le développement technologique, 2) celles reliées aux programmes gouvernementaux et d'assurance, 3) les pratiques agricoles et 4) la gestion financière au niveau de la ferme.

4. Méthodologie / Données

4.1 Identification des ennemis des cultures, des cultures et des régions ciblées

Afin de procéder à la sélection des espèces pour les études de cas, nous avons réalisé un inventaire des ennemis des cultures les plus importants au Québec, à l'aide de divers intervenants en phytoprotection. De cet inventaire, 195 espèces (142 insectes et acariens, 36 agents pathogènes et 17 mauvaises herbes) avaient été identifiées comme étant problématiques au Québec. Cette liste a été réduite à 23 espèces (13 insectes, 7 agents pathogènes et 3 mauvaises herbes) à l'aide de critères de sélection établis selon la biologie de l'espèce, les propriétés de la culture et les moyens de lutte disponibles. Parmi ces critères, cinq grandes lignes directrices ont permis de sélectionner ces ennemis :

- L'importance de la culture (superficie cultivée et retombées économiques)
- La relative simplicité de la réponse de l'ennemi face aux changements climatiques
- La disponibilité des données concernant l'espèce
- L'impact potentiel des changements climatiques sur l'ennemi en fonction de sa biologie
- L'importance économique de l'espèce causant actuellement des dommages considérables dans les cultures du Québec

Une consultation a été menée en octobre 2010, auprès d'une trentaine d'experts (chercheurs et intervenants en phytoprotection, voir Tableau 2), et a permis de sélectionner cinq espèces : le doryphore de la pomme de terre, la pyrale du maïs, la punaise terne, la fusariose de l'épi et la petite herbe à poux (Tableau 3).

Tableau 2. Portrait des experts consultés pour la sélection des ennemis à l'étude

Fonction	Affiliations	Nombre de personnes consultées
Chercheurs	Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC)	7
	Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA)	4
	Centre de recherche sur les grains (CEROM)	1
Professeurs	Université Laval	4
	Université du Québec à Montréal (UQAM)	1
	University of Western Ontario (UWO)	1
Autres experts	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ)	13
	Club environnemental et techniques atocas Québec (CETAQ)	1

Les régions administratives sélectionnées pour chaque espèce (Tableau 3) ont été choisies d'abord pour l'importance de la culture dans ces régions. Une figure des superficies cultivées au Québec pour chaque culture ciblée se retrouve à l'Annexe 1.

4.1.1. Pyrale du maïs

4.1.1.1. La situation de l'ennemi au Québec

La pyrale du maïs représente le principal insecte causant des ravages dans la culture du maïs sucré. Ce ravageur est toutefois bien contrôlé dans la culture du maïs-grain puisque l'usage de plants résistants transgéniques (Bt) est permis dans ces productions et limite complètement son développement. Les producteurs de maïs sucré, n'ayant accès aux cultivars Bt que depuis l'année 2012, doivent donc lutter contre ce ravageur tout au cours de la saison de croissance. Les larves peuvent s'attaquer à toutes les parties aériennes des plants de maïs, mais c'est lorsque qu'elles se logent dans l'épi qu'elles causent le plus de dommages. De plus, la tolérance quant à la présence de larves dans l'épi est pratiquement nulle chez le consommateur, et l'efficacité des moyens de lutte doit donc être optimale pour assurer un contrôle absolu de ce ravageur.

Nous retrouvons deux races de pyrale du maïs qui se chevauchent sur le territoire du Québec, soit l'univoltine (une génération/année) et la bivoltine (deux générations/année). Les champs de maïs sucré sont particulièrement vulnérables à la race univoltine lorsque les plants atteignent le stade six feuilles et plus, et que ce moment coïncide avec la période de ponte de la pyrale du maïs. La première génération de la race bivoltine cause généralement peu de dommages puisque sa densité est habituellement faible en lien avec une forte mortalité hivernale. Néanmoins, le maïs sucré cultivé avec paillis de plastique et sous bâche ainsi que les champs semés tôt sur un retour de maïs sucré tardif infestés l'année précédente sont plus vulnérables à cette première génération de la race bivoltine. La deuxième génération de la race bivoltine, se développant au cours du mois d'août, est plus abondante et cause plus de dommages. Il est recommandé d'enfouir les débris de culture des plants plus hâtifs déjà récoltés afin d'éviter une plus grande abondance d'hôtes.

En absence d'hybrides résistants, l'utilisation d'insecticides chimiques demeure la méthode de contrôle la plus utilisée pour lutter contre la pyrale du maïs dans la culture du maïs sucré au Québec (Tableau 1 – Annexe 2). Les principaux produits utilisés sont dans l'ordre le Matador, le Lannate, le Ripcord 400 EC et le Success (Étilé, *comm. pers.*). Un nouveau venu, le Coragen, semble être très efficace et devrait monter en popularité d'ici quelques années. L'application des insecticides au champ se fait soit de façon systématique (en appliquant un insecticide à intervalles de 7 jours), soit en utilisant les recommandations du Réseau d'avertissement phytosanitaires (RAP) basées sur les densités de pyrale et le stade de développement du maïs.

Il existe également des méthodes alternatives aux insecticides. Dans la dernière décennie, environ 15 % des producteurs québécois de maïs sucré utilisent les trichogrammes, de petits parasitoïdes d'œufs de pyrale (Dupuis, 2010). Cette faible proportion s'explique principalement par les coûts beaucoup plus élevés associés aux relâchements de trichogrammes plutôt qu'à une utilisation d'insecticides (86 \$/ha pour le relâchement de trichogrammes comparé à 20-69 \$/ha pour une application d'insecticides (Étilé, *comm. pers.*) L'installation des trichocartes (petites cartes contenant des œufs infestés de trichogrammes) se fait avant la ponte des œufs de la pyrale du maïs. Une fois ces cartes installées, les parasitoïdes devraient émerger selon deux cohortes, soit une à 24-48h suite à la pose et l'autre à 4-5 jours suivant l'installation.

4.1.1.2. Régions ciblées pour l'étude

La Montérégie (Est et Ouest) est de loin la région où l'on cultive le plus le maïs sucré, avec ses 7 000 ha de production (Figure 1 – Annexe 1). Néanmoins, puisque la distribution des races univoltines et bivoltines suit un patron nord-sud, nous utiliserons la région de la Montérégie pour suivre les populations de la race bivoltine ainsi que la région de la Capitale-Nationale afin d'observer la persistance de la dominance de la race univoltine.

4.1.2. Fusariose de l'épi

4.1.2.1. Situation de l'ennemi au Québec

La fusariose de l'épi dans la culture du blé est causée principalement par *F. graminearum*, mais d'autres espèces, telles que *F. avenaceum* et *F. culmorum*, peuvent aussi jouer un rôle important chez cette maladie (Bailey *et coll.*, 2004). L'infection par ce champignon entraîne la production d'une mycotoxine, le désoxynivalénol (DON) qui est indésirable dans le grain destiné aux animaux ou à l'homme (Tamburic-Illincic, 2010). Le développement de symptômes s'accroît par temps chauds et humides durant l'épiaison et la maturation des grains (Bailey *et coll.*, 2004). Depuis les années 2000, la maladie est bien implantée au Canada et cause des pertes économiques importantes lorsque les conditions climatiques sont favorables au développement de la maladie. Une recrudescence de cette maladie depuis les dernières années inquiète plusieurs chercheurs (Chakraborty et Newton, 2011; McMullen *et coll.*, 1997).

Les traitements chimiques représentent une des méthodes utilisées pour lutter contre ce champignon (Tableau 2 – Annexe 2), et sont principalement le FOLICUR (tébuconazole), le PROSARO (prothioconazole/ tébuconazole) et le CARAMBA (metconazole). L'efficacité des traitements fongicides est très variable et certains traitements peuvent n'avoir aucun impact sur le développement de la maladie s'ils ne sont pas appliqués au bon stade d'intervention (début floraison et mi-floraison) (Rioux *et coll.*, 2012). Il est économiquement rentable d'appliquer des fongicides seulement dans les cas où l'intensité de la fusariose est telle qu'elle rend les cultures invendables dû à un taux élevé de DON (Van Rossum *et coll.*, 2012).

Aucun cultivar canadien n'est complètement résistant à cette maladie (Fernandez *et coll.*, 2009; Wong *et coll.*, 1995), mais certains sont moins sensibles que d'autres à la fusariose de l'épi (RGCQ, 2011). Les pratiques culturales, telles que la rotation des cultures, la plantation hâtive et l'évitement des récoltes en zone de verse, peuvent diminuer l'incidence de cette maladie (Subedi *et coll.*, 2007). L'utilisation des couverts végétaux et d'engrais verts pourrait limiter l'incidence de la fusariose en créant une barrière physique entre le sol et les résidus infectés de fusariose, si ces derniers couvrent le sol au moment de l'infection (Cantin *et coll.*, 2012). Par ailleurs, la récolte hâtive suivie d'un séchage des grains permet d'arrêter plus tôt le développement du champignon sur les épis déjà infectés (Cantin *et coll.*, 2012). Pour terminer, une autre option pour les producteurs biologiques est maintenant possible, soit l'utilisation de champignons endogènes, tels que *Clonostachis rosea*, qui inhibe la croissance du champignon et réduit les concentrations de DON dans les grains. Les études préliminaires effectuées par Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) sur l'efficacité de *C. Rosea* démontrent que ce champignon pourrait éventuellement permettre de réduire l'utilisation des fongicides ou pourrait être employé dans le cadre d'un régime de lutte intégrée visant à réduire l'utilisation de pesticides (Xue *et coll.*, 2009).

4.1.2.2. Régions ciblées pour l'étude

Le blé est cultivé majoritairement en Montérégie avec des superficies de plus de 16 000 ha (Figure 2 – Annexe 1). Nous utiliserons donc cette région ainsi que celle du Bas-Saint-Laurent pour les scénarios climatiques futurs.

4.1.3. Le doryphore de la pomme de terre

4.1.3.1. Situation de l'ennemi au Québec

Le Québec représente la 5^e province productrice de pommes de terre (Statistique Canada, 2011). Le ravageur principal de cette culture est le doryphore de la pomme de terre. La défoliation des plants par ce ravageur peut détruire complètement un champ (Alyokhin, 2009). À ce jour, une seule génération complète est présente dans le nord du territoire québécois avec l'apparition d'une deuxième génération partielle plus tard en saison.

Une des difficultés liées au contrôle de cette espèce réside dans le fait que la période d'émergence des adultes au printemps s'étale sur plusieurs jours (voir 50 jours) (Bélanger, 2005). Les interventions doivent donc être multiples pour agir sur un grand intervalle de temps, bien que les traitements de semences limitent le nombre d'applications foliaires. La lutte chimique est efficace si elle est bien synchronisée (les traitements sont principalement efficaces contre les larves) (Bélanger, 2005) (Tableau 3 – Annexe 2). Toutefois, le doryphore de la pomme de terre possède une capacité exceptionnelle d'adaptation, et a développé une résistance pour la plupart des insecticides utilisés (Hare, 1990). Plusieurs cultivars de pommes de terre génétiquement modifiés pour lutter contre le doryphore existent et sont autorisés au Canada, mais ne sont pas présentement utilisés pour des raisons de marché ou climatiques (Gouvernement du Québec, 2010).

Au niveau des méthodes de lutte biologique, notons plusieurs opportunités telles que les carabes *Lebia* spp. et *Pterostichus* spp., la punaise bimaquée (*Perillus bioculatus*), la coccinelle maculée (*Coleomegilla maculata*) et le parasitoïde *Myopharus doryphorae* (Cloutier et coll., 2002). Malheureusement, ces méthodes demeurent peu disponibles ou peu utilisées. Les faibles taux de croissance associés à ces ennemis naturels ne permettent pas un contrôle économique efficace du doryphore, spécialement en début de saison, lorsque les plants nécessitent une meilleure protection (Hare, 1990). Une avenue plus prometteuse serait l'utilisation de *Bacillus thuringiensis*, une bactérie produisant une endotoxine, permettant de bloquer la consommation des jeunes larves de doryphore (Hare, 1990). Les insecticides et certaines mesures culturales réussissent généralement à maintenir cet insecte sous contrôle, mais il suffit de très peu de changements dans l'environnement pour déstabiliser le système et encourir d'énormes pertes économiques.

4.1.3.2. Régions ciblées pour l'étude

Les régions de la Capitale-Nationale et de Lanaudière représentent les deux régions administratives où l'on cultive le plus de pommes de terre au Québec, avec une superficie d'environ 4 500 ha (Figure 3 – Annexe 1). Ces deux régions seront donc utilisées dans l'élaboration des scénarios climatiques.

4.1.4. La petite herbe à poux

4.1.4.1. Situation de l'ennemi au Québec

La petite herbe à poux possède des caractéristiques inhérentes aux mauvaises herbes telles qu'une plasticité morphologique, une production élevée de graines ainsi qu'une longue longévité des graines (Simard et Benoit, 2010). Elle se retrouve dans la plupart des régions agricoles du Québec. Sa forte compétitivité peut s'expliquer par sa croissance rapide, mais aussi par ses capacités allélopathiques (Bruckner, 1998). Cette espèce peut avoir une importance économique en agriculture en diminuant le rendement de plusieurs cultures. Par exemple, en présence de 120 plants/m², le rendement d'haricots est diminué de 75 % (Gauvrit et Chauvel, 2010). Pour le soya, des pertes de rendement de l'ordre de 25 % à 30 % sont observées en présence de 4 plants/m² (Cowbrough *et coll.*, 2003; Weaver, 2001). Une densité semblable réduit le rendement du maïs de façon moindre, soit de 10 % à 20 % (Weaver, 2001). Sa dissémination s'effectue principalement par l'homme, le long des routes (Simard et Benoit, 2010), par les oiseaux et par l'eau. Elle représente également une menace au niveau de la santé de l'homme en causant la rhinite allergique.

Des cas de résistance à des herbicides de différents groupes (possédant des modes d'action différents) ont été observés. Au Québec, la petite herbe à poux a développé une résistance aux herbicides du groupe 7 (linuron), du groupe 2 (Pursuit) et du groupe 5 (les triazines) (Saint-Louis *et coll.*, 2005; Bernier, 2008). Des cas de résistance aux herbicides du groupe 9 (glyphosate) ont aussi été observés en Arkansas, aux États-Unis (Brewer and Oliver, 2009). Le Tableau 4, à l'Annexe 3, présente les différentes matières actives utilisées pour lutter contre la petite herbe à poux. Les matières actives sont classées en fonction de leur mode d'action (groupe). On mélange parfois des matières actives possédant différents modes d'action afin de contrer la résistance de la mauvaise herbe à certains groupes (Tableau 5 – Annexe 2).

L'Université McGill travaille présentement sur un agent de lutte biologique potentiel, *Ophraella communa*, un coléoptère herbivore de la famille des chrysomelidae (Palmer et Goeden, 1991). Les cultures de recouvrement, tel que l'utilisation du trèfle dans le blé d'hiver, permettent de diminuer les populations d'herbe à poux, mais jamais complètement (Mutch *et coll.*, 2003). Puisque le développement de l'herbe à poux est influencé principalement par la température et la photopériode (Deen *et coll.*, 1998), les changements climatiques pourraient augmenter la production de pollen chez cette espèce causant ainsi une augmentation du risque de prolifération, de la pression sur les cultures et des rhinites allergiques chez l'homme (Benoit, *comm. pers.*).

4.1.4.2. Régions ciblées pour l'étude

Les régions de la Montérégie et du Saguenay-Lac-Saint-Jean ont été ciblées pour l'étude de cas sur l'herbe à poux. Ces deux régions offrent la possibilité d'étudier l'espèce sous deux conditions climatiques différentes, soit une région chaude en Montérégie, et une plus fraîche au Saguenay-Lac-Saint-Jean.

4.1.5. Punaise terne

4.1.5.1. Situation de l'ennemi au Québec

Espèce généraliste produisant de trois à cinq générations par année, la punaise terne cause des dommages dans les cultures de la pomme, des légumes et des petits fruits en se nourrissant directement sur les bourgeons, les boutons floraux, les fruits et les tissus en croissance. Elle peut occasionner des pertes de rendement en causant l'avortement des bourgeons et des fruits, en provoquant des malformations et en créant une porte d'entrée pour les infections secondaires. Les moyens de contrôle contre ce ravageur reposent sur la lutte chimique et quelques cas de résistance ont été signalés (Snodgrass *et coll.*, 2009). L'augmentation des températures pourrait favoriser un développement plus rapide de cette espèce et augmenter le nombre de générations produites au cours d'une saison.

4.1.5.2. Régions ciblées pour l'étude

La punaise terne affecte différentes cultures et donc différentes régions sont touchées au cours de la saison de croissance. La culture de la pomme est très forte en Montérégie et c'est pourquoi nous avons ciblé cette région. Afin d'obtenir une réponse sous des conditions légèrement plus fraîches, nous avons sélectionné le Centre-du-Québec, une région où la production de petits fruits est très importante (Figure 4 – Annexe 1).

Tableau 3. Espèces retenues pour les études de cas ainsi que les cultures associées, les régions ciblées et les indicateurs bioclimatiques.

	Espèce	Culture	Régions ciblées	Indicateurs bioclimatiques
Insectes	Doryphore de la pomme de terre <i>Leptinotarsa decemlineata</i>	Pomme de terre	Capitale-Nationale (agr.) Lanaudière (agr.)	Degrés-jours base 10 Précipitations pendant SC (saison de croissance) Longueur SC
	Pyrale du maïs <i>Ostrinia nubilalis</i>	Maïs sucré	Montérégie Capitale-Nationale (agr.)	Degrés-jours base 10 Précipitations pendant SC Longueur SC
	Punaise terne <i>Lygus lineoralis</i>	Plusieurs cultures (petits fruits, pommes et autres)	Montérégie Centre-du-Québec	Degrés-jours base 0 Précipitations pendant SC Longueur SC
Agent pathogène	Fusariose de l'épi <i>Fusarium graminearum</i>	Blé et orge	Montérégie Bas-St-Laurent	Degrés-jours base 12.5 Précipitations pendant SC Humidité relative
Mauvaise herbe	Petite herbe à poux <i>Ambrosia artemisiifolia</i>	Grandes cultures	Montérégie Sag.-Lac-St-Jean	Degrés-jours base 3.6 Précipitations pendant SC Humidité relative

4.2 Identification des indicateurs bioclimatiques

Comme indiqué dans la section 3.2, l'identification des analogues spatiaux nécessite de choisir un ensemble d'indicateurs qui permettront la comparaison du climat futur dans les régions ciblées et le climat récent des analogues potentiels. Une revue de littérature pour chacune des espèces ciblées a permis d'identifier les indicateurs bioclimatiques les plus déterminants pour ces espèces. Ils sont décrits dans le Tableau 3. L'humidité relative n'a toutefois pas été retenue comme indicateur bioclimatique puisque les valeurs obtenues pour l'horizon 2041-2070 lors de l'élaboration des scénarios climatiques n'étaient pas assez fiables.

4.3. Détermination des analogues spatiaux

Afin de déterminer des analogues spatiaux pour les régions de référence, il est d'abord nécessaire d'avoir d'une part une description des climats actuels des analogues potentiels, et d'autre part une description des climats futurs anticipés pour les régions de référence. Les analogues potentiels sont les points de la grille des données d'observation discutées dans la section 4.3.1.2., tandis que les régions de référence sont celles présentées précédemment, dans la section 4.1. Les descriptions des climats sont issues de méthodes qui combinent les données d'observation (pour le passé récent) ainsi que les simulations climatiques (pour le passé récent ainsi que la période future). Ces méthodes traitent les variables dites de base que sont les températures quotidiennes minimale (T_{\min}), maximale (T_{\max}) et moyenne (T_{moy}), ainsi que les précipitations quotidiennes (Pr).

Une fois les climats décrits, les indicateurs bioclimatiques choisis (section 4.3.2) sont calculés à partir des variables de base. Ce sont les valeurs annuelles des indicateurs qui entrent alors dans le processus de comparaison des climats. Des critères de comparaison agissent alors tour à tour sur les paires de climat, en évaluant le degré de ressemblance entre, d'une part le climat futur de la région de référence et d'autre part, le climat du passé récent de l'analogue potentiel considéré. Les meilleurs analogues peuvent alors être identifiés.

Pour plusieurs étapes du processus d'identification des scénarios analogues, des tests de sensibilité ont été effectués. Plusieurs résultats de ces tests sont présentés dans Bourdages (2011); alors que Grenier *et coll.* (2012) présentent une analyse plus approfondie de l'effet du choix de la méthode de comparaison des climats de référence et futur ainsi que des simulations climatiques utilisées.

4.3.1. Construction des scénarios climatiques de base

4.3.1.1. Méthodes de mise à l'échelle

Les sorties de modèles climatiques comportent des biais. Il est donc nécessaire d'appliquer des méthodes de post-traitement des données brutes dans le processus de développement des scénarios climatiques. Dans le cadre de ce projet, deux méthodes de post-traitement ont été retenues pour produire les séries temporelles de températures et de précipitations qui sont à la base des scénarios climatiques. Les deux méthodes, soit le « *daily scaling* » et le « *daily translation* », sont du type « transposition par quantile » et sont décrites dans Mpelasoka et Chiew (2009).

La méthode de *daily scaling* (DS) considère d'abord une série temporelle observée comme description du climat du passé récent en un lieu (série de base). Une description du climat futur est ensuite obtenue en transposant les observations suivant une fonction d'ajustement dictée par une simulation climatique. Cette fonction d'ajustement est définie en comparant le changement entre la partie historique et la partie future d'une simulation climatique.

La méthode de *daily translation* (DT) considère plutôt le futur simulé par un modèle climatique comme série de base, et transpose celle-ci selon une fonction de correction de biais qui dépend de la différence entre le climat de référence observé et le climat de référence simulé.

Chacune des deux méthodes décrites ci-haut possède des avantages et inconvénients selon l'application, et la comparaison des scénarios produits par ces deux méthodes permet d'évaluer la robustesse des résultats face au choix de la méthode de mise à l'échelle. Dans le cadre du projet, l'identification des analogues spatiaux s'est avérée peu sensible à ce choix (Bourdages, 2011), et il a été décidé de présenter les résultats issus d'une seule méthode, soit la DT. Cette méthode a été choisie puisque l'interprétation des résultats s'avérait plus simple qu'avec la méthode DS.

4.3.1.2. Choix des données d'observations

La sélection d'un jeu de données d'observations est basée sur la disponibilité des variables nécessaires au calcul des indicateurs pertinents pour l'étude en cours, et ce sous trois aspects :

- la période d'intérêt : 1970 -2000
- la région couverte : Est de l'Amérique du Nord
- la disponibilité et la qualité des variables

Dans le cadre du présent projet, centré sur l'étude de différents types d'ennemis des cultures (insectes, agents pathogènes et mauvaises herbes), les indices pertinents sont la longueur de la saison de croissance, les cumuls de degrés-jours (bases 0, 3.6, 10 et 12.5 °C) et les précipitations durant la saison de croissance. Ces indicateurs nécessitent principalement des données à fréquence quotidienne de température et de précipitations.

Les jeux de données utilisés pour l'étude sont les suivants : a) des données mensuelles sur grille de 10 km de résolution couvrant l'Amérique du Nord (McKenney *et coll.*, 2006) et b) les données quotidiennes sur grille de 10 km de résolution couvrant le Canada (Hutchinson *et coll.*, 2009). La banque de données à l'échelle mensuelle comporte non seulement les variables climatiques de base, mais aussi des indicateurs bioclimatiques prédéfinis. Hors, pour le cumul de degrés-jours de croissance, seul celui à base 5 °C est disponible alors que divers seuils étaient requis pour réaliser les analyses d'impacts. Un test préliminaire a montré que l'identification des scénarios analogues est peu sensible au choix de la base du calcul des degrés-jours et qu'il est suffisant d'utiliser un seul indicateur de ce type (Bourdages, 2011). Les trois indicateurs utilisés sont donc les degrés-jours de croissance en base 5 °C, la longueur de la saison de croissance ainsi que les précipitations pendant la saison de croissance. Les données à une fréquence quotidienne servent quant à elles à construire les scénarios climatiques attendus dans les régions d'intérêt en 2050, la fréquence quotidienne étant nécessaire pour le calcul des indicateurs bioclimatiques.

4.3.1.3. Choix des simulations climatiques

L'étude de cas sur les risques phytosanitaires nécessite des données climatiques à résolution assez fine pour déceler les caractéristiques climatiques à l'échelle régionale. Par conséquent, les simulations choisies proviennent d'un modèle à haute résolution, soit le Modèle régional canadien du climat; MRCC 4.2.3 (Caya et Laprise, 1999; Music et Caya, 2007). Le Tableau 4 présente chacune des neuf simulations incluses dans l'ensemble, soit le code des simulations, la provenance des données pilotes, les détails de simulations et le scénario d'émission de gaz à effet de serre et d'aérosols (Nakicenovic et Swart, 2000). Plus de détails sur les simulations issues de modèles généraux du climat (GCM) d'où proviennent les données pilotes peuvent être trouvées dans Scinocca *et coll.* (2008) pour le Canadian Global Climate Model ; CGCM3; Jungclaus *et coll.* (2006) pour ECHAM5 et Salas-Melia *et coll.* (2005) pour le Centre National de Recherches Météorologiques « global climate model » ; CNRM-CM3.

Tableau 4. Liste des simulations utilisées dans l'étude

Code (ref - fut)	Modèles (MRC Pilote#membre) (MRC Pilote#membre)	Résolution	Domaine	Pas de temps	SRES
aeY-afb	MRCC4.2.3 CGCM3#1	45km	AMNO	15 min	A2
aez-afc	MRCC4.2.3 CGCM3#2	45km	AMNO	15 min	A2
afa-afd	MRCC4.2.3 CGCM3#3	45km	AMNO	15 min	A2
aet-aet	MRCC4.2.3 CGCM3#4	45km	AMNO	15 min	A2
aev-aev	MRCC4.2.3 CGCM3#5	45km	AMNO	15 min	A2
agw-ahb	MRCC4.2.3 CNRM-CM3#1	45km	AMNO	15 min	A1B
agx-agx	MRCC4.2.3 ECHAM5#1	45km	AMNO	15 min	A2
ahi-ahk	MRCC4.2.3 ECHAM5#2	45km	AMNO	15 min	A2
ahj-ahw	MRCC4.2.3 ECHAM5#3	45km	AMNO	15 min	A2

L'ensemble est principalement formé de simulations suivant le Special Report on Emission Scenario; SRES A2 (8/9 simulations), qui est considéré comme relativement pessimiste. Toutefois, selon Raupach *et coll.* (2007), *La trajectoire d'émissions depuis 2000 était près du scénario A1FI, le scénario SRES ayant les plus fortes émissions [plus fortes que le SRES A2]. De plus, le taux d'augmentation des émissions depuis 2000 a excédé celui du scénario A1FI* [Traduction; page 10289].

Considérant la taille plus limitée de l'ensemble de simulations régionales disponibles, il est important de situer les changements moyens projetés dans les simulations sélectionnées pour l'étude dans un ensemble plus large incluant aussi les simulations globales qui sont, elles, à une échelle plus grossière. De façon générale, l'ensemble sélectionné ici couvre relativement bien l'amplitude des changements en termes de précipitations. Toutefois, la couverture des changements de température projetée est plus limitée et nous avons surtout affaire à des scénarios médians pour cette variable (Figure 1).

Cela implique qu'il est plausible que la réalité suive une trajectoire comportant plus (moins) de degrés-jours de croissance ainsi que des saisons de croissance plus longues (courtes). Les plans d'adaptation doivent donc considérer ces possibilités en intégrant des marges d'erreur de part et d'autre des scénarios fournis.

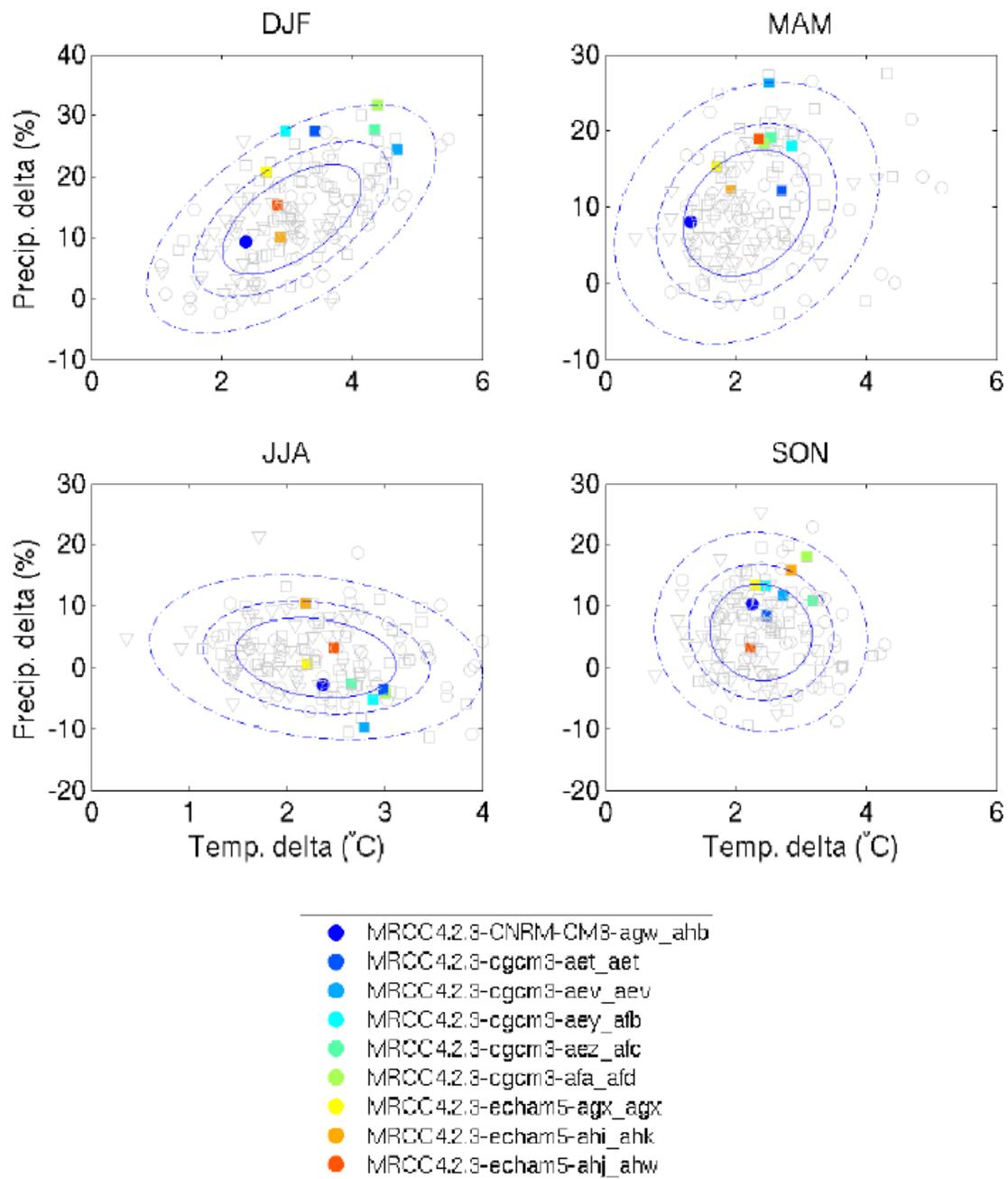


Figure 1. Distribution des changements saisonniers projetés de température et précipitation sur le sud du Québec entre l'horizon 2050 (2046-2065) et la période de référence (1971-2000), par les simulations décrites au Tableau 4. Les symboles gris indiquent les simulations disponibles. Les lignes pleines, tiretées et en traits et pointillés correspondent dans l'ordre à la médiane, au 75^e et au 95^e percentile. Les scénarios d'émissions (SRES) A2, A1B et B1 sont représentés respectivement par des carrés, cercles et triangles. Chaque saison est indiquée par les premières lettres des trois mois la composant : DJF, MAM, JJA et SON pour l'hiver, le printemps, l'été et l'automne.

4.3.2. Calcul des indicateurs bioclimatiques

Les indicateurs qui ont été utilisés pour la détermination des analogues spatiaux constituent un compromis entre les indices bioclimatiques issus de la revue de littérature (Tableau 3) et la disponibilité des indices dans le jeu des données mensuelles. Ce sont :

a. Longueur de la saison de croissance

La saison de croissance débute lorsque la moyenne mobile (15 jours) de la température moyenne quotidienne passe au-dessus de 5 °C pendant au moins cinq jours et se termine quand la moyenne mobile (15 jours) de la température minimale quotidienne atteint -2 °C après le 1^{er} août. La moyenne mobile est utilisée pour représenter les modèles utilisés par McKenney *et coll.* (2006) pour produire des données quotidiennes à partir de données mensuelles.

b. Degrés-jours de croissance

Somme des degrés-jours en base cinq pendant la période de croissance, calculée à partir de la moyenne mobile (15 jours) de la température quotidienne moyenne. La moyenne mobile est utilisée pour représenter les modèles utilisés par McKenney *et coll.* (2006) pour produire des données quotidiennes à partir de données mensuelles.

c. Précipitations pendant la saison de croissance

Somme des précipitations pendant la période de croissance (même qu'au point a et b), telle que délimitée par le début et la fin trouvée pour le calcul du premier indice.

Chaque indice est :

1. disponible dans la banque de jeu de données à l'échelle mensuelle sur l'Amérique du Nord
2. calculé sur les données climatiques post-traitées (méthode DT) de la période de référence pour les six régions à l'étude
3. calculé sur les scénarios climatiques à l'horizon 2050 (période 2041-2070) pour les six régions à l'étude (méthode DT)

4.3.3. Application des critères de sélection des analogues

Dans la production des scénarios analogues ainsi que dans les tests de sensibilité, la comparaison des climats est faite en utilisant le test statistique de Kolmogorov-Smirnov (KS), ainsi qu'une variante de ce dernier applicable en deux ou trois dimensions (Fasano et Franceschini, 1987). Ce test procède en deux étapes. Dans un premier temps, la distance de Kolmogorov-Smirnov (D_{KS}) est obtenue pour une paire de distributions climatiques. La distance D_{KS} constitue une métrique de dissimilarité soit une méthode pour quantifier le degré de différence entre deux distributions (le nom correspond aussi bien à la méthode qu'à la valeur issue de l'application de celle-ci). Cette métrique donne une valeur nulle pour deux climats identiques, et une valeur de un pour deux distributions qui sont si distantes qu'elles ne se chevauchent pas (p.ex. : la plus petite valeur dans un climat est plus grande que la plus grande valeur dans l'autre climat, pour l'un des indicateurs). Dans un deuxième temps, D_{KS} est convertie en une « *p*-value », c'est-à-dire une probabilité que deux distributions issues d'une même distribution parente donne une valeur de D_{KS} au moins aussi grande que celle obtenue entre les deux distributions comparées. Ce test est considéré indépendant de la forme de la distribution (même s'il s'agit en réalité d'une approximation), mais la correspondance entre D_{KS} et la *p*-value dépend de la corrélation entre les différents

indicateurs utilisés. Le test de KS s'applique simultanément sur l'ensemble des indicateurs. Les détails du fonctionnement du test statistique, ainsi que des figures illustrant clairement les concepts, peuvent être trouvés dans Kopf *et coll.* (2008). Grenier *et coll.* (2012) présentent différentes métriques utilisables pour identifier des analogues, et démontrent que l'incertitude sur les analogues liée au choix de la métrique est généralement inférieure à celle liée au choix de la simulation.

4.3.4. Sélection des meilleurs analogues spatiaux

Chaque analogue potentiel s'est fait attribuer un score variant entre 0 et 9. Le score est un entier, qui correspond au nombre de simulations pour lesquelles la p -value de l'analogue potentiel dépasse le seuil de 5 %. Ce seuil est arbitraire, mais a été choisi parce qu'il permettait de dégager des régions analogues d'une taille pratique. Il est important de mentionner que la méthode retenue identifie les meilleurs analogues parmi un bassin de candidats (analogues potentiels), mais n'informe pas si ces (relativement) meilleurs analogues sont de bons analogues dans l'absolu.

4.4 Analyser les impacts potentiels des CC sur la base des analogues spatiaux

Le choix des régions analogues considérées pour l'étude s'est fait sur la base des cartes des analogues spatiaux produites pour chacune des régions du Québec ciblées. À l'aide d'une échelle de couleur, ces cartes présentent le nombre de simulations climatiques (de 0 à 9) identifiant différentes régions aux États-Unis comme analogues. Les régions où plusieurs simulations repéraient la même région étaient privilégiées. Par la suite, le recensement des superficies de la culture ciblée était réalisé pour chacune des régions. La (ou les) région(s) ayant une plus grande superficie de la culture ciblée étaient conservée(s) pour l'étude à fin de comparaison avec le climat futur québécois.

Pour chacune des régions analogues ciblées, une revue de littérature a été réalisée sur le profil de la culture, la situation de l'ennemi de la culture et les méthodes de lutte utilisées pour contrôler cette espèce, les sources d'informations étant "*Web of Science*" et "*Google Scholar*". Les informations sur la situation de l'ennemi ont été principalement retrouvées sur les sites d'extension des universités de chaque État américain où l'on trouvait les informations les plus actuelles concernant la situation dans la région analogue. Mais puisque les méthodes de contrôles recommandées dans les feuillets techniques disponibles sur les sites des « extension » ne représentent pas toujours la réalité de ce qui est vraiment utilisé au champ par les producteurs, nous avons contacté directement des spécialistes des ennemis à l'étude. Ces interviews électroniques ont permis d'obtenir une meilleure vision de la région ainsi que des opinions des experts quant à l'impact des changements climatiques sur l'ennemi en question ainsi que des méthodes de lutte à venir. Les questions des entrevues ainsi que les réponses des spécialistes sont présentées à l'Annexe 2.

4.5 Vérifier les analyses d'impacts basées sur des analogues spatiaux par comparaison avec les sorties de modèles bioclimatiques

La méthode des analogues spatiaux présente l'avantage de générer des résultats très intuitifs et faciles à communiquer. En plus de permettre d'aller observer la situation actuelle des ennemis des cultures dans les régions où le climat actuel est similaire au climat futur au Québec, la méthode des analogues spatiaux permet d'observer aussi les différentes mesures de gestion utilisées dans ces régions et qui pourraient potentiellement aider à adapter le

secteur agricole québécois. La robustesse des résultats qu'offre la modélisation bioclimatique permet toutefois de venir valider les résultats obtenus par les analogues.

La méthodologie basée sur les analogues spatiaux a donc été validée à l'aide de modèles bioclimatiques développés par Agriculture et Agroalimentaire Canada (AAC) pour deux études de cas, soit la pyrale du maïs et la fusariose de l'épi. La disponibilité d'un modèle pour la pyrale du maïs, développé sous le logiciel Centre informatique de prévisions des ravageurs en agriculture (CIPRA), nous a permis d'évaluer l'impact du climat futur sur le développement de l'insecte. En ce qui concerne la fusariose, nous avons dû établir des paramètres de risque puisqu'aucun modèle n'a, jusqu'à présent, été validé au Québec.

Le climat projeté sur trois régions (Montréal, Capitale-Nationale et Bas-Saint-Laurent) du Québec a été utilisé comme une entrée des modèles bioclimatiques pour simuler les caractéristiques futures des ennemis des cultures. Les neuf simulations climatiques (2041-2070) identifiées par Ouranos pour la détermination des analogues spatiaux ont été utilisées à cet effet. Ces résultats ont été comparés aux caractéristiques bioclimatiques actuelles des ennemis des cultures de l'analogue spatial. La comparaison a permis d'évaluer en partie la validité de l'analogue et les impacts potentiels.

4.5.1 Modélisation sur la pyrale du maïs

Dans un premier temps, nous avons utilisé les cumuls de degrés-jours afin d'évaluer la vitesse de développement et les dates d'apparition de certains stades de la pyrale du maïs, et ce, autant pour la race univoltine que bivoltine. Les cumuls de degrés-jours, accessibles dans le logiciel CIPRA, ont été extrapolés pour le climat futur afin de simuler une race univoltine passant à deux générations par année (en supposant qu'elle n'a pas de diapause obligatoire) et une race bivoltine passant à trois générations par année (Tableaux 5 et 6). Cette extrapolation a été effectuée en ajoutant une constante correspondant au cumul de degrés-jours requis pour compléter un cycle total de vie de l'insecte (ex. : 710 et 638 DJ pour les races univoltines et bivoltines, respectivement) ou pour un stade phénologique spécifique.

Une génération est considérée comme complète lorsque suite à l'émergence des œufs, la larve se développe jusqu'au cinquième stade larvaire, permettant l'hibernation dans les résidus de maïs au champ. Au printemps, elle se transformera en chrysalide et en adulte quelques semaines plus tard. Si suite à l'émergence des œufs, les larves n'atteignent pas le cinquième stade larvaire, on parle alors d'une génération partielle.

Tableau 5. Cumul de degrés-jours (en base 10 °C) nécessaires pour compléter les stades (5-50-95 %) de développement de la pyrale du maïs (race univoltine) pour des populations actuelles (une génération) et futures (2^e génération partielle et complète).

Pyrale du maïs Race univoltine		
STADES	DJ	
F1 5 % adultes	394	1 ^{re} génération
F1 50 % adultes	562	
F1 95 % adultes	735	
F1 5 % œufs	425	1 ^{re} génération
F1 50 % œufs	540	
F1 95 % œufs	678	
F2** 5 % adultes	1104	2 ^e génération partielle
F2 50 % adultes	1272	
F2 95 % adultes	1445	
F2 5 % émergence œufs	1232	2 ^e génération partielle
F2 50 % émergence œufs	1400	
F2 95 % émergence œufs	1573	
F2 5 % larves	1670	2 ^e génération complète
F2 50 % larves	1838	
F2 95 % larves	2011	

* 1^{re} génération

** 2^e génération

Tableau 6. Cumul de degrés-jours (en bas 10 °C) nécessaires pour compléter les stades (5-50-95 %) de développement de la pyrale du maïs (race bivoltine) pour des populations actuelles et futures (3^e génération partielle et complète).

Pyrale du maïs Race bivoltine		
STADES	DJ	
F1* 5 % adultes	190	1 ^{re} génération
F1 50 % adultes	281	
F1 95 % adultes	395	
F2** 5 % adultes	792	2 ^e génération
F2 50 % adultes	919	
F2 95 % adultes	1027	
F3*** 5 % adultes	1430	3 ^e génération partielle
F3 50 % adultes	1557	
F3 95 % adultes	1665	
F3 5 % émergence œufs	1561	3 ^e génération partielle
F3 50 % émergence œufs	1688	
F3 95 % émergence œufs	1796	
F3 5 % larves	1939	3 ^e génération complète
F3 50 % larves	2066	
F3 95 % larves	2174	

* 1^{re} génération

** 2^e génération

*** 3^e génération

Le modèle bioclimatique a été utilisé pour évaluer la différence entre le climat de référence (1970-1999) et le climat futur (2041-2070) établi à l'aide de neuf simulations climatiques pour les régions de la Montérégie et de la Capitale-Nationale. Les principaux objectifs étaient de i) évaluer les dates d'émergence des adultes (univoltine et bivoltine); ii) déterminer la durée de

la période d'intervention pour les traitements phytosanitaires (univoltine et bivoltine); iii) estimer la date à laquelle une génération supplémentaire pour chacune des races pourrait survenir et iv) évaluer la date de début et la durée de la période de vulnérabilité du maïs sucré à la pyrale du maïs.

- i) *Date d'arrivée des adultes.* Cette donnée s'avère importante puisqu'il s'agit du stade auquel le dépistage est réalisé pour évaluer le moment d'intervention contre cet insecte. Or, une arrivée plus hâtive devra être prise en compte pour ajuster le calendrier de dépistage.
- ii) *Durée de la période d'intervention pour les traitements phytosanitaires.* Lorsque les adultes de pyrale du maïs arrivent dans les champs de maïs sucré, la femelle pond ses œufs sur les feuilles. Les jeunes larves émergent peu après et consomment le feuillage aux alentours. Autour du deuxième stade larvaire, les larves pénètrent la tige du plant et deviennent inaccessibles aux traitements chimiques. C'est pourquoi, il est important de bien connaître l'évolution des stades de développement afin d'intervenir au moment opportun. Toutefois, avec les changements climatiques, la vitesse de développement d'un ravageur peut être accélérée considérablement et ainsi raccourcir la fenêtre d'action normalement disponible pour un traitement phytosanitaire. Nous avons donc comparé la durée de la période d'intervention entre le climat présent et le climat futur. N'ayant pas accès aux cumuls de degrés-jours pour le deuxième stade larvaire (moment où la larve pénètre la plante et devient inaccessible) nous avons dû nous contenter d'utiliser l'intervalle entre le moment de la ponte de l'œuf et de l'émergence de la larve de premier stade.
- iii) *Possibilité d'une génération supplémentaire.* Afin de valider les résultats obtenus à l'aide des analogues spatiaux, nous avons utilisé un modèle bioclimatique pour simuler l'apparition d'une deuxième génération pour la race univoltine et d'une troisième génération pour la race bivoltine. Cette extrapolation s'est basée sur les temps de développement obtenus au laboratoire pour chacun des stades larvaires. Ainsi, puisque le temps de développement total de pyrale du maïs univoltine est de 710 degrés-jours (base 10 °C) (Bourgeois, *données non publiées*), nous avons additionné ce chiffre au nombre de degrés-jours nécessaires pour atteindre le stade adulte de la première génération (Tableau 5). Nous avons procédé de la même manière pour la race bivoltine, mais en utilisant un temps total de développement de 638 degrés-jours (base 10 °C).
- iv) *Période de vulnérabilité du maïs sucré à la pyrale du maïs.* La culture du maïs sucré est vulnérable à partir du stade six feuilles jusqu'à sa récolte. Pour toutes les analyses réalisées plus haut, nous avons utilisé une date de semis variable selon le climat. Ainsi, avec les changements climatiques, les dates de semis seraient devancées étant donné l'arrivée hâtive d'un climat propice. Le calcul servant à mesurer la date de semis est le même que celui pour calculer les unités thermiques maïs (UTM). Nous avons volontairement arrêté la période de vulnérabilité au 15 septembre, date à laquelle la demande sur le marché pour le maïs sucré frais tombe.

4.5.2. Modélisation sur la fusariose de l'épi

4.5.2.1. Modèles prévisionnels de la fusariose de l'épi

Dans le cadre de la revue de littérature sur les modèles prévisionnels disponibles pour la fusariose de l'épi, une dizaine de modèles ou approches ont été répertoriés. À titre indicatif, cinq modèles prévisionnels sont déjà implantés (Hooker *et coll.*, 2002; De Wolf *et coll.*, 2003; Rossi *et coll.*, 2003) et deux autres seront implantés (Moschini *et coll.*, 2001; Molineros, 2007) au cours de l'automne 2012 dans le logiciel CIPRA. Ce logiciel a été développé par l'équipe de recherche en bioclimatologie et modélisation d'Agriculture et Agroalimentaire Canada à

Saint-Jean-sur-Richelieu, QC. En plus des modèles prévisionnels, d'autres approches visent à identifier les paramètres météorologiques associés au développement de la maladie sans toutefois fournir un indice de risque de la maladie (Detrixhe *et coll.*, 2003; Madgwick *et coll.*, 2011).

L'ensemble des modèles indique que la période critique d'infection par les agents pathogènes associés à cette maladie se retrouve entre sept jours avant et dix jours après la période d'anthèse du blé (stades Zadoks 61 à 69), période où cette culture est particulièrement sensible à cette maladie. Certains modèles fournissent aussi une indication des risques de développement des mycotoxines dans les grains de blé à la suite de l'infection de ceux-ci par la maladie (Hooker *et coll.*, 2002; Rossi *et coll.*, 2003; Schaafsma et Hooker, 2007).

Une des limites associées à l'utilisation de plusieurs de ces modèles dans le cadre d'études sur les changements climatiques est le besoin en données météorologiques sur une échelle de temps horaire, comme la mouillure du feuillage et l'humidité relative de l'air. En général, seules les données météorologiques quotidiennes (températures maximum et minimum de l'air, précipitations) sont disponibles pour le passé récent (1971-2000) ou le futur proche (2041-2070). En conséquence, nous avons choisi d'analyser les paramètres météorologiques associés au développement de la fusariose durant 4 périodes phénologiques de la culture, soit la pré-anthèse (stades Zadoks 41 à 59) qui est associée à la maturation des spores ou la dispersion de la maladie, l'anthèse (stades Zadoks 61 à 69) où la culture est très sensible à l'infection par l'agent pathogène, la post-anthèse (stades Zadoks 71-85) qui est associée au développement des mycotoxines dans le grain et la pré-récolte (stades Zadoks 85 à 89) où des risques de développement des mycotoxines seraient aussi identifiés (Tableau 7).

4.5.2.2. Modélisation de la phénologie du blé

Dans le futur, avec la possibilité que les semis soient effectués plus tôt au printemps et que la culture risque de se développer plus rapidement, l'utilisation des stades phénologiques de la culture est plus appropriée que l'utilisation de jours de l'année ou de jours après le semis. La date de semis du blé a donc été déterminée en fonction du début de la saison de croissance tel qu'établi dans l'Atlas agroclimatique du Québec, soit la première journée d'une séquence de 5 jours consécutifs où les températures moyennes pondérées sont au-dessus de 5,5 °C. Pour chacune des périodes climatiques, soit le passé récent et le futur proche, la date médiane du début de la saison de croissance a été déterminée. Ensuite, cette date médiane a été utilisée pour commencer la recherche de la date de semis pour chacune des années en utilisant la même approche de températures moyennes pondérées. Ainsi, une date de semis a été obtenue pour chacune des 30 années de chaque période climatique.

À partir de chaque date de semis, l'approche des cumuls thermiques exprimés en degrés-jours a été utilisée pour déterminer le début et la fin des périodes phénologiques identifiées précédemment. Pour la phénologie du blé, une température de base de 0 °C, une température optimale de 25 °C et la méthode de calcul « Sinus simple » ont été utilisées pour calculer les degrés-jours. Par rapport à l'approche standard de calcul des degrés-jours, la méthode « Sinus simple » permet une meilleure représentation de l'énergie thermique réellement emmagasinée par les insectes, surtout au printemps et à l'automne lorsque la température de base (p. ex. : 10 °C) est inférieure à la température maximale de l'air, mais supérieure à la température inférieure de l'air. Les seuils de degrés-jours pour atteindre chaque stade phénologique sont présentés dans le Tableau 7. Les dates de début et de fin, ainsi que la durée de chaque période phénologique ont été générées pour les analyses d'impact des changements climatiques.

Tableau 7. Stades Zadocks, paramètres climatiques et processus biologiques associés aux différentes périodes de développement du blé.

Périodes	Stades Zadoks (DJ ₀)	Paramètres climatiques	Processus biologique associé
Pré-anthèse	41 à 59 (760 à 910)	# jours où T _{min} < 10 °C	Maturation des spores ou dispersion
		# jours où T _{max} > 32 °C	
		# jours avec précipitations > 5 mm	
Anthèse	61 à 69 (930 à 1030)	# jours où T _{min} < 10 °C	Sensibilité à l'infection
		# jours où T _{max} > 32 °C	
		# jours avec précipitations > 3 mm	
Post-anthèse	71-85 (1050 à 1360)	# jours où T _{max} > 32 °C	Développement de mycotoxines
Pré-récolte	85-89 (1360 à 1540)	# jours avec précipitations > 3 mm	Risque post-récolte

4.5.2.3. Paramètres climatiques associés aux risques de fusariose

Pour chaque période phénologique, les paramètres climatiques sélectionnés et leurs seuils pour les analyses d'impact des changements climatiques sont détaillés dans le Tableau 7. Pendant les périodes phénologiques de pré-anthèse et d'anthèse, les nombres de jours où les températures sont moins favorables et les précipitations sont favorables à la maturation, la dispersion ou l'infection de la maladie sont les paramètres considérés. Pour la période phénologique de post-anthèse, seulement le nombre de jours où la température est trop chaude pour le développement des mycotoxines est considéré. Finalement, pour la période phénologie de pré-récolte, le nombre de jours de précipitations serait le paramètre associé à des risques de développement de mycotoxines sur les grains en post-récolte.

4.6 Analyser les vulnérabilités aux changements climatiques du secteur de la phytoprotection au Québec

Au cours de ce volet nous évaluerons les vulnérabilités du secteur agricole en nous attardant, dans un premier temps, sur la pression des ennemis des cultures ciblés par le projet à laquelle des producteurs font et devront faire face, ainsi qu'à leur capacité à gérer les problèmes phytosanitaires actuels et futurs. Dans un second temps, nous avons consulté les organisations chargées d'apporter un soutien aux producteurs dans le secteur de la phytoprotection (organismes de R&D, institutions, organismes de transfert technologique, regroupements de conseillers agricoles, syndicat agricole) afin d'évaluer qualitativement et de prioriser les principaux enjeux. Ces ateliers de consultation ont également constitué une opportunité pour discuter des mesures d'adaptation possibles avec les participants afin d'amorcer l'élaboration d'une stratégie d'adaptation aux changements climatiques dans le secteur de la phytoprotection.

4.6.1 Analyse des vulnérabilités des producteurs par le biais d'entrevues

Les entrevues ont été réalisées auprès de producteurs lors d'une rencontre en face à face directement à la ferme. Le choix des producteurs a été réalisé grâce à la collaboration de Stéphanie Mathieu, agronome au MAPAQ, et visait à cibler des producteurs déjà sensibilisés

aux changements climatiques et qui pourraient suggérer des pistes de réflexion. La région de la Montérégie a été ciblée ainsi que deux études de cas (pyrale du maïs et fusariose de l'épi) afin de mieux concentrer nos efforts.

Maïs sucré

Au total, six entretiens avec des producteurs de maïs sucré ont été réalisés dans la région de la Montérégie (Ouest et Est) à l'hiver 2011-2012. Les personnes ciblées possédaient beaucoup d'expérience dans la culture du maïs sucré (en moyenne 24 années d'expérience). Il n'y a pas eu d'entretien avec des conseillers puisqu'il était trop difficile au moment des entrevues de trouver des conseillers, travaillant avec des producteurs de maïs sucré, intéressés à répondre aux questionnaires.

Blé

Au total, huit entretiens avec des producteurs de blé ainsi que quatre avec des conseillers agricoles spécialisés dans cette culture ont été réalisés dans la région de la Montérégie (Ouest et Est) à l'hiver 2011-2012. Les personnes ciblées possédaient beaucoup d'expérience dans la culture du blé (en moyenne 25 années pour les producteurs et 13 années pour les conseillers).

Un guide d'entretien semi-directif comportant 3 grandes sections a été préparé :

PARTIE 1 – Description des problèmes phytosanitaires et de leurs liens avec le climat

PARTIE 2 – Impact des changements climatiques

PARTIE 3 – Mesures de gestion dans les régions analogues

Le déroulement des entrevues et les questions spécifiques posées aux producteurs et aux conseillers sont détaillés à l'Annexe 3.

4.6.2 Analyse et priorisation des vulnérabilités et des mesures d'adaptation par les intervenants en phytoprotection durant des ateliers de consultation

Les objectifs de ces ateliers sont de présenter les résultats de l'analyse des vulnérabilités réalisée auprès des producteurs et d'évaluer qualitativement et prioriser les principaux risques (technique du groupe nominal). Ils sont aussi une occasion de discuter des options d'adaptation possibles et de poursuivre le réseautage déjà entrepris lors d'un premier atelier de consultation réalisé au printemps 2009.

Deux ateliers de consultation ont été organisés. Un premier atelier a été organisé avec l'ensemble des collaborateurs et des membres du comité de suivi du projet. En plus de permettre de recueillir l'avis d'un panel d'experts multidisciplinaires, cet atelier a permis de tester la formule qui a été utilisée lors de la tenue du second atelier. Ce dernier impliquait des représentants d'organisations chargées 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, syndicat agricole). La méthode de consultation s'est déroulée selon la technique du groupe nominal.

Un résumé du déroulement ainsi que la liste des questions posées aux participants lors des ateliers se retrouve en Annexe 3.

4.7 Identifier et documenter les options d'adaptation disponibles

Après avoir déterminé les analogues spatiaux, nous avons évalué quels étaient les connaissances et les différents outils disponibles actuellement dans ces régions et qui pourraient constituer des outils d'adaptation sous les conditions anticipées. Pour ce faire, pour chacun des ennemis étudiés, nous avons i) réalisé une revue complète de la littérature afin de colliger toutes les informations pertinentes; et ii) contacté les experts (chercheurs et spécialistes – extension) des régions analogues. Par ailleurs, lors de la rencontre des principaux intervenants en phytoprotection (étape 4.6), nous avons sollicité leur expertise pour déterminer la liste des mesures d'adaptation à adopter en vue des changements climatiques ainsi que prioriser celles qui étaient les plus pertinentes pour le Québec.

4.8. Formuler des recommandations pertinentes pour élaborer une stratégie d'adaptation aux CC

Pour chaque étude de cas, les étapes précédentes ont permis d'identifier plus précisément les risques phytosanitaires associés à un système de culture spécifique dans une région. Ainsi, pour les insectes, mauvaises herbes ou organismes phytopathogènes associés à ces conditions de cultures, nous avons pu dresser une liste de recommandations propre à chaque espèce. En sachant à l'avance les risques inhérents à plusieurs ennemis, dans plusieurs cultures sous diverses conditions, il deviendra possible de développer des scénarios d'adaptation qui seront basés non seulement sur un ajustement des programmes phytosanitaires (p. ex. : dépistage plus hâtif d'un ennemi qui arrivera plus tôt en saison, recours à plus d'une méthode de lutte, utilisation de méthodes de lutte alternatives pour parer à une augmentation anticipée de la lutte chimique, etc.), mais également basés sur des ajustements au niveau des systèmes de culture en tant que tel. Une entrevue avec le directeur de la phytoprotection du MAPAQ, Michel Lacroix, a d'ailleurs permis de mettre en relation les vulnérabilités et mesures d'adaptation qui ressortent de la présente étude et la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021 (<http://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/md/Publications/Pages/Details-Publication.aspx?quid=%7Bef205915-94c8-487f-9abf-42fa84b1a0f7%7D>), afin d'établir des recommandations qui pourront éventuellement s'intégrer à cette stratégie.

4.9. Informer et sensibiliser les principaux acteurs intervenant dans les prises de décision pour lutter contre les ennemis des cultures afin de diminuer leur vulnérabilité aux CC et accroître leur capacité d'adaptation.

Cette dernière étape a été assurée par les chargées de projet lors de réunions/colloques/journées d'informations, provinciales et régionales et par la préparation et la publication de trois feuillets techniques qui seront disponibles via le site Agri-Réseau du Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ).

5. Résultats

Les résultats de l'étude sur les impacts des CC en phytoprotection sont présentés pour différents ennemis des cultures. Il y avait au départ cinq ennemis à l'étude soit la pyrale du maïs (*O. nubilalis*), la fusariose de l'épi (*F. graminearum*), le doryphore de la pomme de terre (*L. decemlineata*), la petite herbe à poux (*A. artimisiifolia*) et la punaise terne (*L. lineolaris*). Les études de cas sur la petite herbe à poux et la punaise terne n'ayant pas été complétées par manque de temps, les résultats pour ces ennemis des cultures se limitent à la présentation des régions administratives ciblées pour les deux études et les régions analogues correspondantes lorsqu'elles ont été déterminées. Les résultats concernant ces deux études de cas sont présentés en Annexe 4.

Pour les études complétées, soient celles sur la pyrale du maïs, la fusariose de l'épi et le doryphore de la pomme de terre, la situation actuelle au Québec pour chaque ennemi est d'abord présentée et à partir des régions administratives ciblées (voir section 4.1), des analogues spatiaux ont été identifiés en fonction des modifications attendues du climat. À la suite à l'observation de la situation actuelle de l'ennemi et des méthodes de contrôles utilisés dans ces régions analogues, les résultats ont été extrapolés au Québec, afin de prévoir l'impact des CC sur les ennemis des cultures pour l'horizon 2050. Pour la pyrale du maïs et la fusariose de l'épi, une modélisation bioclimatique permet de valider les résultats obtenus avec les analogues et même d'aller au-delà de la validation en générant des prévisions additionnelles sur la phénologie de ces organismes. La modélisation n'a pas été effectuée pour le doryphore de la pomme de terre puisqu'il n'y avait pas de modèles développés pour cette espèce. Ces différentes études de cas ont permis de cibler différents besoins et avenues de recherche dans le domaine des changements climatiques et de la phytoprotection. Le tableau suivant résume ce qui a été fait ou non pour chacune des études de cas présentées.

Tableau 8. Synthèse des résultats disponibles pour chaque espèce étudiée.

Espèces étudiées	Construction de scénarios climatiques et cartes des analogues spatiaux	Analyse des impacts des CC avec les analogues	Modélisation bioclimatique
Pyrale du maïs	✓	✓	✓
Fusariose de l'épi	✓	✓	✓
Doryphore de la pomme de terre	✓	✓	
Petite herbe à poux	✓		
Punaise terne	✓		

5.1. Les modifications attendues du climat

Le climat des régions administratives choisies a été projeté pour l'horizon 2041-2070 selon la méthodologie décrite dans la section 4.3. Les résultats présentés au Tableau 9 représentent la différence (25^e et 75^e percentile) entre le climat futur et le climat de référence pour ces régions (1970-1999). Tous les détails concernant les différentes caractéristiques des simulations climatiques utilisées se retrouvent la section 4.3.

Les changements climatiques au niveau de la température sont sensiblement les mêmes entre les cinq régions ciblées (une hausse variant entre 2,1 et 2,7 °C pour la saison estivale). Les changements de patrons de précipitations ne devraient pas se faire ressentir pour les mois de l'été dans la plupart des régions, mais les cumuls risquent d'augmenter légèrement (+3,7 % à 12,9 %) pour la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Toutefois, une augmentation des précipitations serait probable dans le futur pour la période printanière (mars-avril-mai) avec des augmentations de l'ordre de 5 à 21 %. La longueur de la saison de croissance serait également devancée au printemps et retardée à l'automne dans le futur pour fournir au total 15 à 31 jours supplémentaires.

Tableau 9. Différences climatiques entre la période de référence (1970-1999) et la période future (2041-2070) pour les régions administratives ciblées

	Montérégie	Capitale-Nationale	Bas-Saint-Laurent	Lanaudière
Température estivale (Juin-Juillet-Août)	+2,3 à +2,7 °C	+2,2 à +2,5 °C	+ 2,1 à +2,5 °C	+2,3 à +2,6 °C
Cumul des précipitations estivales	-4,3 à +7,5 %	+1,8 à +4,3 %	+ 3,9 à 7,2 %	+0,1 à +5,5 %
Cumul des précipitations printanières (Mars-Avril-Mai)	+9,3 à +19,0 %	+6,6 à +19,5 %	+ 5,4 à +17,9 %	+ 11,9 à +20,5 %
Longueur de la saison de croissance	+ 18,6 à 26,6 jours	+ 21,8 à 30,6 jours	+ 14,9 à 25,5 jours	+ 22,3 à 27,9 jours

5.2. Les régions analogues

Les analogues spatiaux ont été utilisés dans le but de visualiser plus concrètement le climat futur en le comparant à une région possédant présentement ces mêmes paramètres climatiques. Cette technique permet de comparer la problématique en phytoprotection et de faire des parallèles sur ce à quoi nous pourrions nous attendre au Québec. En observant la biologie de l'ennemi dans la zone analogue et en répertoriant les méthodes de contrôle utilisées, nous pouvons mieux préparer les stratégies d'intervention en phytoprotection en identifiant les besoins et les améliorations à apporter.

Les régions administratives ciblées pour les différentes études sont présentées à la section 4.1. La méthodologie associée à la recherche des analogues spatiaux se retrouve à la section 4.3. Les paramètres utilisés pour trouver statistiquement des régions semblables étaient le cumul de degrés-jours (base 5 °C), le cumul de précipitations ainsi que la longueur de la saison de croissance.

5.2.1. Pyrale du maïs

5.2.1.1. Montérégie

Selon les modèles climatiques, le climat de la Montérégie à l'horizon 2041-2070 sera similaire à ceux des États de l'Iowa, de l'Illinois, de l'Indiana, de l'Ohio et de la Pennsylvanie (Figure 2). Il est à noter que la Montérégie est aussi la région sélectionnée pour l'étude de la fusariose de l'épi. Les régions analogues choisies diffèrent toutefois en fonction de l'ennemi étudié.

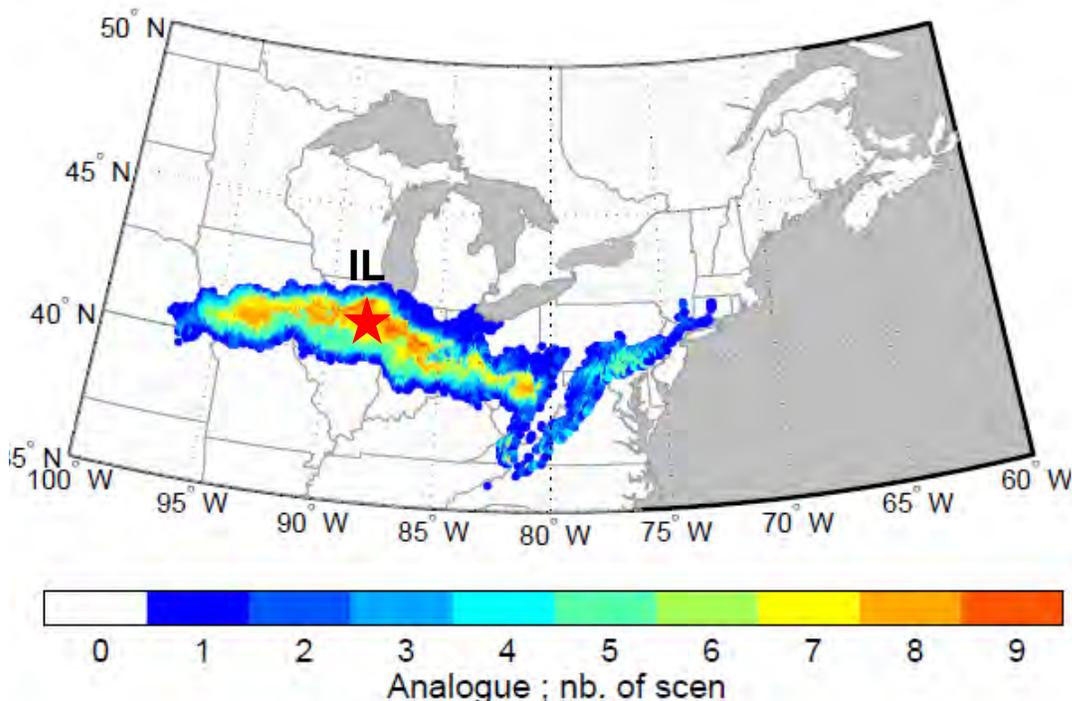


Figure 2. Nombre de scénarios climatiques identifiant la région comme analogue au climat futur projeté (2041-2070) de la région de la Montérégie.

Parmi les régions analogues identifiées (Iowa, Illinois, Indiana, Ohio et Pennsylvanie) la culture du maïs sucré est plus importante (en superficie) pour l'Illinois. Néanmoins, les superficies cultivées sont beaucoup moins importantes qu'au Québec (Tableau 10). Dans cet État, on y cultive environ 3 227 ha de maïs sucré, alors qu'au Québec, la superficie représente environ 7 640 ha.

Tableau 10. Superficie moyenne cultivée en maïs sucré dans les régions analogues à la Montérégie (Source : USDA-NASS)

États analogues	Superficies en maïs sucré (ha)
Iowa	69
Illinois	3 227
Indiana	36
Ohio	227
Pennsylvanie	488
Quebec	7 640

5.2.1.2. Capitale Nationale

Selon les modèles climatiques, le climat de la région de la Capitale-Nationale à l'horizon 2050 sera similaire à ceux des États de l'Iowa, de la Virginie-Occidentale, de la Pennsylvanie, du Massachusetts, du Connecticut et de New York (Figure 3).

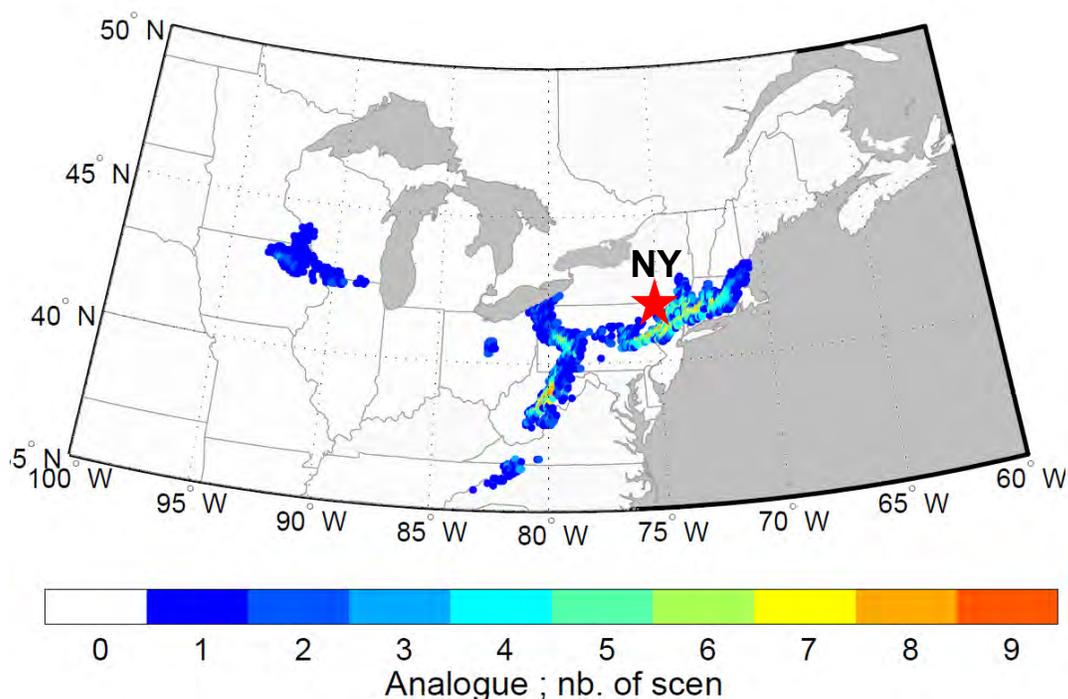


Figure 3. Nombre de scénarios climatiques identifiant la région comme analogue au climat futur projeté (2041-2070) de la région de la Capitale-Nationale.

De toutes les régions identifiées, New York est de loin la région où on y cultive le plus de maïs sucré avec un peu plus de 9 000 ha (Tableau 11). L'analogie spatiale de la Capitale-Nationale considéré lors de cette étude sera donc l'État de New York.

Tableau 11. Superficie moyenne cultivée en maïs sucré dans les régions analogues à la Capitale-Nationale (Source : USDA-NASS)

États analogues	Superficies en maïs (ha)
Virginie-Occidentale	32
Iowa	69
Pennsylvanie	488
Massachusetts	1 927
Connecticut	1 341
New York	9 286
Québec	7 640

5.2.2. La fusariose de l'épi

5.2.2.1. Montérégie

Les régions analogues pour la Montérégie sont présentées à la Figure 2. Parmi les régions analogues identifiées (Iowa, Illinois, Indiana, Ohio et Pennsylvanie) la culture du blé est plus importante (en superficie) pour les régions de l'**Illinois** et de l'**Ohio** (Tableau 12). Ces deux États seront donc retenus pour cette étude.

Tableau 12. Superficie moyenne (2006-2010) cultivée en blé dans les régions analogues à la Montérégie. (Source: USDA-NASS)

États analogues	Superficies en blé (ha)
Iowa	11 943
Illinois	360 804
Indiana	146 727
Ohio	296 273
Pennsylvanie	61 726
Québec	49 725

5.2.2.2. Bas-Saint-Laurent

Selon les modèles climatiques, le climat du Bas-Saint-Laurent à l'horizon 2041-2070 sera principalement similaire aux États du Wisconsin, de la Pennsylvanie, de New York, du Maine, du Vermont et du New Hampshire, ainsi que les régions québécoises du Centre-du-Québec et de la Mauricie (Figure 4).

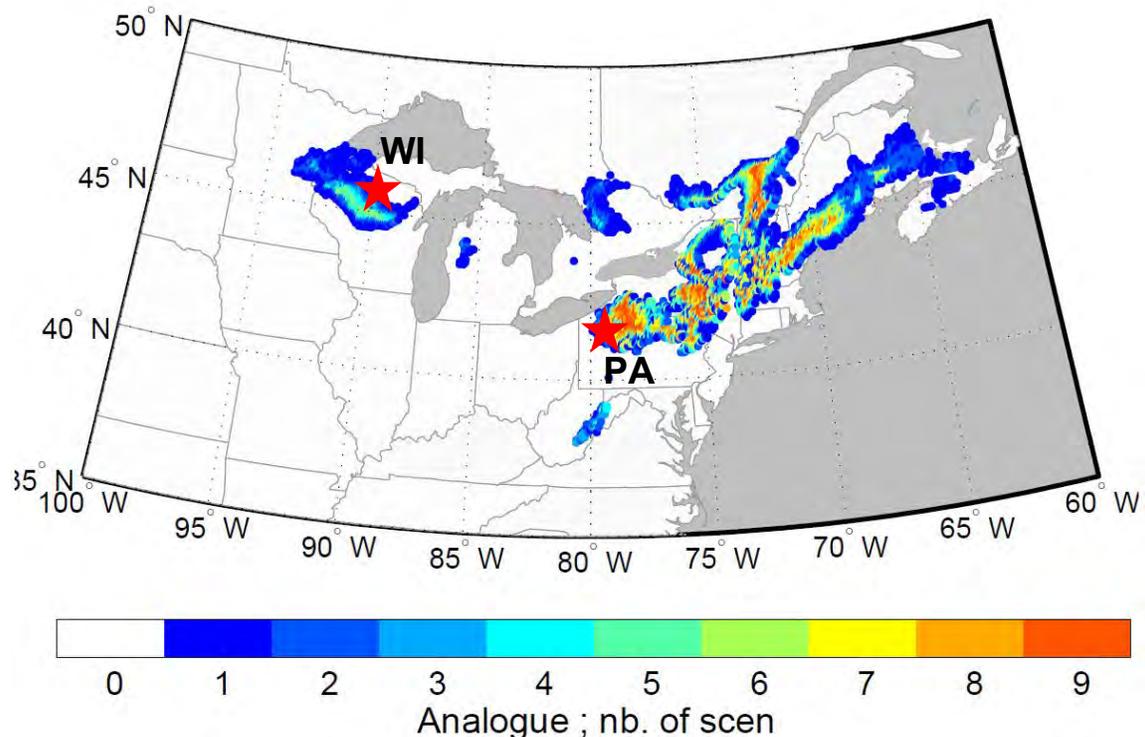


Figure 4. Nombre de scénarios climatiques identifiant la région comme analogue au climat futur projeté (2041-2070) de la région du Bas-Saint-Laurent.

Parmi les régions analogues identifiées (Wisconsin, Pennsylvanie, New York, Maine, Vermont, New Hampshire, Centre-du-Québec et Mauricie) la culture du blé est plus importante (en superficie) pour les régions du **Wisconsin** et de la **Pennsylvanie** (Tableau 13).

Tableau 13. Superficie moyenne (2006-2010) cultivée en blé dans les régions analogues au Bas-Saint-Laurent. (Source : USDA-NASS)

États analogues	Superficies en blé (ha)
Wisconsin	113 500
Pennsylvanie	61 726
New York	34 380
Maine	207
New Hampshire	0
Vermont	0
Qc - Mauricie	3 390
Qc - Centre-du-Québec	4 961
Québec	49 725

5.2.3. Le doryphore de la pomme de terre

5.2.3.1. Capitale-Nationale

Les régions analogues pour la Capitale-Nationale sont présentées à la Figure 3. Puisque l'État de New York représente la région où l'on retrouve la plus grande superficie cultivée en pomme de terre (Tableau 14), nous l'utiliserons comme analogue spatial à la Capitale-Nationale.

Tableau 14. Superficie moyenne cultivée en pommes de terre dans les régions analogues à la Capitale-Nationale (Source : USDA-NASS)

États analogues	Superficie en pomme de terre (ha)
Virginie-Occidentale	1
Pennsylvanie	1 002
Massachusetts	2 969
Connecticut	947
New York	5 682
Québec	17 280

5.2.3.2. Lanaudière

Selon les modèles climatiques, le climat de la région de Lanaudière à l'horizon 2050 sera similaire à ceux des États du Wisconsin, de l'Iowa, de l'Ohio, de la Pennsylvanie, du Massachusetts, du Connecticut et de New York (Figure 5).

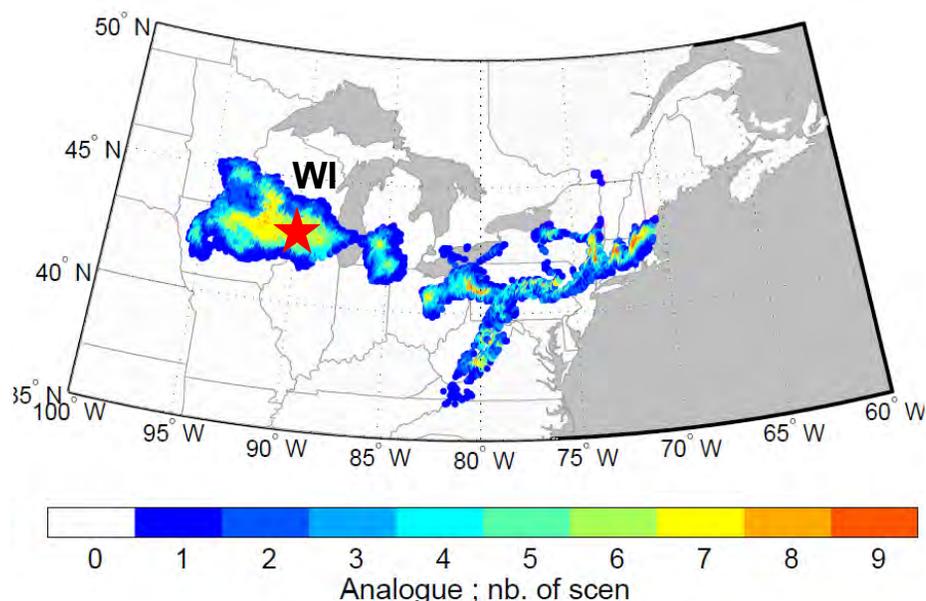


Figure 5. Nombre de scénarios climatiques identifiant la région comme analogue au climat futur projeté (2041-2070) de la région de Lanaudière.

Puisque l'état du Wisconsin représente la région où l'on retrouve la plus grande superficie cultivée en pomme de terre (Tableau 15), nous l'utiliserons comme analogue spatial à la région de Lanaudière.

Tableau 15. Superficie moyenne cultivée en pommes de terre dans les régions analogues à la Lanaudière (Source : USDA-NASS)

États analogues	Superficie en pomme de terre (ha)
*Wisconsin	20 773
Iowa	104
Massachusetts	2 969
Ohio	178
Pennsylvanie	1 002
Connecticut	947
New York	5 682
Québec	17 280

5.2.4. Résumé des régions analogues

Le tableau 16 présente un résumé des différentes régions analogues sélectionnées en fonction de l'ennemi étudié. Il est à noter que certaines régions analogues choisies au final couvrent plus d'une zone bioclimatique alors que les zones du Québec sont relativement

homogènes. Au cours de l'analyse de la situation actuelle dans les régions analogues, il était difficile d'aller chercher de l'information plus précise pour certains endroits, ce qui a emmené les auteurs à étendre les zones des régions analogues afin de pouvoir faire un portrait plus adéquat de la situation de l'ennemi.

Tableau 16. Résumé des différentes régions analogues pour les cinq ennemis des cultures étudiés.

Étude de cas	Régions administratives	Régions analogues
Pyrale du maïs	Montérégie	Illinois
	Capitale-Nationale	New York
Fusariose de l'épi	Montérégie	Illinois / Ohio
	Bas-Saint-Laurent	Wisconsin / Pennsylvanie
Doryphore de la pomme de terre	Capitale-Nationale	New York
	Lanaudière	Wisconsin

5.3. Situation de l'ennemi dans les régions analogues

5.3.1. Pyrale du maïs

5.3.1.1. La culture du maïs sucré aux États-Unis

La culture du maïs sucré aux États-Unis représente environ 280 000 ha, et de ce chiffre, la moitié est cultivée dans les régions du nord central des États-Unis. Les plus grandes superficies se trouvent au sud du Minnesota et du Wisconsin jusqu'au nord de l'Illinois et de l'Ohio. La culture du maïs sucré est considérée à haut revenu où près de 20 % des superficies cultivées sont irriguées pour assurer un meilleur rendement. Pour le marché frais, la superficie cultivée moyenne par producteur varie entre 1 et 15 ha avec quelques exceptions dépassant les 40 ha.

La date de plantation du maïs sucré s'étend sur une longue période pour répondre à la demande des consommateurs tout au long de l'été. Ainsi, les producteurs peuvent planter les premiers cultivars une à deux semaines après la date du dernier gel de la région jusqu'à la première semaine de juillet. La production de maïs sucré biologique est marginale aux États-Unis représentant moins de 5 % de la production conventionnelle. Chez ces producteurs, les méthodes de lutte sont l'utilisation d'agents de lutte biologique (46 %), l'utilisation d'hybrides résistants, modifiés génétiquement ou non (80 %), la gestion de l'eau (33 %) et l'ajustement de la date de plantation (56 %).

Le contrôle des insectes et des agents pathogènes dans la culture du maïs sucré est très important pour le marché frais. La pyrale du maïs et le ver de l'épi du maïs sont les deux ravageurs les plus couramment rencontrés aux États-Unis. Des deux, la pyrale du maïs est probablement l'insecte le plus problématique puisqu'environ 90 % des champs sont infestés par une à trois larves ou plus par plant. Les champs semés plus tard en saison présentent typiquement des infestations plus sévères et peuvent nécessiter des traitements insecticides supplémentaires. Les exigences des consommateurs obligent les producteurs à utiliser une grande quantité d'insecticides (2 Kg/ha, principalement dans la classe des pyréthroides synthétiques) pour assurer une bonne qualité des épis. Afin de réduire les quantités de pesticides utilisées au champ, le dépistage est réalisé dans plus de 85 % des superficies. Les

pièges lumineux sont également utilisés pour connaître les dates d'émergence des adultes ainsi que les densités de population.

5.3.1.2. Illinois

Impacts sur la pyrale du maïs

Arrivée depuis 1939, la pyrale du maïs représente un des principaux ravageurs du maïs sucré dans l'État de l'Illinois. Elle attaque également la pomme de terre, le poivron et le haricot vert. Dans cette région, on dénombre entre deux et trois générations par année, la race univoltine étant inexistante. Les dommages causés par la pyrale du maïs dépendent grandement du stade de croissance du maïs sucré. Les plantations plus tardives sont généralement plus touchées par la pyrale du maïs et nécessitent plus d'interventions insecticides. Par ailleurs, les populations de ce ravageur varient d'une année à l'autre, mais il semblerait que depuis l'utilisation répandue du maïs-grain Bt, les populations de pyrale du maïs aient chuté significativement dans cet État et aux alentours (Figure 6) (Hutchinson *et coll.*, 2010). Néanmoins, la pyrale du maïs demeure toujours l'ennemi numéro un du maïs sucré dans cet État.

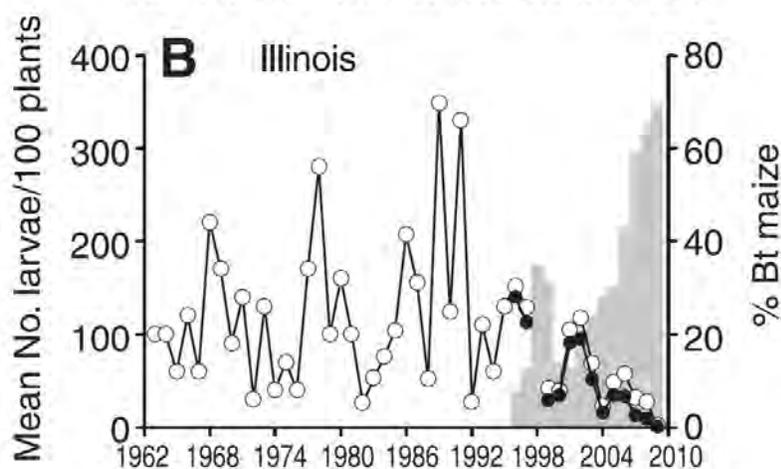


Figure 6. Nombre moyen de larves de pyrale du maïs par 100 plants et pourcentage d'utilisation des cultivars Bt dans le maïs grain pour la période entre 1962-2010 en Illinois. La courbe avec les cercles blancs représente la moyenne de larves de pyrale par 100 plants de maïs et la courbe avec les cercles noirs représente le pourcentage d'utilisation de maïs-grain Bt en Illinois (Hutchinson *et coll.*, 2010).

La vitesse de développement de la pyrale du maïs (race bivoltine) en Illinois est légèrement plus rapide que celle observée au Québec (Tableau 17). En observant le nombre de degrés-jours nécessaire pour compléter les stades de développement, nous pouvons constater que la race de l'Illinois se développe entre 71 et 22 % plus rapidement que la race provenant du Québec.

Tableau 17. Comparaison du développement de la première et deuxième génération (race bivoltine) de la pyrale du maïs au Québec et en Illinois, selon le cumul de degrés-jours (base 10 °C). (Source: Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2012)

STADES DE DÉVELOPPEMENT	Québec	Illinois	Ratio
F1 adultes	281	.	.
F1 émergence larves L1	412	118	0.7141
F1 Larves L5	790	440	0.4430
F2 adultes	919	.	.
F2 émergence des œufs	1050	780	0.2571
F2 larves L5	1428	1102	0.2281

Impacts sur les méthodes de contrôle

Certains cultivars de maïs hybrides résistants à la première génération de pyrale ou tolérants aux dommages causés par les larves ont été développés, mais sont maintenant remplacés par des cultivars à haut rendement (maïs plus sensibles aux ravageurs). Depuis les années 90, les cultivars transgéniques Bt de maïs sucré sont maintenant disponibles. Ces cultivars produisent une toxine, la *Cry1ab*, provenant de la bactérie *Bacillus thuringiensis* (Bt). En causant une paralysie intestinale chez la pyrale qui consomme le maïs Bt, cette toxine confère une résistance face à cet ennemi.

Toutefois, l'utilisation de ces cultivars transgéniques ne prévient pas complètement le développement de la pyrale du maïs. Dans ce cas, en Illinois, on recommande des traitements insecticides lorsque le maïs se trouve à un stade végétatif avancé et qu'il y a présence de dommages par les larves de pyrale dans plus de 15 % des plants. Également, si les captures d'adultes dépassent les 50 papillons par trappe en une nuit et que le maïs se situe entre les stades d'émergence de la panicule et de la maturité, il est recommandé de traiter à intervalles de 5 à 7 jours.

Les pratiques culturales telles le déchiquetage des débris de culture ou l'enfouissement à l'automne peuvent diminuer la survie hivernale de la pyrale du maïs, mais puisque les adultes peuvent se déplacer sur une longue distance (jusqu'à 800 km pour toute la durée de leur vie), cette pratique n'est pas recommandée.

5.3.1.3. New York

Impacts sur la pyrale du maïs

La culture du maïs sucré est une des cultures légumières les plus importantes produites dans l'État de New York (quatrième rang). La plantation se déroule habituellement entre le début avril jusqu'au début juillet. Environ 24 % des récoltes est destiné au marché frais, et le restant vers le marché de la transformation. La pyrale du maïs est le ravageur le plus important de cette région, pouvant causer des pertes totales dans le marché frais (100 % de pertes si les dommages représentent 10 à 15 % des épis). La pression du ravageur varie d'une année à l'autre et d'une région à l'autre (Niagara County et Long Island ont toujours des populations plus élevées). Les deux races sont présentes, soit la bivoltine dans les régions plus au sud et l'univoltine dans les régions plus au nord. Le vol des premiers adultes de la race bivoltine peut être aperçu entre la mi-mai et mi-juin, alors que le deuxième vol arrive habituellement entre la fin-juillet et fin-août. Certaines années, lorsque les étés sont chauds, une troisième génération peut se développer. Les pics de vols d'adultes pour la génération univoltine s'aperçoivent quant à eux à la mi-juillet.

Impacts sur les méthodes de contrôle

Les pratiques culturales utilisées sont l'enfouissement ou la destruction des débris de culture ainsi qu'une bonne sélection des cultivars (les cultivars à maturité précoce seraient plus susceptibles à la pyrale du maïs). Cependant, la plupart des producteurs utilisent les insecticides pour contrôler la pyrale du maïs (Tableau 18). On recommande toutefois d'effectuer le dépistage une fois par semaine, ou plus si la température dépasse les 27 °C afin de faire une utilisation plus raisonnée des insecticides. Une faible proportion de producteurs utilise la lutte biologique avec le relâchement de trichogrammes. Certains producteurs se sont tournés vers la technologie Bt, mais cette dernière n'est produite actuellement que pour le marché de transformation (Seaman, *comm. pers.*).

Tableau 18. Principaux insecticides utilisés dans l'état de New York (Source: Cornell University)

Rang	Nom de l'insecticide	Famille chimique	% utilisé (F = Marché frais et T= Transformation)
1	Lambda-cyhalothrin (Warrior)	Pyréthroïdes synthétiques	78 % T ; 75 % F
2	Thiodicarb (Larvin)	Carbamate	0 % T ; 30 % F
3	Methyl parathion (PennCap-M)	Organophosphaté	0 % T ; 23 % F

De nombreux projets de recherche sont en cours pour le développement de nouveaux insecticides sécuritaires (Spinosad, *Beauveria bassiana* et applications de Bt), l'optimisation de la lutte biologique avec *Trichogramma ostrinae* ainsi que le développement de plants résistants.

5.3.2. Fusariose de l'épi

5.3.2.1. La culture du blé aux États-Unis

Le blé représente la troisième culture en importance aux États-Unis. Toutefois, le type de blé cultivé dans ces régions peut différer largement de ce qui est cultivé au Québec. Le blé de printemps (un blé tendre vitreux) est principalement cultivé dans les États du Dakota du Nord, du Minnesota, du Montana et du Dakota du Sud. Dans les régions au sud des Grands Lacs, ce sont plutôt les cultures de blé d'hiver de type tendre à grain mou qui dominent (Figure 7).

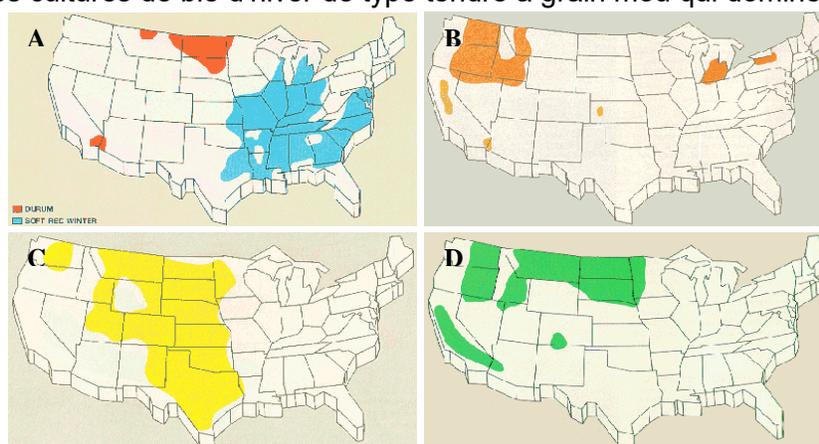


Figure 7. Répartition géographique des types de blé cultivés aux États-Unis : A) Blé dur (en orange) et blé tendre à grain mou « soft red » d'hiver (en bleu); B) Blé tendre à grain mou « soft white »; C) blé tendre vitreux « hard red » d'hiver et D) blé tendre vitreux « hard red » de printemps (Source : *Minnesota Association of Wheat Growers*).

Aux États-Unis, la fusariose de l'épi demeure un problème important dans la culture du blé et de l'orge. On la retrouve dans la plupart des régions où l'on cultive le blé, mais les zones les plus touchées sont généralement le Dakota du Nord, l'Illinois, l'Indiana, le Michigan et l'Ohio (Figure 8). Bien que cette maladie soit présente depuis de nombreuses années et qu'elle soit bien documentée pour les épidémies passées, l'intensité des épidémies demeure toujours aussi élevée (Kriss *et coll.*, 2010) (Figure 9). Cette réalité oblige les intervenants à consacrer plus d'efforts de recherche afin de permettre une meilleure gestion de cette problématique.



Figure 8. Zones de grandes épidémies de fusariose de l'épi aux États-Unis, entre 1991 et 1996. (Tiré de McMullen *et coll.* 1997). Les étoiles bleues représentent l'Illinois et l'Ohio, les deux régions analogues à la Montérégie à l'horizon 2041-2070, alors que les étoiles jaunes représentent le Wisconsin et la Pennsylvanie, régions analogues au Bas St-Laurent à l'horizon 2041-2070.

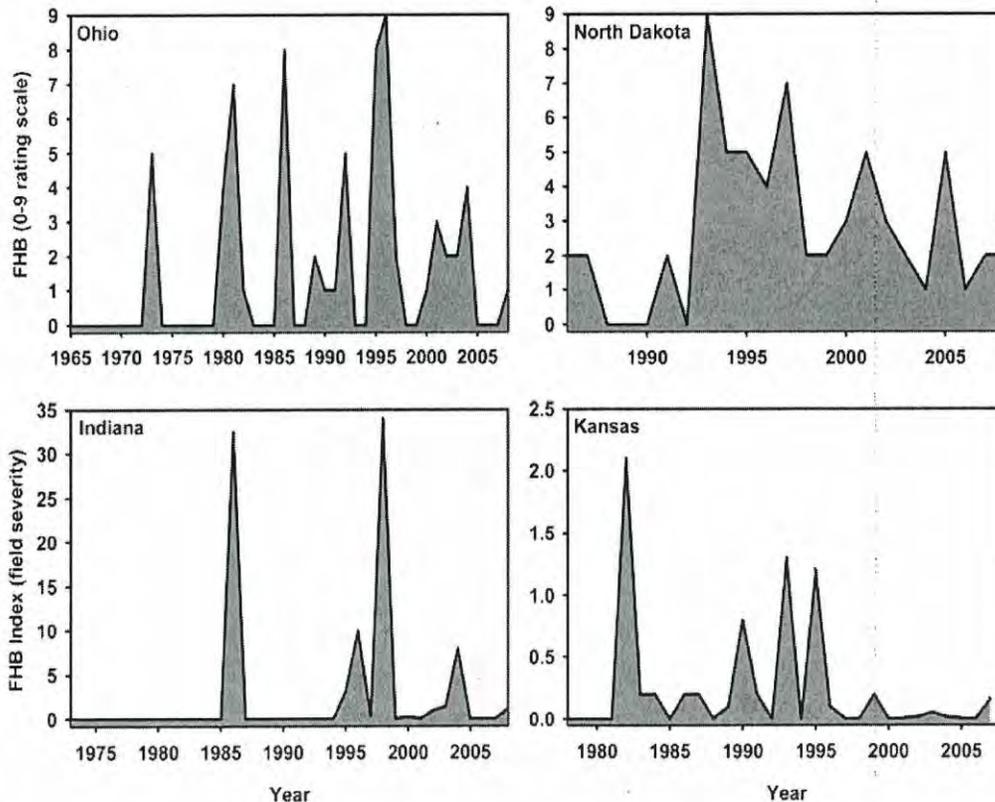


Figure 9. Intensité de la fusariose de l'épi pour l'Ohio, le Dakota du Nord, l'Indiana et le Kansas. Notez que la méthode pour évaluer l'intensité de l'infestation peut varier d'une région à l'autre. (Tiré de Kriss *et coll.* 2010)

5.3.2.2. Illinois et Ohio

Impacts sur la fusariose de l'épi

En Ohio et en Illinois, ce sont les cultivars de blé d'automne qui sont majoritairement cultivés. La date de plantation se situe entre le 23 septembre (dans le nord de l'État) et le 5 octobre (dans le sud). Leur plus grande épidémie a été vécue en 1996, alors que c'est tout récemment, en 2010, qu'ils ont vécu leur deuxième plus grande épidémie. Selon le chercheur Pierce Paul de l'Ohio State University, les problèmes de fusariose sont de plus en plus importants depuis les dix dernières années dans cette région.

Impacts sur les méthodes de contrôle

Les principaux moyens de lutte utilisés en Illinois et en Ohio sont les applications de fongicides et la rotation des cultures afin d'éviter de semer du blé sur un retour de céréale ou de maïs. Selon certaines études américaines, le blé cultivé sur des résidus de maïs infectés de *Fusarium* a plus de risque d'être touché par cette maladie que s'il avait été cultivé sur d'autres résidus tels que le soya. Il semblerait même que le blé cultivé suite à du maïs a cinq à dix fois plus de chance d'être infecté par la fusariose que lorsque le blé était la culture précédente. Les méthodes de récolte (en utilisant des ventilateurs pour souffler les grains fusariés) ainsi qu'une approche de lutte intégrée sont des pistes de solution pour l'avenir, selon Pierce Paul.

La disponibilité des cultivars résistants à la fusariose de l'épi en Illinois est très limitée. La plupart des cultivars disponibles se situent à une échelle de 4 à 8 pour la résistance (un étant résistant et neuf étant sensible) (Figure 10). L'Ohio ne possède également pas de cultivars résistants à la fusariose de l'épi. Pour cette région, les cultivars sont distribués selon quatre catégories : i) susceptibles; ii) modérément susceptibles; iii) aussi résistant que le cultivar Freedom (modérément susceptible), mais pas plus que le Truman (modérément résistant); et iv) aussi résistant que le Truman ou plus (Figure 11).

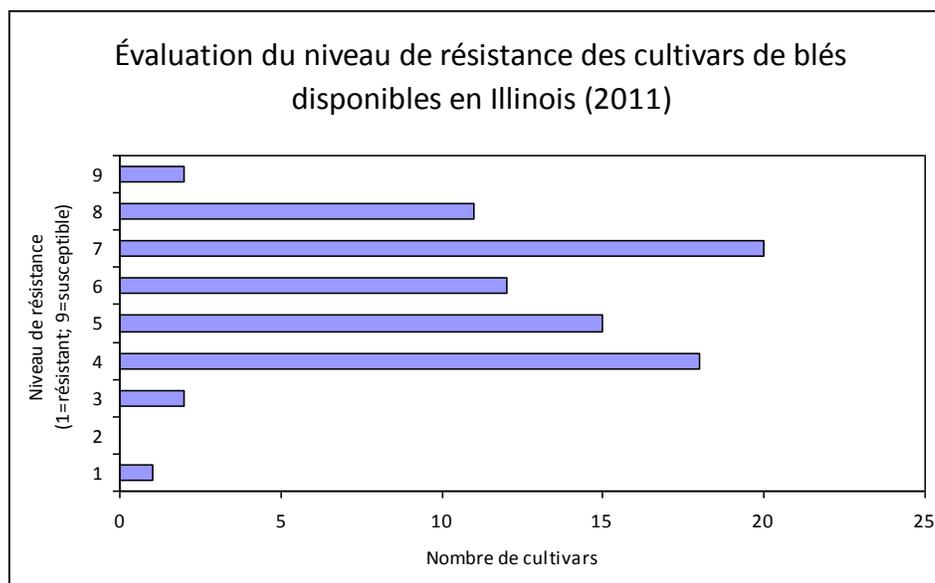


Figure 10. Évaluation de résistance des cultivars de blés disponibles en Illinois (2011). (Source : <http://vt.cropsci.illinois.edu/wheat.html>)

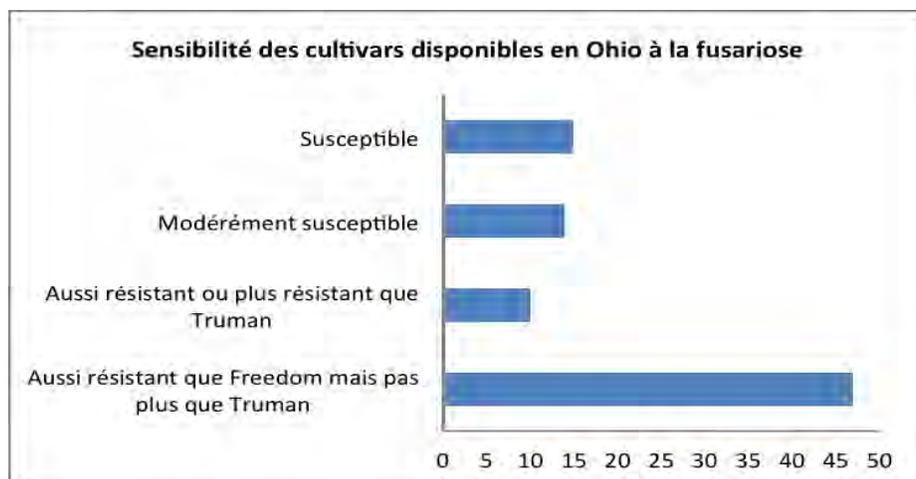


Figure 11. Évaluation de résistance des cultivars de blés disponibles en Ohio (2011). (Source : <http://oardc.osu.edu/wheattrials/>)

L'est des États-Unis possède un système de prévision du risque pour la fusariose de l'épi afin de soutenir les producteurs dans la prise de décision pour l'application d'un fongicide (Figure 12). Cet outil, disponible en ligne (www.wheatcab.psu.edu), permet de visualiser une « carte de risque » afin d'évaluer la situation dans la région précise où le producteur se trouve. Ces risques sont basés sur les données météorologiques locales ainsi que sur la sensibilité des cultivars.

Fusarium Head Blight Risk Assessment Tool 2011

Assessment Date: 0 24 48 72

Assessment Date
 Use the calendar on the left to select the assessment date. We suggest using several dates just prior to the flowering date of your fields. The date selected is in dark blue; the previous 7 days are in light blue. *more....*

Step 2: Select Model
 Use the **choose model** button to customize the risk model for your wheat type and production practices

Step 3: Zoom in to view risk map
 Click on a state to zoom in and view risk maps.
 Click on a **weather station** for station-based risk information. *more....*
 Click the **full extent** button to zoom out to the US map and navigate to another state.

National Commentary *last update: 2011-08-12 10:21:21*
 The FHB prediction tools and commentary features are scheduled to shut down as the 2011 growing season comes to a close. This means that no additional risk maps and commentary will be available after this weekend. The maps and other information already in the system; however, will still be available until early March when the system will be activated for the 2012 growing season.

Figure 12. Système de prévision du risque pour la fusariose de l'épi pour tout l'est des États-Unis. (Source : www.wheatcab.psu.edu)

5.3.2.3. Wisconsin et Pennsylvanie

Impacts sur la fusariose de l'épi

Dans les régions du Wisconsin et la Pennsylvanie, ce sont encore les cultivars de blé d'automne qui sont les plus couramment cultivés avec 97 % de blé d'automne et au maximum 3 % de blé de printemps (Esker, *comm. pers.*). Les cultivars de blé de printemps n'offrent pas de bons rendements dans ces régions, d'autant plus que l'accès au champ pour le semis est souvent difficile au printemps (Collins, *comm. pers.*). Généralement le blé d'automne est semé entre le 20 septembre et le 10 octobre selon les régions. L'anthèse se situe, quant à elle, entre la mi-mai et la mi-juin. Au Wisconsin, les épidémies se répètent à raison d'une à quatre par période de huit ans. On retrouve toutefois la fusariose tous les ans, et lorsqu'aucune épidémie n'est observée, l'incidence se situe autour de 5 % ou moins. En Pennsylvanie, les épidémies sont généralement qualifiées de sévères à raison de trois à quatre fois par période de dix ans. Les trois dernières années (2009, 2010 et 2011) ont été les pires. Les niveaux de DON sont très variables d'une année à l'autre, mais lors d'épidémies, c'est en moyenne entre 50 à 60 % du blé qui atteint des niveaux de DON au-dessus de 1 ppm (la norme maximale pour la commercialisation au Canada).

Impacts sur les méthodes de contrôle

Les méthodes de contrôle de ces deux régions sont principalement les rotations, les fongicides et le choix de cultivars résistants. Les rotations sont quelques fois limitées puisque le maïs-grain domine largement le territoire, suivi par la luzerne. Les fongicides sont utilisés lorsque les conditions sont favorables au développement de la maladie et lorsque les conditions durant l'anthèse sont propices à l'entrée au champ. Le choix des cultivars est limité (sans qu'ils soient totalement résistants, certains seraient plus tolérants), mais l'utilisation des variétés les plus performantes de la région permet de diminuer en partie les risques d'infection.

Pour prévenir les infections de *Fusarium*, il est possible d'utiliser soit différents cultivars possédant des dates de maturité différentes ou soit planter le blé d'une même variété à différentes dates. Cette technique permet d'éviter que toute la production soit en fleur au même moment et que le risque de fusariose y soit également élevé. En étalant ainsi les stades phénologiques du blé, les risques sont répartis et l'on diminue les chances de perdre la totalité de la culture.

Tout comme mentionné pour les régions de l'Illinois et de l'Ohio, l'est des États-Unis possède un système de prévision du risque pour la fusariose de l'épi afin d'aider les producteurs dans la prise de décision pour l'application d'un fongicide.

5.3.3. Doryphore de la pomme de terre

5.3.3.1. La culture de la pomme de terre aux États-Unis

Historiquement, le Maine, New York et la Pennsylvanie ont été les principales régions productrices de pommes de terre. Avec l'expansion des populations humaines vers l'ouest à la fin du 19^e siècle, l'invention des systèmes d'irrigation efficaces et le développement du transport ferroviaire réfrigéré, les États de l'Idaho, de Washington et du Colorado ont été stimulés à prendre les devants dans la production de pommes de terre aux États-Unis. En Amérique du Nord, la pomme de terre est attaquée par plus de 150 espèces d'insectes ravageurs. La plupart sont d'une importance locale, mineure, ou seulement occasionnelle, mais dans chaque région de production, il y a quelques espèces qui peuvent causer des

pertes de rendement ou de qualité des tubercules. La culture de la pomme de terre est attaquée par de nombreux insectes phytophages, le plus connu et le plus destructeur étant le doryphore de la pomme de terre (Bohl et Johnson, 2010).

Le doryphore a été décrit pour la première fois dans la vallée de la rivière Missouri en 1824, où il se nourrissait d'une mauvaise herbe nommée *Solanum rostratum* (Hare, 1990). C'est quelques années plus tard, en 1859, que le doryphore est entré en contact pour la première fois avec la pomme de terre cultivée par les nouveaux colons et a ainsi changé d'hôte. Le doryphore a connu une extension très rapide vers l'est et a atteint les côtes Atlantiques dès 1876 (Figure 13). On le retrouve maintenant partout aux États-Unis, sauf dans certains États de l'ouest où la culture de la pomme de terre est plus rare (Californie, Nevada, Alaska et Hawaii).



Figure 13. Expansion du doryphore de la pomme de terre aux États-Unis. (Source : Perpillon, 1933)

5.3.3.2. New York

Impacts sur le doryphore de la pomme de terre

La culture de la pomme de terre dans l'état de New York est destinée principalement au marché frais et de transformation, au niveau régional. L'irrigation tend à devenir plus fréquente pour limiter les dommages causés par les sécheresses occasionnelles (Stivers, 2000). L'ennemi principal demeure le doryphore de la pomme de terre, bien que l'utilisation massive de l'imidaclopride ait diminué considérablement ses populations. Le doryphore de la pomme de terre dans l'État de New York présente deux générations par année, avec quelques fois une troisième. L'adulte sort de diapause autour de la mi-mai dans la région du Long Island et de sept à dix jours plus tard dans le centre de l'état de New York. Une fois les premières plantules de pomme de terre sorties de terre, les femelles doryphores y pondent leurs œufs. Les larves émergent une semaine après la ponte, consomment le feuillage et terminent leur développement en 18 à 21 jours. La puppe tombe alors au sol où une diapause est amorcée ou si la période y est propice une génération supplémentaire y est produite dans les cinq à dix jours suivants (Klass et Muka, 2009). À la mi-août la plupart des pontes cessent et les adultes amorcent leur période de dormance.

Impacts sur les méthodes de contrôle

Ce ravageur est devenu très difficile à contrôler dû aux problèmes fréquents de résistance aux insecticides. Les problèmes de résistance sont plus importants dans les États de l'est puisqu'une utilisation plus importante d'insecticides s'est faite depuis les dernières décennies. Les doryphores de la pomme de terre de la région du Long Island présentent particulièrement des cas de résistance aux insecticides (dont la résistance aux imidacloprides). Il est conseillé de consulter les recommandations locales pour éviter d'utiliser des insecticides où certaines populations résistantes sévissent. Pour les petites superficies, les méthodes naturelles comme l'utilisation du *Beauveria bassiana* (champignon entomopathogène qui parasite le doryphore adulte) sont efficaces, mais les traitements insecticides sont nécessaires pour les plus grandes superficies. D'autres méthodes alternatives sont aussi utilisées dans les programmes de lutte intégrée, telles que la rotation des cultures, l'utilisation de propane pour enflammer les populations migrantes, les plantes-trappes et les tranchées. Ces pratiques ne peuvent toutefois être utilisées seules; l'utilisation des insecticides étant indispensable pour assurer un bon contrôle.

5.3.2.3. Wisconsin

Impacts sur le doryphore de la pomme de terre

Les plants de pommes de terre sont semés généralement entre le début avril et le début mai au sud de l'État, de la mi-avril à la mi-mai au centre de l'État et du début mai à la fin mai dans les régions plus au nord. La plupart des champs de pommes de terre au Wisconsin sont irrigués pour assurer une bonne croissance et un bon rendement (Delahaut, 2000).

Le doryphore de la pomme de terre peut devenir problématique s'il n'est pas surveillé puisque les dommages liés à la défoliation peuvent diminuer la taille des tubercules, voir même tuer complètement le plant de pomme terre. Les adultes émergent très tôt au printemps, lorsque les premières pousses apparaissent. Une fois les œufs pondus, ces derniers émergeront 4 à 9 jours plus tard, pour passer tous les stades larvaires en deux à trois semaines. La larve retourne au sol pour puper, où l'imago émergera 10 à 14 jours plus tard (Delahaut, 2000). Le Wisconsin possède une à deux générations par année dans les régions du nord (Figure 14) alors qu'elle en compte généralement trois (la troisième étant souvent partielle) pour les régions plus au sud (Groves, *comm. pers.*).

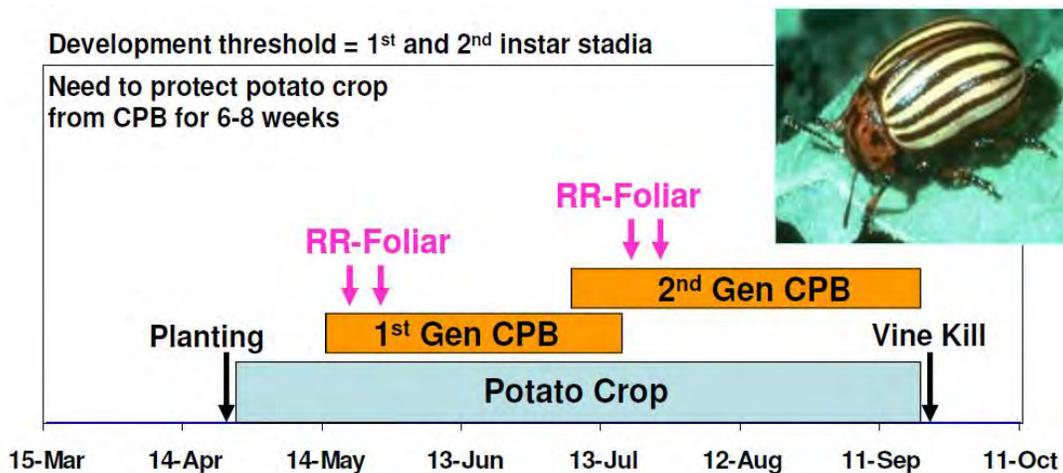


Figure 14. Représentation de la phénologie des deux générations de doryphore de la pomme de terre dans l'État du Wisconsin (Source : Groves, *comm. pers.*).

Impacts sur les méthodes de contrôle

Les traitements insecticides sont les plus employés pour lutter contre le doryphore de la pomme de terre. Une bonne gestion des insecticides est primordiale puisque le doryphore a développé de la résistance à tous les produits utilisés. Type d'insecticides:

- Systémique : Admire (imidaclopride), appliqué lors de la plantation ou de l'émergence de la culture; efficace surtout en début et milieu de saison (ne pas utiliser à répétition au même endroit pour éviter la résistance). Traitement des semences également disponible (Ginesis ou Gaucho|imidocloprid)
- Foliaire : carbamates (carbaryl, Furadan), organophosphates (Guthion, Imidan), organochlorines (Thiodan), pyrethroids (Ambush, Pounce, Asana, Baythroid), ont tous développé des cas de résistance. Afin de réduire ce phénomène, on recommande de diminuer le nombre d'applications insecticides. Pour y parvenir, au Wisconsin, les producteurs ciblent les traitements pour appliquer le pesticide uniquement sur les stades les plus vulnérables de la première génération, soit entre le premier et le deuxième stade larvaire ou lorsque 240 degrés-jours sont atteints (Tableau 19). Si l'oviposition* se poursuit, il est recommandé d'appliquer un deuxième traitement (sept à dix jours d'intervalle). Ceci permet de réduire les dommages causés par les larves plus avancées, ainsi que de limiter la population pouvant engendrer une seconde génération, diminuant ainsi la pression des ravageurs en fin de saison.

Tableau 19. Développement du Doryphore au Wisconsin (Delahaut, 1997)

Stade de développement	Degrés-jours (DJ)	DJ accumulés	Traitement
Œuf	120	120	Pas susceptible – ne pas traiter
1 ^{er} stade larvaire	65	185	Meilleur moment pour appliquer le <i>Bacillus thuringiensis</i> var. <i>tenebreonis</i> (Btt)
2 ^e stade larvaire	55	240	Meilleur moment pour appliquer les insecticides conventionnels
3 ^e stade larvaire	60	300	
4 ^e stade larvaire	100	400	
Pupe	275	675	Pas susceptible – ne pas traiter

Une rotation très stricte doit être faite quant au choix du pesticide utilisé afin de limiter le développement de résistance. Des ensembles de bio essai sont disponibles au Wisconsin pour évaluer la sensibilité des larves avant l'application du produit. Récemment, le développement de résistance aux pesticides appliqués lors du semis (classe des imidacloprides) a réduit la durée du contrôle du doryphore de la pomme de terre en passant de 80 à 90 jours de contrôle à 50 à 60 jours. Suite à des tests de résistance, les chercheurs ont observé des taux de résistance de 50 à 70 fois plus élevés que chez les populations sensibles (Groves, *comm. pers.*).

Bien que les traitements chimiques soient les plus utilisés au Wisconsin, quelques méthodes alternatives sont disponibles. Voici quelques exemples:

- Ennemis naturels locaux (coccinelles et pentatomidés) – pas efficace pour assurer un contrôle sous le seuil économique.

- Rotation des cultures (à au moins 400 mètres de l'ancienne plantation) - permet de réduire de 75% les infestations de doryphore.
- Plants-trappes d'automne – en laissant une bande de pommes de terre intacte avant la récolte afin de permettre l'agrégation des adultes à cet endroit, et ensuite d'y appliquer un insecticide avant leur comportement de dormance.
- Plants-trappes de printemps ou bordures de champ plus hâtifs – afin de rassembler le plus d'adultes émergent de diapause et ainsi traiter (insecticides, aspiration, flammes) que cette portion du champ pour limiter la propagation du doryphore.
- Tranchées (de 18 pouces) entre le lieu d'hivernation et la culture – permet également de capturer les adultes se dirigeant vers les plants de pommes de terre pour s'y reproduire.

5.4. Modélisation

Dans le cas de la pyrale du maïs et de la fusariose de l'épi, l'utilisation de modèles bioclimatiques a permis de valider certains résultats obtenus avec les analogues spatiaux. La modélisation a aussi permis d'aller au-delà de la validation en apportant de nouveaux éléments à considérer concernant l'impact probable des CC sur ces deux ennemis des cultures.

5.4.1. Pyrale du maïs

5.4.1.1. Dates d'émergence de la pyrale du maïs

Race univoltine – Montérégie

La date d'émergence des adultes de la race univoltine serait devancée avec les changements climatiques dans la région de la Montérégie, soit de 14 à 17 jours plus tôt (Tableau 20). Les moyennes climatiques du passé récent indiquent des dates d'émergence autour du 16 juillet, alors que sous un climat futur, les pyrales pourraient apparaître entre le 28 juin et le 3 juillet. L'étendue du stade adulte ne serait sensiblement pas différente dans le futur (deux jours de différence) (Figure 15). Ceci s'explique par le fait que la région de la Montérégie étant plus chaude que celle de la Capitale-Nationale, la pyrale du maïs ne bénéficie pas de quelques degrés supplémentaires pour amorcer son développement. Au contraire, les conditions climatiques plus fraîches de la région de la Capitale-Nationale se retrouvaient probablement plus fréquemment en dessous du seuil de développement de la pyrale (10°C), et le réchauffement du climat permet de dépasser cette limite.

Tableau 20. Dates d'émergence des adultes de la pyrale du maïs R race univoltine pour le climat actuel (1970-1999) et futur (2041-2070) dans la région de la Montérégie.

	Montérégie				
	1970-1999	2041-2070		Différence	
	Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile	25 ^e centile	75 ^e centile
5 % adultes	30-juin	14-juin	19-juin	13	14
50 % adultes	16-juil	29-juin	04-juil	14	16
95 % adultes	01-août	12-juil	18-juil	16	20
Étendue	32 jours	30 jours	30 jours	2 jours	2 jours

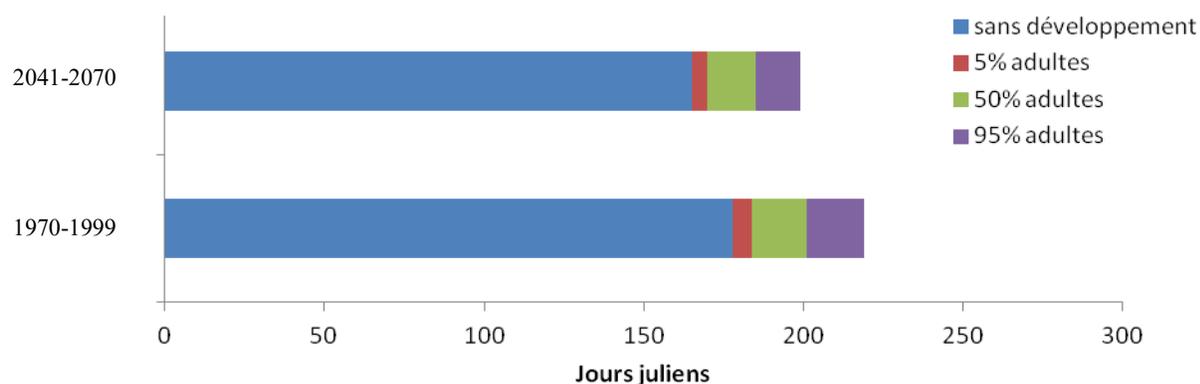


Figure 15. Distribution temporelle du stade adulte (5-50-95 %) de la pyrale du maïs univoltine selon le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) de la région de la Montérégie.

Race univoltine – Capitale-Nationale

La date d'émergence des adultes de la race univoltine serait devancée de 16 à 21 jours avec les changements climatiques (Tableau 21). Ainsi, les adultes univoltins arrivant normalement (moyenne climatique 1970-1999) autour du 31 juillet, pourraient survenir beaucoup plus tôt dans le futur, soit entre le 11 et le 16 juillet. Par ailleurs, en observant la distribution temporelle de la population (Figure 16), nous observons une étendue du stade adulte plus courte dans le futur (30 jours) qu'actuellement (40 jours). Ceci s'expliquerait par une vitesse de développement plus rapide de la pyrale du maïs en lien avec les hausses de températures.

Tableau 21. Dates d'émergence des adultes de la pyrale du maïs Race univoltine pour le climat actuel (1970-1999) et futur (2041-2070) dans la région de la Capitale-Nationale.

	Capitale-Nationale				
	1970-1999	2041-2070		Différence (jours)	
	Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile	25 ^e centile	75 ^e centile
5 % adultes	12-juil	26-juin	01-juil	16	11
50 % adultes	31-juil	11-juil	16-juil	20	15
95 % adultes	21-août	26-juil	31-juil	26	21
Étendue	40 jours	30 jours	30 jours	10 jours	10 jours

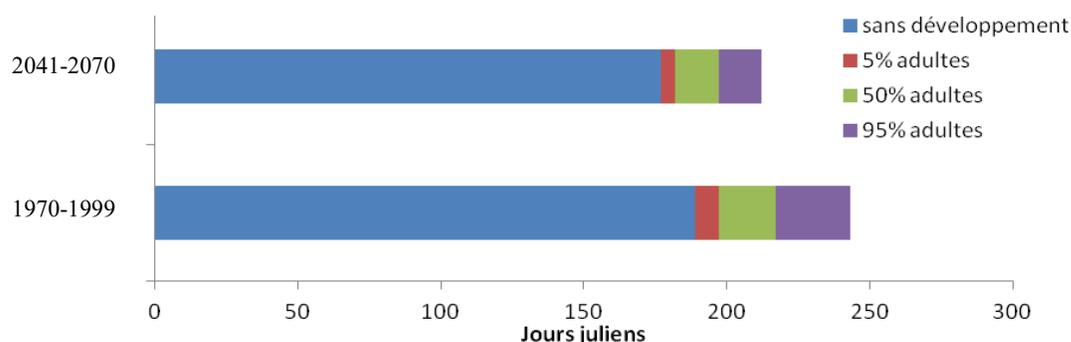


Figure 16. Distribution temporelle du stade adulte (5-50-95%) de la pyrale du maïs univoltine selon le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) de la région de la Capitale-Nationale.

Race bivoltine – Montérégie

Les modifications phénologiques liées aux changements climatiques se feraient également sentir dans la région de la Montérégie, mais de façon moins marquée que celles ressenties dans la région de la Capitale-Nationale. La première génération arriverait entre 10 à 14 jours plus tôt alors que la deuxième génération surviendrait beaucoup plus hâtivement avec des dates d'émergence allant de 21 à 27 jours plus tôt qu'actuellement (Tableau 22). Par ailleurs, l'étendue du stade adulte raccourcirait de trois à quatre jours et de neuf à dix jours pour les première et deuxième générations, respectivement. L'écart temporel entre les deux générations passerait de 65 jours actuellement à 52-54 jours sous le climat futur.

Tableau 22. Dates d'émergence des adultes de la pyrale du maïs Race bivoltine pour le climat actuel (1970-1999) et futur (2041-2070) dans la région de la Montérégie.

	Montérégie				
	1970-1999	2041-2070		Différence	
	Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile	25 ^e centile	75 ^e centile
F1 5 %	05-juin	24-mai	28-mai	12	8
F1 50 %	17-juin	03-juin	07-juin	14	10
F1 95 %	30-juin	14-juin	19-juin	16	11
F2 5 %	07-août	16-juil	22-juil	22	16
F2 50 %	21-août	25-juil	31-juil	27	21
F2 95 %	03-sept	02-août	09-août	32	25
Moyenne F1	17-juin	03-juin	07-juin	14.0	9.7
Moyenne F2	20-août	24-juil	31-juil	27.0	20.7
Étendue F1	25	21	22	4	3
Étendue F2	27	17	18	10	9
Écart entre pics	65	52	54	13	11

Race bivoltine – Capitale-Nationale

La race bivoltine de la pyrale du maïs connaîtrait également des modifications phénologiques avec les changements climatiques. La première génération émergerait entre 10 à 14 jours plus tôt alors que la deuxième génération surviendrait beaucoup plus hâtivement avec des

dates d'émergence allant de 31 à 37 jours plus tôt qu'actuellement (Tableau 23). Par ailleurs, l'étendue du stade adulte raccourcirait de deux à trois jours et de 14-17 jours pour les premières et deuxièmes générations, respectivement. L'écart temporel entre les deux générations passerait de 81 jours à 57-60 jours sous le climat futur.

Tableau 23. Dates d'émergence des adultes de la pyrale du maïs R race bivoltine pour le climat actuel (1970-1999) et futur (2041-2070) dans la région de la Capitale-Nationale.

	Capitale-Nationale				
	1970-1999	2041-2070		Différence	
	Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile	25 ^e centile	75 ^e centile
F1 5 %	16-juin	03-juin	07-juin	13	9
F1 50 %	29-juin	15-juin	18-juin	14	11
F1 95 %	12-juil	26-juin	01-juil	16	11
F2 5 %	28-août	31-juil	05-août	28	23
F2 50 %	18-sept	11-août	17-août	38	32
F2 95 %	05-oct	21-août	29-août	45	37
Moyenne F1	29-juin	14-juin	18-juin	14.3	10.3
Moyenne F2	16-sept	10-août	17-août	37.0	30.7
Étendue F1	26	23	24	3	2
Étendue F2	38	21	24	17	14
Écart entre pics	81	57	60	24	21

5.4.1.2. Durée de la période d'intervention

Race univoltine – Montérégie

La durée de la période d'intervention se situait autour de huit jours pour la région de la Montérégie sous les conditions climatiques actuelles. Avec les changements climatiques, cette période se trouve rétrécie seulement d'une journée (Tableau 24).

Tableau 24. Durée de la période d'intervention pour un traitement phytosanitaire (entre la ponte des œufs et l'émergence des larves de premier stade) contre la pyrale du maïs univoltine pour le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) de la région de la Montérégie.

	Montérégie				
	1970-1999	2041-2070		Différence	
	Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile	25 ^e centile	75 ^e centile
5 % population	8	7	7	1	1
50 % population	8	6	7	2	1
95 % population	7	6	6	1	1
Moyenne	7.7	6.3	6.7	1.3	1.0

Race univoltine – Capitale-Nationale

La durée de la période d'intervention se situait autour de dix jours pour la région de la Capitale-Nationale sous les conditions climatiques actuelles. Avec les changements climatiques, cette période se trouve rétrécie de deux à trois jours (Tableau 25).

Tableau 25. Durée de la période d'intervention pour un traitement phytosanitaire (entre la ponte des œufs et l'émergence des larves de premier stade) pour le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) de la région de la Capitale-Nationale.

	Capitale-Nationale				
	1970-1999	2041-2070		Différence	
	Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile	25 ^e centile	75 ^e centile
5 % population	9	7	8	2	1
50 % population	9	6	7	3	2
95 % population	11	7	7	4	4
Moyenne	9.7	6.7	7.3	3.0	2.3

Race bivoltine – Montérégie

La race bivoltine connaîtra moins de changements phénologiques dans la région de la Montérégie. L'intervalle d'intervention sera quelque peu réduit avec des diminutions d'une journée et d'une semaine, pour la première et deuxième génération, respectivement. La race bivoltine est relativement bien établie dans cette région, même si le premier stade larvaire n'était pas atteint huit années sur 30 dans le passé récent. Toutefois, avec les changements climatiques, toutes les simulations climatiques prédisent l'atteinte de ce stade, et ce pour les 30 années (Tableau 26).

Tableau 26. Durée de la période d'intervention pour un traitement phytosanitaire (entre la ponte des œufs et l'émergence des larves de premier stade) contre la pyrale du maïs -bivoltine pour le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) de la région de la Montérégie.

	Montérégie				
	1970-1999	2041-2070		Différence	
	Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile	25 ^e centile	75 ^e centile
F1 5 %	10	8	8	2	2
F1 50 %	9	7	8	2	1
F1 95 %	7	7	7	0	0
F2 5 %	9	6	6	3	3
F2 50 %	11	6	6	5	5
F2 95 %	18 ^{(8)*}	6	6	12	12
Moyenne F1	8.7	7.3	7.7	1.3	1.0
Moyenne F2	12.7	6.0	6.0	6.7	6.7
Moyenne totale	10.7	6.7	6.8	4.0	3.8

* Indique le nombre d'années sur 30 où ce stade n'a pu être atteint

Race bivoltine – Capitale-Nationale

La période d'intervention est très différente pour la région de Capitale-Nationale entre la première et la deuxième génération. Cette différence est en partie due à la faible présence de la race bivoltine dans cette région. Ainsi, le taux de mortalité de la pyrale bivoltine devait être, dans le passé récent, très élevé puisque la deuxième génération complétait difficilement son cycle (Tableau 27). Or, les changements climatiques risquent de changer la donne en permettant l'achèvement de la deuxième génération de la pyrale bivoltine. Ainsi, l'intervalle

d'intervention diminuerait significativement pour la deuxième génération en passant de 33 jours à environ huit à dix jours à l'horizon 2041-2070.

Tableau 27. Durée de la période d'intervention pour un traitement phytosanitaire (entre la ponte des œufs et l'émergence des larves de premier stade) contre la pyrale du maïs bivoltine pour le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) de la région de la Capitale-Nationale.

	Capitale-Nationale				
	1970-1999	2041-2070		Différence	
	Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile	25 ^e centile	75 ^e centile
F1 5 %	10	8	9	2	1
F1 50 %	9	8	8	1	1
F1 95 %	9	7	7	2	2
F2 5 %	19 ^{(11)*}	7	7	12	12
F2 50 %	30 ⁽²⁸⁾	8	9	22	21
F2 95 %	50 ⁽²⁹⁾	10	13 ^{**}	40	37
Moyenne F1	9.3	7.7	8.0	1.7	1.3
Moyenne F2	33.0	8.3	9.7	24.7	23.3
Moyenne totale	21.2	8.0	8.8	13.2	12.3

* Indique le nombre d'années sur 30 où ce stade n'a pu être atteint

** Ce stade n'a pas été atteint dans 4 scénarios sur 9, et ce pour en moyenne 3 années sur 30.

5.4.1.3. Possibilité d'une génération supplémentaire

Il est à noter que les auteurs supposent que chez la race univoltine de la pyrale du maïs, la diapause n'est pas obligatoire, ce qui lui permettrait éventuellement d'effectuer plus d'une génération durant une même saison de croissance. Ceci est avancé dans le contexte où aucune étude démontre actuellement que la race univoltine nécessite obligatoirement une diapause pour effectuer une seconde génération.

Race univoltine – Montérégie

Dans la région de la Montérégie, le cumul de degrés-jours est beaucoup plus important et pourrait permettre à la race univoltine de compléter une seconde génération. Bien que le climat actuel ne lui permet pas de compléter des stades supplémentaires (seulement 5 % de la population pourrait se rendre au stade larvaire à une date très tardive), les changements climatiques pourraient accroître le nombre de degrés-jours nécessaire au développement d'une seconde génération. Ainsi, entre le 2 et le 13 septembre, 50 % des œufs de la deuxième génération auraient éclos, et à la mi-octobre, le même pourcentage aurait atteint le stade adulte (Tableau 28). Ceci indique que nous pourrions retrouver dans la région de la Montérégie une seconde génération de la race univoltine, qui serait alors considérée comme une race bivoltine.

Tableau 28. Possibilité de développer une génération supplémentaire pour la pyrale du maïs univoltine sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) de la région de la Montérégie.

		Montérégie		
		1970-1999	2041-2070	
		Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile
Partielle	5 % émerg. œufs	03-oct ^{(17)*}	18-août	26-août
	50 % émerg. œufs	NA	02-sept	13-sept
	95 % émerg. œufs	NA	24-sept	09-oct ^{(6)**}
Complète	5 % adultes	NA	09-oct	10-oct ⁽¹⁵⁾
	50 % adultes	NA	13-oct	20-oct ⁽²⁵⁾
	95 % adultes	NA	NA	NA

NA = Stade non atteint

* Indique le nombre d'années sur 30 où ce stade n'a pu être atteint.

**Indique le nombre moyen d'années sur 30 où ce stade n'a pu être atteint parmi les 9 simulations climatiques.

Race univoltine – Capitale-Nationale

Sous le climat de référence, la pyrale n'obtient jamais suffisamment de degrés-jours pour amorcer une seconde génération (Tableau 29). Elle entre donc en diapause lorsqu'elle atteint le cinquième stade larvaire. Avec les changements climatiques, il y aurait une opportunité pour la pyrale du maïs de développer une seconde génération partielle (émergence des œufs, mais sans le développement des adultes). Toutefois, étant donné les dates tardives d'atteinte du stade larvaire, elle ne parviendrait probablement pas à se rendre au stade de dormance. Il n'y a donc peu de chances qu'une seconde génération puisse apparaître dans la région de la Capitale-Nationale.

Tableau 29. Possibilité de développer une génération supplémentaire pour la pyrale du maïs univoltine sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) de la région de la Capitale-Nationale.

		Capitale-Nationale		
		1970-1999	2041-2070	
		Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile
Partielle	5 % émergence œufs	NA	13-sept	25-sept ^{(6)*}
	50 % émergence œufs	NA	02-oct	07-oct ⁽²²⁾
	95 % émergence œufs	NA	NA	NA
Complète	5 % adultes	NA	NA	NA
	50 % adultes	NA	NA	NA
	95 % adultes	NA	NA	NA

NA = Stade non atteint

* Indique le nombre moyen d'années sur 30 où ce stade n'a pu être atteint pour les 9 simulations climatiques.

Race bivoltine – Montérégie

La race bivoltine dans la région de la Montérégie ne peut compléter une troisième génération sous les conditions climatiques actuelles (Tableau 30). Toutefois, les changements climatiques pourraient permettre le développement d'une troisième génération partielle si la culture devait s'étendre à des dates plus tardives (mi-octobre), puisqu'on prévoit l'émergence de 50 % des œufs entre le 8 et le 14 octobre.

Tableau 30. Possibilité de développer une génération supplémentaire pour la pyrale du maïs - bivoltine sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) de la région de la Montérégie.

		Montérégie		
		1970-1999	2041-2070	
		Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile
Partielle	5 % émergence œufs	NA	21-sept	05-oct
	50 % émergence œufs	NA	08-oct	14-oct
	95 % émergence œufs	NA	14-oct	22-oct
Complète	5 % adultes	NA	30-oct	02-nov
	50 % adultes	NA	NA	NA
	95 % adultes	NA	NA	NA

Race bivoltine – Capitale-Nationale

Cette race ne peut amorcer une troisième génération sous les conditions actuelles et ne le pourrait non plus à l'horizon 2041-2070.

5.4.1.4. Période de vulnérabilité du maïs sucré à la pyrale du maïs

Comme les dates de semis du maïs sucré risquent d'être devancées dans le futur (à moins que les précipitations printanières nuisent à l'entrée au champ), la période de vulnérabilité des plants risque d'être plus longue. Les plants de maïs atteindraient le stade 6-feuilles (début de la période de vulnérabilité) jusqu'à 15 jours plus tôt pour la Capitale-Nationale, et jusqu'à 16 jours plus tôt pour la Montérégie (Tableau 31 et 32). La période de vulnérabilité du maïs à la pyrale débiterait donc deux semaines plus tôt pour se poursuivre jusqu'à la récolte (autour du 15 septembre).

Tableau 31. Date du début de la période de vulnérabilité du maïs face à la pyrale du maïs et durée de cette période (jusqu'au 15 septembre) sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) de la région de la Capitale-Nationale.

	Capitale-Nationale				
	1970-1999	2041-2070		Différence	
	Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile	25 ^e centile	75 ^e centile
Date de début	23-juin	08-juin	13-juin	15 jours	10 jours
Durée (jours)	85	94	99	9	14

Tableau 32. Date du début de la période de vulnérabilité du maïs face à la pyrale du maïs et durée de cette période (jusqu'au 15 septembre) sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) de la région de la Montérégie.

	Montérégie				
	1970-1999	2041-2070		Différence	
	Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile	25 ^e centile	75 ^e centile
Date de début	13-juin	28-mai	02-juin	16 jours	11 jours
Durée (jours)	94	105	110	11	16

5.4.1.5. Conclusion de la modélisation pour la pyrale du maïs

Le tableau 33 présente les différents résultats obtenus avec la modélisation pour la pyrale du maïs dans la Capitale-Nationale et la Montérégie, pour les races univoltines et bivoltines. On s'attend donc à une émergence plus hâtive de la pyrale d'environ deux semaines pour la race univoltine dans les deux régions, et jusqu'à quatre semaines pour la race bivoltine de la Montérégie. La période d'intervention pour traiter avec les insecticides risque de diminuer d'un à trois jours pour la race univoltine des deux régions et jusqu'à une semaine pour la race bivoltine en Montérégie. La période de vulnérabilité de la pyrale (du stade 6-feuilles à la récolte) serait aussi allongée d'environ deux semaines dans les deux régions. En Montérégie, il faut s'attendre à l'apparition d'une deuxième génération partielle, voire complète pour la race univoltine et la possibilité d'une troisième génération partielle pour la race bivoltine. Pour la Capitale-Nationale, les probabilités que la race univoltine développe une seconde génération, même partielle, sont minimales puisque l'atteinte du stade larvaire surviendrait trop tard dans la saison.

Tableau 33. Synthèse des résultats de la modélisation pour la pyrale du maïs.

	Capitale-Nationale -univoltine-	Montérégie -univoltine-	Montérégie -bivoltine-
Dates d'émergence des adultes	15 à 20 jours plus tôt	14 à 17 jours plus tôt	F1 9 à 14 jours plus tôt
			F2 20 à 27 jrs plus tôt
Durée de la période d'intervention	2 à 3 jours de moins	1 jour de moins	F1 1 jour de moins
			F2 7 jours de moins
Possibilité d'une génération supplémentaire	Peu de chances de voir l'apparition d'une 2 ^e génération	Possibilité d'une 2 ^e génération partielle, voire complète	Possibilité d'une 3 ^e génération partielle si la culture s'étend jusqu'en octobre
Période de vulnérabilité du maïs sucré à la pyrale	9 à 14 jours de plus	11 à 16 jours de plus	

5.4.2. Fusariose de l'épi

5.4.2.1. Période pré-anthèse

La période de pré-anthèse est propice à la maturation et à la dispersion des spores de fusariose. Dans des conditions météorologiques favorables, l'abondance d'inoculum augmentera et pourra occasionner des infections plus sévères (Hooker *et coll.*, 2002).

Pour la formation et la maturation des spores, les conditions sont optimales lorsque la température se situe entre 20 et 30 °C (Cook et Christen, 1976). Une température inférieure à 10 °C ou supérieure à 32 °C diminuera la production des spores, réduisant conséquemment la disponibilité des spores pour la période d'infection à l'anthèse (De Wolf *et coll.*, 2000, Rossi *et coll.*, 2003).

La dispersion des spores est surtout affectée par les précipitations. Lorsque celles-ci sont d'une taille supérieure à 5 mm, le taux de dispersion et d'infection augmentent, ce qui risque d'occasionner des niveaux plus élevés de DON dans les grains (Rossi *et coll.*, 2003, Hooker *et coll.* 2002).

Date de début de la période de pré-anthèse

Sous le climat du passé récent, le blé entre en période de pré-anthèse entre le 13 et le 24 juin. Les changements climatiques risquent de faire reculer cette date de 7 à 12 jours pour les trois régions, pour une entrée en période de pré-anthèse se situant entre le 1^{er} (Montérégie) et le 13 juin (Capitale-Nationale), au plus tôt (Tableau 34).

Tableau 34. Dates de début de la période de pré-anthèse sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie.

	Période de pré-anthèse				
	1970-1999	2041-2070		Différence (jours)	
	Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile	25 ^e centile	75 ^e centile
Capitale-Nationale	24-juin	13-juin	17-juin	-11	-7
Lanaudière	22-juin	10-juin	15-juin	-12	-7
Montérégie	13-juin	1 ^{er} -juin	5-juin	-12	-8

Durée de la période de pré-anthèse

La durée de la période de pré-anthèse aura un impact sur l'incidence de la fusariose en allongeant la période de maturation et de dispersion des spores. Elle aura aussi un impact sur le nombre de jours où les conditions climatiques défavorables ($T_{max} > 32^{\circ}C$ et $T_{min} < 10^{\circ}C$) et favorables (Précipitations > 5 mm) risquent d'être présentes pour la maturation et la dispersion des spores de la fusariose.

Dans un climat futur, on s'attend à une réduction de la durée de la période de pré-anthèse d'un jour seulement pour les régions se trouvant plus au nord (Capitale-Nationale et Lanaudière). Pour la Montérégie, plus au sud, la durée de huit jours pour la période 1970-1999 demeure inchangée avec les changements climatiques (Tableau 35).

Tableau 35. Durée de la période de pré-anthèse sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie.

	Période de pré-anthèse			
	1970-1999	2041-2070		Différence (jours)
	Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile	25 ^e et 75 ^e centile
Capitale-Nationale	9	8	8	-1
Lanaudière	9	8	8	-1
Montérégie	8	8	8	0

Température

Pour chaque région administrative, le nombre de jours où la température risque d'être inférieure à 10°C ou supérieure à 32°C durant la période de pré-anthèse est calculé en fonction de la durée de la période. Donc, si le nombre de jours augmente pour ces deux paramètres climatiques, il pourrait s'en suivre une réduction de la production d'inoculum en rendant les conditions de croissance défavorables à la germination et la maturation des spores.

Tableau 36. Nombre de jours où la température est supérieure à 32°C ou inférieure à 10°C durant la période de pré-anthèse sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie.

	Capitale-Nationale				
	1970-1999	2041-2070		Différence (jours)	
	Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile	25 ^e centile	75 ^e centile
Tmax > 32 °C	0	0.3	0.6	+0.3	+0.6
Tmin < 10 °C	2.7	1.4	1.6	- 1.3	- 1.1
Lanaudière					
Tmax > 32 °C	0.1	0.3	0.7	+0.2	+0.6
Tmin < 10 °C	3.5	1.8	2.1	- 1.7	- 1.4
Montérégie					
Tmax > 32 °C	0.2	0.4	0.8	+0.2	+0.6
Tmin < 10 °C	1.6	1.6	1.8	0	+0.2

Comme on le constate dans le Tableau 36, les changements climatiques risquent de faire augmenter le nombre de jours où la température est supérieure à 32°C (de 0.2 à 0.6 jour de plus pour trois régions étudiées) pour la période de pré-anthèse. Cela risque de réduire la production de spores dans les trois régions.

Le nombre de jours où la température descend sous les 10°C pendant la période de pré-anthèse risque pour sa part de diminuer pour les régions plus au nord, alors que vers le sud, les conditions demeurent inchangées et le nombre de jours a même tendance à s'élever. Les journées où la température est inférieure à 10°C risquent de diminuer de près de moitié pour les régions plus au nord, passant de 2.7 à 1.4 jours dans la Capitale-Nationale et de 3.5 à 1.8 jours dans Lanaudière, augmentant possiblement la production d'inoculum. Pour la

Montérégie, le nombre de jours demeure pratiquement inchangé, et risque même d'augmenter légèrement.

En somme, puisqu'on prévoit de légères augmentations et de légères diminutions des conditions favorables et défavorables dans chaque région, il est difficile de se prononcer sur l'impact sur la production des spores dans l'horizon 2041-2070.

Précipitations

Comme pour la température, le nombre de jours où les précipitations risquent d'être supérieures à 5 mm, donc favorables à la dispersion des spores, est calculé en fonction de la durée de la période de pré-anthèse pour chaque région administrative.

Tableau 37. Nombre de jours où les précipitations sont supérieures à 5 mm durant la période de pré-anthèse sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie.

	Période de pré-anthèse				
	1970-1999	2041-2070		Différence (jours)	
	Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile	25 ^e centile	75 ^e centile
Capitale-Nationale	2.1	1.8	2.2	- 0.3	+ 0.1
Lanaudière	1.9	1.8	1.8	- 0.1	- 0.1
Montérégie	1.8	1.4	1.5	- 0.4	- 0.3

Pour les trois régions, le nombre de jours où les accumulations de pluie dépasseront les 5 mm pendant la période de pré-anthèse risque de diminuer pour l'horizon 2041-2070. La différence de jours entre le climat du passé récent et le climat futur se situe entre 0.1 et 0.4 jour et est plus marquée pour la région de la Montérégie que pour les deux autres régions (Tableau 37). Ces différences sont minimes et il est difficile de prédire si la dispersion des spores sera limitée par ces variations de précipitations dans le futur. Si c'est le cas, il y a aurait limitation des infections, et ce, même si la production d'inoculum est plus importante.

5.4.2.2. Période de l'anthèse

Le blé devient particulièrement susceptible à l'infection par les spores de fusariose du début à la fin de la floraison, soit des stades de Zadoks de 61 à 69 (Pugh *et coll.*, 1933). L'infection est surtout influencée par les précipitations et la température en fonction du stade de développement du blé. Les précipitations contribueront à maintenir l'humidité sur les plants, favorisant l'infection du blé par la fusariose. Des températures excédant 30 ou 32 °C ou se trouvant sous les 9 °C réduiront quant à eux le développement du champignon et l'infection (Lacey *et coll.*, 1999).

Hooker *et coll.* (2002), ont déterminé que des températures supérieures à 32 °C durant la période d'anthèse, soit la période de sensibilité à l'infection, auront un impact négatif sur les niveaux de DON dans les grains, alors que des précipitations de 3 mm et plus favoriseront le développement de la toxine. Ces deux paramètres climatiques ont donc été calculés pour cette période. Le nombre de jours où la température est inférieure à 10 °C a aussi été calculé dans la présente étude.

Début de la période

Pour les trois régions à l'étude, le début de la période de l'anthèse est devancé de 9 à 13 jours avec les changements climatiques (Tableau 38).

Tableau 38. Dates de début de la période d'anthèse sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie.

	Période de l'anthèse				
	1970-1999	2041-2070		Différence (jours)	
	Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile	25 ^e centile	75 ^e centile
Capitale-Nationale	4-juillet	21-juin	25-juin	-13	-9
Lanaudière	2-juillet	19-juin	23-juin	-13	-9
Montérégie	22-juin	9-juin	13-juin	-13	-9

Durée de la période

La durée de la période d'anthèse est de cinq jours pour le climat de référence et la moyenne pour les 30 années du climat futur (2041-2070) est aussi de cinq jours, et ce pour les neuf scénarios climatiques. Il n'y a donc pas de variation dans la durée de la période d'anthèse en fonction des changements climatiques.

Température

Le nombre de jours où la température est supérieure à 32°C pendant la période d'anthèse risque d'être légèrement plus élevé dans l'horizon 2041-2070, comparativement aux températures des conditions actuelles, et ce pour les trois régions, avec une augmentation allant de 0.2 à 0.5 jour.

Le nombre de jours où la température se trouvera sous la barre des 10°C pendant la période d'anthèse risque pour sa part d'être réduit dans les mêmes proportions (0.2 à 0.5 jours), avec des réductions moindres pour la région de la Montérégie (Tableau 39).

En somme, il est difficile de prévoir l'impact des températures sur les taux d'infection étant donné les variations favorables et défavorables pour les trois régions à l'étude.

Tableau 39. Nombre de jours où la température est supérieure à 32°C ou inférieure à 10°C durant la période d'anthèse sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie.

	Capitale-Nationale				
	1970-1999	2041-2070		Différence (jours)	
	Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile	25 ^e centile	75 ^e centile
Tmax > 32 °C	0.1	0.3	0.6	+0.2	+0.5
Tmin < 10 °C	1	0.6	0.7	-0.4	-0.3
Lanaudière					
Tmax > 32 °C	0.1	0.4	0.6	+0.3	+0.5
Tmin < 10 °C	1.4	0.9	1.2	-0.5	-0.2
Montérégie					
Tmax > 32 °C	0.1	0.4	0.6	+0.3	+0.5
Tmin < 10 °C	0.9	0.7	0.9	-0.2	0

Précipitations

Une diminution du nombre de jours avec des précipitations dépassant les 3 mm pendant la période d'anthèse est prévue pour le climat futur, ce qui risque de nuire à l'infection et conséquemment de réduire les niveaux de mycotoxine dans les grains. Dans les conditions actuelles et pour les trois régions, on compte entre 1.4 et 1.8 jour de pluie sur cinq jours durant la période de l'anthèse alors qu'avec les changements climatiques, on peut s'attendre à une légère diminution de 0.1 à 0.3 jours (Tableau 40).

Tableau 40. Nombre de jours où les précipitations sont supérieures à 3 mm durant la période d'anthèse sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie.

	Période de l'anthèse				
	1970-1999	2041-2070		Différence (jours)	
	Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile	25 ^e centile	75 ^e centile
Capitale-Nationale	1.8	1.5	1.7	- 0.3	- 0.1
Lanaudière	1.7	1.4	1.5	- 0.3	- 0.2
Montérégie	1.4	1.2	1.4	- 0.2	0

5.4.2.3. Période de post-anthèse : Développement de la toxine

Durant la période de post-anthèse, le blé devient moins sensible à l'infection. Toutefois, le nombre de jours où la température est supérieure à 32°C pendant la période de post-anthèse demeure donc un critère important et Hooker *et coll.* (2002) l'ont aussi retenu comme facteur influençant les niveaux de DON dans les grains.

Début de la période

Le début de la période de post-anthèse risque d'être devancé de près de deux semaines pour les trois régions avec une différence entre 10 et 14 jours pour la Montérégie et la Capitale-Nationale, et une différence comprise entre 13 et 9 jours pour Lanaudière (Tableau 41).

Tableau 41. Dates de début de la période de pré-anthèse sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie.

	Période de post-anthèse				
	1970-1999	2041-2070		Différence (jours)	
	Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile	25 ^e centile	75 ^e centile
Capitale-Nationale	11-juillet	27-juin	1 ^{er} -juillet	-14	-10
Lanaudière	8-juillet	25-juin	29-juin	-13	-9
Montérégie	29-juin	15-juin	19-juin	-14	-10

Durée de la période

Comme démontré dans le tableau 42, on prévoit une diminution de la période de post-anthèse d'un jour ou deux avec les changements climatiques, réduisant légèrement la période de sensibilité à l'infection.

Tableau 42. Durée de la période de post-anthèse sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie.

	Période de post-anthèse		
	1970-1999	2041-2070	Différence (jours)
	Moyenne	Moyenne	
Capitale-Nationale	17	15	-2
Lanaudière	16	15	-1
Montérégie	16	15	-1

Température

Tout comme pour les autres périodes phénologiques, une augmentation du nombre de jours avec des températures supérieures à 32°C pendant la période de post-anthèse est à prévoir pour le climat de l'horizon 2041-2070. La différence de jour est toutefois beaucoup plus grande pour la période de post-anthèse, puisque la durée de cette période est relativement longue (15 jours en moyenne pour l'horizon 2041-2070) On observe donc des augmentations allant jusqu'à 2.8 jours de plus sur 15 dans Lanaudière (Tableau 43).

Comme pour les autres périodes, ces augmentations de température et la diminution de la durée de la période risquent d'être défavorables au développement du champignon et au niveau de mycotoxines dans les grains.

Tableau 43. Nombre de jours où la température est supérieure à 32°C durant la période de post-anthèse sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie.

	Période de post-anthèse				
	1970-1999	2041-2070		Différence (jours)	
	Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile	25 ^e centile	75 ^e centile
Capitale-Nationale	0.2	1.4	2.4	+1.2	+2.2
Lanaudière	0.2	1.5	3	+1.3	+2.8
Montérégie	0.3	1.5	3	+1.2	+2.7

5.4.2.4. Période pré-récolte : Développement de la toxine

Lors de la période de pré-récolte, l'augmentation des précipitations risquerait d'augmenter la production de la mycotoxine dans les grains.

Début et durée de la période

La période de pré-récolte risque de se dérouler jusqu'à 15 jours plus tôt pour les trois régions étudiées et sa durée de diminuer d'un jour avec les changements climatiques (Tableau 44 et 45).

Tableau 44. Dates de début de la période de pré-récolte sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie.

	Période de pré-récolte				
	1970-1999	2041-2070		Différence (jours)	
	Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile	25 ^e centile	75 ^e centile
Capitale-Nationale	27-juillet	12-juillet	16-juillet	-15	-11
Lanaudière	25-juillet	10-juillet	14-juillet	-15	-11
Montérégie	15-juillet	30-juin	5-juillet	-15	-10

Tableau 45. Durée de la période de pré-récolte sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie.

	Période de pré-récolte			
	1970-1999	2041-2070		Différence (jours)
	Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile	25 ^e et 75 ^e centile
Capitale-Nationale	10	9	9	-1
Lanaudière	10	8	9	-2 et -1
Montérégie	9	8	8	-1

Précipitations

On prévoit une diminution du nombre de jours où les précipitations seront inférieures à 3 mm pendant la période de pré-récolte pour l'horizon 2041-2070. Ces prévisions demeurent toutefois modestes avec une réduction variant entre 0.2 et 0.9 jour sur huit ou neuf jours pour la période de pré-récolte. Cela risque donc d'avoir peu d'effet sur le développement de la mycotoxine (Tableau 46).

Tableau 46. Nombre de jours où les précipitations sont supérieures à 3 mm durant la période de pré-récolte sous le climat de référence (1970-1999) et futur (2041-2070) pour les régions de la Capitale-Nationale, de Lanaudière et de la Montérégie.

	Période de pré-récolte				
	1970-1999	2041-2070		Différence (jours)	
	Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile	25 ^e centile	75 ^e centile
Capitale-Nationale	3.6	2.7	2.9	- 0.9	- 0.7
Lanaudière	3.2	2.4	2.9	- 0.8	- 0.3
Montérégie	2.8	2.4	2.6	- 0.4	- 0.2

5.4.2.5. Conclusion de la modélisation pour la fusariose de l'épi

Durant la période de **pré-anthèse**, des températures plus chaudes (au-dessus de 10° C), mais dépassant rarement les 32°C, pourraient être favorables à la maturation des spores. On note aussi une légère diminution du nombre de jours avec des précipitations supérieures à 5 mm, ce qui pourrait restreindre la dispersion des spores.

Durant l'**anthèse**, on note aussi une légère diminution des précipitations, ce qui pourrait, dans ce cas-ci, nuire à l'infection par les spores. On note toutefois peu de variations au niveau de la température.

Les hausses de température dépassant les 32 °C durant la période de **post-anthèse** pourraient nuire à la fusariose, en limitant le développement de la mycotoxine dans les grains. La diminution des précipitations durant la période de **pré-récolte** pourrait aussi nuire au développement de la mycotoxine dans les grains.

En somme pour les trois régions, les variations de température et de précipitations prévues pour l'horizon 2041-2070 risquent surtout de nuire au développement de la fusariose et de la mycotoxine dans les grains, sauf lors de la période de pré-anthèse où on prévoit des températures moins froides qu'actuellement dans Lanaudière et la Capitale-Nationale, ce qui pourrait être favorable à la maturation de spores. Il faut toutefois noter que les résultats observés pour les trois régions ne présentent pas de variations très marquées des conditions climatiques pour le futur. De plus, on ne peut pas conclure au risque résultant de toutes ces variations puisqu'on ne connaît pas le poids de l'impact de chaque stade de développement de la fusariose sur la quantité totale de mycotoxine retrouvée dans les grains. Il est donc difficile de tirer des conclusions sur l'impact de ces variations. La similitude des résultats entre les trois régions permet toutefois de faire ressortir une certaine tendance des probabilités de conditions favorables et défavorables à la fusariose pour l'horizon 2041-2070 dans la province de Québec.

5.5. Synthèse des impacts des changements climatiques

5.5.1. Pyrale du maïs

Le tableau suivant présente les différents impacts provenant des analogues, de la modélisation et de la littérature et qui sont à considérer pour le Québec à l'horizon 2050. Ce tableau permet de constater où la modélisation a permis de valider les résultats obtenus avec les analogues spatiaux et où elle est allée au-delà de la validation.

Tableau 47. Synthèse des impacts répertoriés dans la présente étude et dans la littérature pour la pyrale du maïs

Impacts potentiels	Démonstré par		
	Analogues spatiaux	Modélisation	Littérature
Impacts sur le ravageur			
Augmentation de l'aire de répartition de la pyrale			Porter <i>et coll.</i> 1991; Trnka <i>et coll.</i> 2007; Showers <i>et coll.</i> 1995
Augmentation de l'abondance de la race bivoltine (par une meilleure survie hivernale)			Trnka <i>et coll.</i> 2007;
Arrivée plus hâtive des adultes	✓	✓	
Augmentation du nombre de générations par année	✓	✓	Kocmankova <i>et coll.</i> 2011

Augmentation de la période de vulnérabilité du maïs sucré à la pyrale (stade 6-feuilles à a récolte)		✓	
Propension à attaquer d'autres cultures que le maïs (ex. : pomme de terre)	✓		
Impacts sur les méthodes de lutte			
Augmentation du nombre de traitements pesticides	✓		
Perte d'efficacité potentielle des pesticides (due aux hausses de températures)	✓		Musser et Shelton, 2005
Perte d'efficacité potentielle des méthodes de lutte biologique	✓		Thomson <i>et coll.</i> 2010
Diminution potentielle de la période d'intervention pour lutter contre l'ennemi		✓	
Augmentation de l'utilisation des organismes génétiquement modifiés	✓		

5.5.1.1. Impacts sur le ravageur

Les changements climatiques auront des répercussions sur la phénologie et l'abondance des populations de la pyrale du maïs au Québec. Le devancement de la saison de croissance modifierait les dates d'émergence des pyrales adultes vers des dates plus hâtives, et ce, autant pour la race univoltine que bivoltine. Les modèles climatiques ont permis de valider la plupart des impacts potentiels des CC provenant des régions analogues.

En Illinois, la région analogue à la Montérégie, la pyrale se développe entre 22 et 71 % plus rapidement que la race retrouvée au Québec. Les résultats de la modélisation prévoient aussi un développement plus rapide de la pyrale pour l'horizon 2041-2070. L'arrivée des adultes en Montérégie devrait être devancée de 14 à 17 jours pour la race univoltine. Pour la race bivoltine, elle devrait être devancée de 10 à 14 jours et de 21 à 27 jours pour la première et la deuxième génération.

Pour la région de New York, région analogue à la Capitale-Nationale, les dates d'émergence actuelles des adultes pour les races univoltine et bivoltine sont présentées dans le Tableau 48. On constate que les dates prévues par la modélisation pour l'horizon 2041-2070 sont très similaires à celles retrouvées présentement à New York, autant pour la race univoltine que pour la race bivoltine.

Tableau 48. Dates d'arrivée des adultes de la pyrale du maïs Race univoltine et bivoltine de l'État de New York pour le climat actuel et de la Capitale-Nationale pour le climat actuel (1970-1999) et futur (2041-2070).

Race	Capitale-Nationale			New York
	1970-1999	2041-2070		Actuelle
	Moyenne	25 ^e centile	75 ^e centile	Moyenne
Univoltine	31 juillet	11 juillet	16 juillet	Mi-juillet
Bivoltine F1	29 juin	14 juin	18 juin	Mi-mai/mi-juin
Bivoltine F2	16 sept	10 août	17 août	Fin juillet/fin août

Si la date de semis n'est pas ajustée (ou si elle ne peut être devancée dû aux pluies printanières limitant l'entrée au champ) les plants de maïs sucré seront moins développés au moment de la ponte et seront donc plus vulnérables à l'attaque des larves de pyrale du maïs. Le maïs sucré devient également vulnérable à la pyrale à partir du stade 6-feuilles jusqu'au moment de la récolte. Avec un devancement de la date de semis, cette période de vulnérabilité du maïs sucré à la pyrale serait allongée de deux semaines en Montérégie et dans la Capitale-Nationale, selon les résultats de la modélisation.

L'augmentation des températures favoriserait aussi les densités de population de la race bivoltine en améliorant sa survie hivernale. La densité de population de la première génération de cette race est souvent beaucoup plus faible que la deuxième génération. Cette différence s'explique par une forte mortalité hivernale qui diminue les populations émergentes au printemps. Une hausse des températures hivernales augmenterait probablement la survie de la première génération de la race bivoltine, engendrant ainsi des interventions de contrôle supplémentaires sur cette génération et la suivante. La survie hivernale risque toutefois d'être réduite si des dégels surviennent durant l'hiver, diminuant la couverture nivéale.

Les populations de la race univoltine se sont vues déplacées vers le nord par la race bivoltine depuis quelques années (Showers *et coll.*, 1995). Depuis son introduction en Ontario et dans l'état de New York dans les années 1920, la race bivoltine s'est dispersée d'environ 32 km/an. Le cumul de degrés-jours limite son développement dans les régions plus au nord et cette race n'arrivait pas à s'implanter dans ces régions. Or, les hausses de température risquent de changer la donne en permettant maintenant à cette race de compléter sa deuxième génération et de survivre aux hivers plus rigoureux de ces régions. Les résultats de la modélisation ne prévoient toutefois pas que la race univoltine de la Capitale-Nationale puisse compléter une deuxième génération dans un climat futur, étant donné les dates trop tardives d'émergence des œufs de la seconde génération.

À l'intérieur des régions analogues à la Montérégie, la race univoltine est inexistante, laissant place uniquement à la race bivoltine. Cette situation pourrait sembler avantageuse pour les producteurs puisque la gestion du ravageur ne se ferait qu'à deux moments au cours de la saison de croissance plutôt qu'à trois lors de la présence connexe des races univoltine et bivoltine. Toutefois, la race bivoltine dans les régions analogues à la Montérégie peut compléter jusqu'à trois générations par année. La gestion du ravageur est donc tout aussi intense au cours de la saison de croissance. Les résultats de la modélisation pour la Montérégie prévoient d'ailleurs la possibilité d'une deuxième génération complète de la race univoltine (si la diapause n'est pas obligatoire chez celle-ci) et d'une troisième génération partielle pour la race bivoltine, et ce, à condition que la culture s'étende à des dates plus tardives, soit à la mi-octobre (Tableau 34, section 5.5).

Par ailleurs, le contrôle de cette race pourrait devenir plus problématique dans le futur puisque les hausses de densité augmenteraient la pression exercée par une population partageant un bagage génétique similaire. Or, cette population pourrait s'adapter plus rapidement aux méthodes de contrôle, tels les insecticides, les méthodes alternatives et les cultivars résistants. Au niveau des analogues spatiaux de la région de la Capitale-Nationale, la race univoltine est toujours présente dans les régions analogues plus au nord. Il est donc probable que la région de la Capitale-Nationale continue à gérer le problème des deux races de pyrale au cours de la saison de croissance.

Dans les cas de sécheresse, la pyrale du maïs pourrait être moins attirée par le maïs sucré puisque ce dernier offre un habitat plutôt sec (à moins qu'il ne soit irrigué). La pyrale peut

donc se retourner vers les plants de pommes de terre qui offrent un couvert végétal beaucoup plus dense et beaucoup plus humide. Il est donc important de considérer que si les précipitations sont plus faibles dans le futur, le ravageur pourrait attaquer d'autres cultures pour lesquelles il n'est actuellement pas une problématique.

5.5.1.2. Impacts sur les méthodes de contrôle

Les insecticides de la classe des pyréthroïdes synthétiques sont les plus efficaces et les plus utilisés aux États-Unis pour lutter contre la pyrale du maïs. Bien qu'il n'y ait pas de cas de résistance à ces insecticides pour l'instant, il est primordial de détenir une alternative pour assurer l'efficacité de ce groupe de produits à long terme, surtout si le nombre de traitements requis par saison augmente avec l'augmentation de la densité des populations et l'augmentation du nombre de générations. Les hausses de température semblent également diminuer la fenêtre d'action où le producteur peut intervenir pour contrôler le ravageur. En effet, les températures élevées accélèrent le développement de la pyrale, et, puisque le stade d'intervention pour ce ravageur se situe entre le stade œuf et les deux premiers stades larvaires (par la suite les larves pénètrent la plante et ne sont plus accessibles pour le traitement insecticide), le moment d'intervention peut devenir très court. Les résultats de la modélisation supposent d'ailleurs une diminution de la durée de la période d'intervention au champ, en la diminuant d'une journée pour les premières générations d'univoltine et de bivoltine, et d'une semaine pour la deuxième génération de bivoltine.

Par ailleurs, selon des chercheurs de l'université de Cornell, les températures élevées diminueraient l'efficacité des pyréthroïdes synthétiques, et ce, de façon plus marquée que chez d'autres classes de pesticides (Musser et Shelton, 2005). Par exemple, pour obtenir un effet toxique similaire, la concentration d'un insecticide de cette classe (par exemple : Warrior) doit être 13,6 fois supérieure à des températures de 35 °C comparativement à 24 °C (Musser et Shelton, 2005).

Les producteurs biologiques semblent inquiets de la situation puisqu'ils perçoivent une diminution du contrôle exercé par les trichogrammes depuis quelques années. Certains songent même à changer de pratique, étant donné la faible rentabilité de la technique. Les doses utilisées chez certains producteurs sont quelquefois le double de ce que le fournisseur recommande et l'efficacité des trichogrammes demeure toujours insuffisante. Il serait pertinent de travailler sur la mise en place d'une charte d'intervention permettant aux utilisateurs d'ajuster les doses de trichogrammes à utiliser tout au long de la saison et selon le niveau d'infestation par la pyrale du maïs dans leurs champs (Étilé *et coll.*, 2011). L'efficacité et les bénéfices de la technique pourraient ainsi être augmentés.

Les hausses de température pourraient avoir un effet néfaste sur les taux de parasitismes des trichogrammes, en diminuant la fécondité, en altérant la localisation de l'hôte ou en réduisant la durée de vie du trichogramme (Thomson *et coll.*, 2010). Les espèces de trichogrammes utilisées présentement dans la culture du maïs sucré au Québec (*Trichogramma brassicae* et *T. ostrinia*) représentent les parasitoïdes les mieux adaptés pour contrôler la pyrale du maïs dans le climat actuel. Toutefois, dans un contexte de changements climatiques, il sera pertinent de revoir les espèces les mieux adaptées pour contrôler ce ravageur sous des conditions plus chaudes puisque la réponse thermique est très variable entre les espèces de trichogrammes (Carrière et Boivin, 1997). Par exemple, alors que le taux de parasitisme chez *T. brassicae* chute considérablement lorsque les températures passent au-dessus de 30°C, d'autres espèces peuvent performer aussi bien à une température de 35°C (Boivin, *comm. pers.*).

La technologie Bt qui est utilisée aux États-Unis depuis quelques années sur le maïs sucré pourrait faire son entrée dans la production québécoise. Bien que cette solution puisse sembler une panacée pour certains, cette technologie nécessite toutefois deux à quatre traitements insecticides dans les régions analogues lors d'infestations sévères pour assurer une bonne qualité du produit. Alors que le contrôle de la pyrale du maïs est pratiquement total, pour la légionnaire d'automne ainsi que pour le ver de l'épi, le contrôle peut diminuer avec le développement de la plante. L'expression des toxines dans la région des soies diminue lorsque ces derniers débutent leur brunissement. Or, cet îlot de ponte permet à la légionnaire d'automne ainsi qu'au ver de l'épi d'infester de 20 à 30 % des épis Bt lors d'infestations sévères, en alourdissant les bilans en conditions de stress hydrique et thermique.

Par ailleurs, nous devons demeurer prudents face à cette technologie qui pourrait être contournée par des cas de résistance. Les cas de résistance au Bt se limitaient en 2010 à cinq espèces depuis les 14 dernières années d'utilisation, suggérant une certaine efficacité de la stratégie de refuge pour retarder le développement de résistance (Carrière *et coll.*, 2010). Toutefois, un délai se voit habituellement entre le moment d'introduction d'une nouvelle molécule et le développement de résistance. Par exemple, le développement de résistance au DDT ne s'est vu qu'après 10 ans de commercialisation. Aussi, les grandes superficies de maïs-grain Bt augmentent les possibilités de contournement de résistance en intensifiant la pression de sélection. Une étude évaluant la génétique des populations de la pyrale du maïs conclut que si un cas de résistance devait se développer pour cette espèce, la résistance prendrait de l'expansion très rapidement étant donné son haut flux génétique (l'échange des gènes entre différentes populations) (Kim *et coll.*, 2011). Les refuges de maïs conventionnel ainsi que les autres cultures hôtes non transgéniques (pomme de terre, haricot, poivron) sont donc jusqu'à présent nos seuls alliés pour retarder ce développement de résistance. Il est donc primordial de posséder plusieurs armes en réserve pour faire face à cette problématique.

5.5.2. Fusariose de l'épi

Le tableau suivant présente les différents impacts provenant des analogues, de la modélisation et de la littérature et qui sont à considérer pour le Québec à l'horizon 2050. Ce tableau permet de constater où la modélisation a permis de valider les résultats obtenus avec les analogues spatiaux et où elle est allée au-delà de la validation.

Tableau 49. Synthèse des impacts répertoriés dans la présente étude et dans la littérature pour la fusariose de l'épi.

Impacts potentiels	Démonstré par		
	Analogues spatiaux	Modélisation	Littérature
Impacts sur le ravageur et la culture du blé			
Arrivée plus hâtive de l'ennemi			Madgwick <i>et coll.</i> , 2011
Augmentation de la densité de la population ou de l'intensité des infestations	✓		Madgwick <i>et coll.</i> 2011; Del Ponte <i>et coll.</i> 2011
Augmentation de la maturation des spores durant la pré-anthèse (↗ température)		✓	
Diminution de la dispersion des spores durant la pré-anthèse (↘ précipitations)		✓	
Diminution des risques d'infection et de la production de mycotoxine durant la post-anthèse (↗ température)		✓	
Diminution du risque d'infection et du développement de la mycotoxine durant l' anthèse et la pré-récolte (↘ précipitations)		✓	
Établissement de la culture du blé d'hiver	✓		
Augmentation du risque d'infection durant la floraison due aux pluies printanières	✓		
Perturbation de l'entrée au champ au printemps due à l'augmentation des pluies printanières	✓		
Impacts sur les méthodes de lutte			
Augmentation des superficies traitées à l'aide d'un fongicide	✓		
Augmentation de la difficulté à prédire les risques d'infection en fonction des précipitations	✓		
Perturbation de l'entrée au champ au printemps due à l'augmentation des pluies printanières	✓		

5.5.2.1. Impacts sur l'agent pathogène

Malgré que la maladie soit présente depuis de nombreuses années et qu'elle soit bien documentée pour les épidémies passées, l'intensité des épidémies demeure généralement toujours aussi élevée aux États-Unis (Kriss *et coll.*, 2010). Dans les régions analogues à la Montérégie, l'Illinois et l'Ohio, l'incidence de la fusariose est de plus en plus importante depuis les dix dernières années. En Pennsylvanie, région analogue au Bas-Saint-Laurent, les trois dernières années ont été les pires (2009 à 2011), alors qu'au Wisconsin, on compte d'une à quatre épidémies aux huit ans. À chaque épidémie, c'est en moyenne entre 50 et 60 % du blé qui atteint des niveaux de DON au-dessus de 1 ppm. Le blé d'automne est prédominant dans les champs, entre autres parce que l'accès au champ pour le semis de printemps est trop difficile dû aux pluies printanières.

On pourrait croire que les hausses de températures prévues d'ici 2050 risquent d'accroître les possibilités d'épidémies de fusariose puisque les périodes plus chaudes augmenteraient la production d'inoculum, la germination et la croissance du champignon et ultimement, la production de mycotoxines. Il est vrai que la fusariose est un organisme performant mieux à des températures élevées, sauf si celles-ci excèdent les 32 °C. Les résultats de la modélisation prévoient d'ailleurs une diminution du nombre de jours sous la barre des 10 °C lors de la période de pré-anthèse, ce qui pourrait favoriser la maturation des spores. Ces résultats prévoient toutefois une augmentation des températures au dessus de 32 °C lors de la période de post-anthèse, risquant donc de diminuer l'infection par les spores et la production de la mycotoxine.

Par ailleurs, les producteurs sèment actuellement le blé le plus tôt possible pour éviter que la culture ne soit exposée à des températures élevées durant la période de floraison. Or, les hausses de température rendraient cette pratique inefficace, d'autant plus que l'augmentation des précipitations printanières perturberait l'entrée au champ lors du semis. La survie hivernale du champignon serait améliorée sous un climat plus clément, et la quantité d'inoculum au sol n'en serait qu'amplifiée. Les changements climatiques risquent donc de rendre la fusariose de l'épi plus performante et dommageable en optimisant les conditions nécessaires à son développement durant la période de floraison et en augmentant son taux de survie hivernal. Il est à noter toutefois que les hausses de températures hivernales pourraient éventuellement permettre l'établissement de la culture du blé d'hiver. Cette culture permettrait une floraison beaucoup plus tôt en saison et ne nécessiterait pas d'entrée au champ durant la saison pluvieuse de printemps.

Pour les deux régions à l'étude, un accroissement du cumul de précipitations printanières était observé avec les changements climatiques. Cette hausse serait néfaste pour les cultures en augmentant le risque d'infection durant la période de floraison du blé et en retardant la date de semis du blé. C'est d'ailleurs pour ces raisons que les régions américaines analogues cultivent principalement du blé d'hiver afin d'éviter les risques plus tard en saison et limiter les entrées au champ au printemps. Par ailleurs, les précipitations estivales ne devraient pas augmenter pour les deux régions à l'étude. Les résultats de la modélisation prévoient même une diminution du nombre de jours où les précipitations sont supérieures à 5 mm lors de la pré-anthèse, ce qui pourrait nuire à la dispersion des spores. Ces résultats prévoient aussi une diminution des précipitations supérieures à 3 mm durant l'anthèse et avant la récolte, ce qui nuirait à l'infection et au développement de la mycotoxine.

5.5.2.2. Impact sur les méthodes de contrôle

L'efficacité des traitements fongicides est très variable et certains traitements peuvent n'avoir aucun impact sur le développement de la maladie s'ils ne sont pas appliqués au bon stade d'intervention (début floraison et mi-floraison). Certains producteurs doutent même de leur utilité et ne les incluent pas dans leurs mesures de gestion, alors que d'autres les appliquent chaque année par précaution. Or, si les risques d'épidémie s'intensifient avec les changements climatiques, il serait souhaitable de fournir un outil robuste pour la prise de décision d'appliquer ou non un fongicide, et ce, dans le but de réduire les charges de pesticides appliquées au champ. Le Réseau d'avertissements phytosanitaires du MAPAQ (RAP) publie des alertes tout au long de la saison de croissance pour indiquer les niveaux de risque de fusariose de l'épi. Ces niveaux sont établis selon les conditions climatiques des derniers jours et des prévisions météorologiques des prochains jours. Mais puisque les précipitations représentent le principal facteur influençant l'intensité des épidémies, il est

difficile d'effectuer des alertes générales pour une région donnée alors que l'on sait que les précipitations sont bien souvent localisées.

5.5.3. Doryphore de la pomme de terre

Le tableau 50 présente les différents impacts provenant des analogues et étant à considérer pour le Québec à l'horizon 2050.

Tableau 50. Synthèse des impacts répertoriés dans la présente étude et dans la littérature pour le doryphore de la pomme de terre

Impacts potentiels	Démonstré par	
	Analogues spatiaux	Littérature
Impacts sur l'ennemi		
Augmentation de l'aire de répartition du doryphore	✓	Baker <i>et coll.</i> 1984; Kocmankova <i>et coll.</i> 2011; Rafoss et Saethre, 2003
Augmentation du nombre de générations par année	✓	Kocmankova <i>et coll.</i> 2011
Migration au champ plus hâtive des adultes	✓	
Diminution de la densité de population (sensibilité au gel hivernal)	✓	
Impacts sur les méthodes de lutte		
Augmentation du nombre de traitements pesticides utilisés	✓	
Augmentation des cas de résistance aux insecticides	✓	

5.5.3.1. Impacts sur le doryphore de la pomme de terre

Selon les régions du Québec, nous pouvons observer une ou deux générations par année de doryphore de la pomme de terre. Cette tendance vers la deuxième génération est plus forte dans les régions plus au sud, laissant croire qu'un climat plus chaud permet le développement de la deuxième génération. Étant donné la situation du doryphore dans les régions analogues, il serait probable d'observer deux générations complètes de doryphore dans la région de Lanaudière et possiblement une troisième génération partielle dans la région de la Capitale-Nationale avec les changements climatiques. Les traitements insecticides réalisés dans les sillons risquent d'être efficaces contre la première génération, mais ne couvriraient pas les générations subséquentes. Ainsi, une plus grande quantité d'insecticides foliaires seraient nécessaire plus tard en saison.

Il faut par contre noter que les œufs du doryphore de la pomme de terre sont extrêmement sensibles au gel. Certaines populations ont quelques fois été complètement anéanties à la suite d'un gel tardif, comme cela a été le cas dans une région du Minnesota il y a quelques années (David Ragsdale, *communication personnelle*). Avec l'arrivée plus hâtive du

printemps, il ne serait pas impossible de voir l'émergence des adultes doryphores survenir plus tôt en saison.

5.5.3.2. Impacts sur les méthodes de contrôle

Le doryphore est un ravageur abondant où année après année, il est primordial d'intervenir pour assurer un bon rendement de la culture. La principale problématique se trouve dans la résistance du doryphore aux insecticides utilisés. Il n'est pas rare de voir apparaître de la résistance lorsque l'on utilise de façon récurrente la même classe d'insecticide. La première apparition de résistance a été rapportée en 1952 avec l'utilisation du DDT (Casagrande, 1987). Par la suite, d'autres résistances ont suivi avec le dieldrine en 1958, d'autres cas aux organochlorés ont suivi quelque temps après, pour finalement voir des cas de résistance pour certaines populations dans pratiquement toutes les classes d'insecticides (Figure 17) (Alyokhin *et coll.*, 2008; Alyokhin, 2009). Bien que les cas de résistance se retrouvent dans toutes les régions où l'on retrouve le doryphore de la pomme de terre, ils sont plus fréquents dans le Nord-Est des États-Unis, possiblement en raison de l'utilisation intensive d'insecticides, du manque de rotation des cultures et du climat favorable (Alyokhin, 2009).

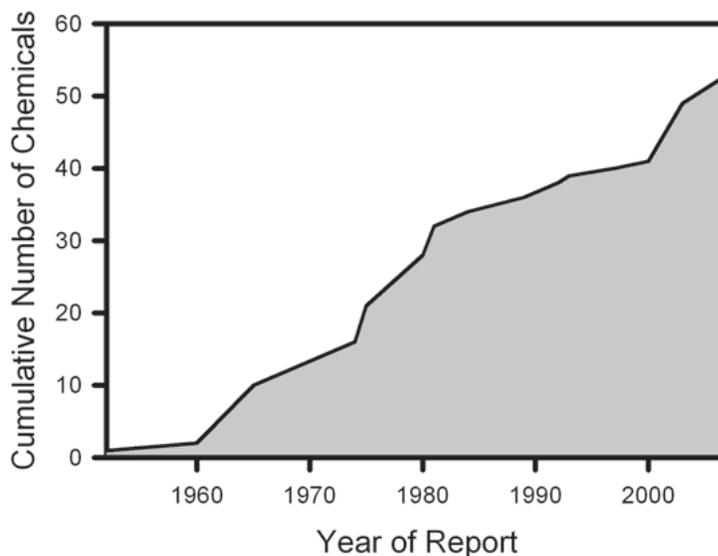


Figure 17. Nombre cumulé d'ingrédients actifs auxquels une résistance a été rapportée chez le doryphore de la pomme de terre. (Alyokin *et coll.*, 2008).

Plusieurs raisons peuvent expliquer la propension des doryphores de la pomme de terre au développement de résistance aux insecticides : i) le doryphore est pré-adapté à consommer des composés toxiques dans les plantes de la famille des Solanacées; ii) il possède une fécondité très élevée, augmentant ainsi les probabilités de mutation; et iii) sa diète restreinte ne permet pas à la population quelques refuges sans insecticides pour diluer le développement de la résistance (Alyokhin *et coll.*, 2008).

L'augmentation des températures pourrait accroître la vitesse de développement et le nombre d'applications d'insecticides pourrait de ce fait en être augmenté.

Les producteurs québécois de pommes de terre utilisent principalement les traitements de semences ou traitent directement dans les sillons. Les insecticides homologués pour cette

utilisation sont beaucoup moins nombreux que ceux disponibles pour les traitements foliaires. Pire, ils appartiennent tous au même groupe chimique, soit le 4A. Cette faible diversité limite le choix d'insecticides et ne permet pas de rotation efficace. Par ailleurs, les traitements de semences ou dans les sillons provoquent généralement plus de cas de résistance que les traitements foliaires. Ceci s'explique par le fait que la concentration du traitement diminue au fur et à mesure que la plante croît. Or, un insecte exposé à de faibles doses d'insecticide possède beaucoup plus de chance de développer une résistance étant donné la toxicité réduite à laquelle il est exposé. Déjà, plusieurs producteurs ont observé de la résistance aux imidacloprides et se sont tournés vers les nouvelles molécules clothianidine et thiaméthoxame. Toutefois, le développement de résistance à ces molécules par le doryphore de la pomme de terre n'est qu'une question de temps.

Le traitement de semence ou dans les sillons ne permet pas un contrôle efficace pour toute la durée de la saison de croissance de la pomme de terre. Bien souvent, les producteurs doivent appliquer un ou deux traitements insecticides foliaires afin de bien contrôler les doryphores un peu plus tard en saison. Les traitements dans les sillons procurent un contrôle allant de 80 à 90 jours suite au semis. En cas de résistance, le contrôle est diminué grandement et ne fonctionne plus que 50 à 60 jours. Ainsi, en considérant les risques de développement de résistance ainsi que l'augmentation du voltinisme du doryphore, le nombre de traitements foliaires risque d'augmenter dans la culture de la pomme de terre.

5.6 Vulnérabilités

5.6.1. Résultats des entrevues avec les producteurs et conseillers agricoles

Un compte-rendu complet des entrevues avec les producteurs et les conseillers agricoles se trouve à l'Annexe 6. Ce qui est présenté ici sont les vulnérabilités des producteurs par rapport à la situation actuelle, leurs inquiétudes face aux changements climatiques et les vulnérabilités face aux mesures de gestion.

5.6.1.1. Situation actuelle

Maïs sucré

La pyrale du maïs représente également l'ennemi principal du maïs sucré. Contrairement à la fusariose de l'épi, la pyrale est présente chaque année et les producteurs doivent absolument intervenir pour minimiser les dommages. Les insecticides sont les principaux outils utilisés pour lutter contre ce ravageur, suivi de quelques producteurs biologiques utilisant des trichogrammes. Les producteurs conventionnels sont généralement satisfaits du contrôle offert par les traitements insecticides. Ce sont surtout les producteurs biologiques qui peinent à offrir un produit comparable aux producteurs conventionnels. Le coût des trichogrammes est plus élevé que les insecticides et parfois les doses doivent être doublées lorsque les densités de pyrale sont élevées. Certains producteurs songent donc à utiliser les cultivars Bt qui ont fait leur entrée sur le marché québécois récemment. Leurs principales sources d'information sont le RAP, les conseillers agricoles et les journées d'information. Contrairement aux producteurs de blé, les producteurs de maïs sucré sont souvent de plus petits producteurs possédant peu de ressources (financière et humaine) pour réagir face aux problématiques.

Blé

La fusariose de l'épi représente le principal problème phytosanitaire dans la culture du blé. Cette maladie n'est pas toujours problématique d'une année à l'autre, puisqu'elle répond aux conditions climatiques. Les méthodes de contrôle tendent à réduire le risque, mais ne

l'éliminent pas complètement, surtout lorsque les conditions climatiques sont favorables au développement de la maladie. Il demeure donc beaucoup d'imprévisibilité quant au rendement du blé, et c'est pour cette raison que certains producteurs ont abandonné cette culture. La culture du blé est souvent perçue comme une culture de rotation, permettant de diminuer les risques phytosanitaires pour les cultures suivantes (principalement le maïs-grain et le soya) ainsi que pour réaliser des travaux de nivelage. Les producteurs ont su s'adapter à la problématique de la fusariose en utilisant des pratiques culturales ou des fongicides, mais ne se sentent pas totalement en contrôle avec cette maladie. Leurs principales sources d'information sont les conseillers agricoles, la presse spécialisée et le RAP. Ils sont d'ailleurs très bien entourés et soutenus par un vaste de gamme de professionnels.

5.6.1.2. Inquiétudes face aux changements climatiques

Maïs sucré

Les producteurs de maïs sucré semblent plus ou moins inquiets des changements climatiques et de leurs impacts probables sur leur culture. En leur exposant cinq défis agricoles, les producteurs plaçaient les changements climatiques à l'avant-dernière place. L'augmentation de la saison de croissance est toutefois bien vue pour la plupart, leur permettant d'espérer récolter un peu plus de maïs sucré qu'actuellement. Par ailleurs, certains croient que les modifications du climat ont pu accroître la densité des populations de la race bivoltine, mais les outils des producteurs conventionnels sont toujours aussi efficaces. Ce sont surtout les producteurs biologiques qui craignent une perte d'efficacité des trichogrammes dans le futur avec l'augmentation des températures. De façon générale, les producteurs sont aussi inquiets face à la hausse d'événements pluvieux durant le printemps, diminuant l'accessibilité au champ et provoquant des problèmes phytopathologiques lors de la levée.

Blé

Tout comme pour les producteurs de maïs, les producteurs de blé sont plus ou moins inquiets de l'impact probable des changements climatiques sur la culture du blé (défi venant également à la quatrième position). La plupart voient d'un bon œil le réchauffement du climat qui permettrait un accroissement de la culture du blé d'hiver, un blé offrant un plus grand rendement. Ils sont toutefois inquiets quant aux niveaux de précipitations qui semblent augmenter depuis les dernières années. Ces conditions favorisent le développement de la fusariose dans l'épi de blé. Les producteurs connaissent de façon générale la problématique des changements climatiques via leurs lectures dans les revues et journaux spécialisés, mais ne possèdent pas toujours une connaissance spécifique au secteur agricole.

5.6.1.3. Les mesures de gestion

Maïs sucré

Les producteurs désireraient que le nombre et l'efficacité des méthodes de lutte biologique soient bonifiés. L'efficacité des trichogrammes gagnerait à être améliorée, et un soutien aux producteurs devrait être offert lors de l'implantation de cette technique. D'autres sont confiants que de nouvelles molécules chimiques feront leur entrée sur le marché, et permettront ainsi de diminuer les risques de développement de résistance. Il serait toutefois nécessaire d'alléger les procédures d'homologation pour permettre une entrée plus rapide des pesticides ayant fait leurs preuves ailleurs. Les producteurs souhaiteraient pouvoir utiliser les cultivars transgéniques de maïs sucré, mais sont freinés par les craintes des consommateurs face à cette technologie. L'utilisation des cultivars Bt est envisageable au Québec dans la mesure où la population serait réceptive à ce genre de technologie. Toutefois, les cultivars disponibles pour l'instant ne représentent pas toujours les variétés les plus intéressantes pour le goût.

Une information neutre devrait être fournie aux producteurs et aux consommateurs afin de leur permettre de faire un choix éclairé quant à l'utilisation du Bt. Par ailleurs, l'augmentation probable du nombre de traitements insecticides risque d'engendrer plus de coûts pour les producteurs et le choix d'un cultivar transgénique plus dispendieux, mais offrant un bon contrôle sera beaucoup plus attrayant.

Blé

Les producteurs de blé souhaiteraient posséder de meilleurs outils pour contrôler la fusariose de l'épi. Les outils utilisés actuellement préviennent la maladie, mais aucun ne permet un contrôle efficace de la maladie. Premièrement, les fongicides disponibles ont souvent peu d'effet sur la fusariose de l'épi lorsque le risque est très élevé, et encore faut-il l'appliquer au bon moment (lors de la mi-floraison) pour offrir un bon contrôle lorsque les risques sont plus faibles. Par ailleurs, le développement de cultivars de blé résistants à la fusariose de l'épi serait souhaitable. Ceci permettrait de diminuer les traitements fongiques dans cette culture céréalière. Parmi les outils qui sont actuellement utilisés dans les régions analogues à la Montérégie (Illinois et Ohio), aucun ne semble applicable au Québec. L'utilisation de différentes dates de semis pour étaler le risque de fusariose (en ayant des dates de floraison différentes) n'est pas envisageable au Québec avec ses petites superficies de blé cultivées. Par ailleurs, l'utilisation de différents cultivars à maturités dissimilaires aurait plus de chance de s'intégrer au Québec, mais demanderait beaucoup plus de logistique pour l'entreposage des grains. L'outil interactif pour la prévision de risque est peu pertinent pour les producteurs. La plupart n'utilisent pas les informations météorologiques pour déterminer la justification d'un fongicide ou non. Les producteurs rencontrés utilisaient soit systématiquement un fongicide, ou n'en utilisaient aucun.

5.6.1.4. Synthèse des vulnérabilités soulevées par les producteurs

Les différentes vulnérabilités du secteur agricole face aux changements climatiques qui sont ressortis de ces entrevues sont regroupées dans le Tableau 51, en fonction du type de production (maïs sucré pour la pyrale et blé pour la fusariose).

Tableau 51. Vulnérabilités des producteurs et des conseillers agricoles face aux CC en fonction de l'ennemi ciblé.

Vulnérabilités des producteurs et conseillers agricoles face aux CC		
Vulnérabilités	Pyrale du maïs	Fusariose de l'épi
Actuelles		
Intensité des infestations de l'ennemi difficilement prévisible d'une année à l'autre		x
Absence de modèle prévisionnel pour le développement de l'ennemi		x
Méthodes de lutte actuelles ayant une efficacité de contrôle plus ou moins satisfaisante		x
Producteurs plus ou moins bien entourés de ressources humaines (conseillers agricoles)	x	
Faible capacité financière	x	
Les producteurs biologiques éprouvent des difficultés pour être compétitifs par rapport aux producteurs conventionnels	x	
Futures		
Développement de résistance aux moyens de lutte possible à court terme	x	
Perte d'accessibilité des terres au printemps due aux augmentations possibles des précipitations printanières	x	x

Maïs sucré

Les producteurs de maïs sucré sont relativement bien outillés pour faire face à la problématique actuelle de la pyrale du maïs. Plusieurs insecticides offrent un bon contrôle de la pyrale, mais certains faisant partie du groupe des pyréthroides synthétiques risquent d'être affectés par les hausses de température. Par ailleurs, les producteurs biologiques sont beaucoup plus vulnérables que les producteurs conventionnels, avec des méthodes de contrôle dont l'efficacité est variable d'une année à l'autre. L'utilisation des trichogrammes pourrait s'avérer plus complexe dans des conditions où les températures sont plus élevées et où les densités de pyrales sont plus grandes. Dans le même ordre d'idées, l'arrivée des cultivars transgéniques Bt sur le marché fait peur à plusieurs consommateurs. Dû à leur plus faible réseau avec des professionnels, les producteurs de maïs sucré sont plus vulnérables face aux modifications du climat.

Blé

La vulnérabilité des producteurs de blé face au climat est déjà tangible. Les méthodes de lutte disponibles ne font que diminuer les risques de fusariose, mais n'empêchent pas complètement son développement lorsque les conditions météorologiques y sont propices. Les changements climatiques pourraient accroître l'intensité des épidémies de fusariose dans le futur. La hausse des précipitations durant la période de floraison augmenterait possiblement les risques d'infection alors que les hausses de température et de concentration de CO₂ pourraient accroître les niveaux de mycotoxines (DON) chez le blé (l'étude de cas sur la fusariose de l'épi prévoit toutefois une diminution des précipitations). Par ailleurs, les producteurs de blé possèdent beaucoup de ressources humaines et financières, renforçant considérablement leur capacité d'adaptation aux changements climatiques.

5.6.2. Résultats des ateliers de consultations avec les intervenants en phytoprotection

Tel qu'énoncé à la section 4.6.2., deux ateliers de consultation ont eu lieu afin de présenter les résultats de l'analyse des vulnérabilités réalisée auprès des producteurs. Cela a permis d'évaluer qualitativement et de prioriser les principaux risques. Le tableau 52 présente les résultats de l'atelier avec le comité de suivi du projet alors que le tableau 53 présente ceux obtenus lors de l'atelier avec divers intervenants du secteur de la phytoprotection.

Les participants ont ajouté tour à tour des vulnérabilités à celles déjà présentées. Suite à leurs propositions, ils ont choisi de façon individuelle dix vulnérabilités qu'ils estimaient prioritaires et les ont classées en ordre d'importance.

À partir de la priorisation des vulnérabilités du premier tour de table, les dix premières ont été retenues (en jaune et orange dans les tableaux 52 et 53). Les participants ont choisi, de façon individuelle encore une fois, les cinq vulnérabilités qu'ils jugeaient les plus importantes parmi ces dix et les ont priorisées. Les résultats ont été compilés et les cinq vulnérabilités les mieux notées ont été retenues (en orange dans les tableaux 52 et 53).

Vulnérabilités face aux CC	Nombre de points Tour 1	Priorisation Tour 1	Nombre de Points Tour 2	Priorisation Tour 2
Producteurs agricoles	19	12		
	31	7	9	
	34	6	6	
	18	13		
	4	17		
	2	18		
	15	14		
	11	15		
	60	2	20	2
	40	5	12	4
Intervenants du secteur agricole	24	10	10	
	45	4	14	3
	29	8	4	
	21	11		
	24	9	5	
	50	3	11	5
	0	19		
	5	16		
	63	1	44	1

Tableau 52. Priorisation des vulnérabilités proposées par les producteurs lors des entretiens et par le comité de suivi du projet lors des ateliers de consultation.

vulnérabilités face aux CC		Nombre de points Tour 1	Priorisation Tour 1	Nombre de points Tour 2	Priorisation Tour 2
Producteurs agricoles	A) Absence ou perte des outils de lutte intégrée (ex: dépistage, seuil d'intervention, modèles prévisionnels)	25			
	B) Perte d'efficacité des méthodes de lutte conventionnelles et biologiques (ex. : augmentation de la résistance)	28	9	6	
	C) Manque de ressources humaines pour supporter les producteurs	50	5	38	2
	D) Faible capacité financière des producteurs pour assumer les risques liés au climat	21			
	E) Perturbations au niveau du calendrier agricole (ex: retard pour le semis dû aux pluies printanières)	1			
	F) Manque de coordination entre la recherche et développement et le transfert technologique	69	1	39	1
	G) Manque de flexibilité réglementaire général liée à l'introduction de nouveaux ennemis de culture	33	8	4	
	H) Manque de formation/expérience (lègue du savoir intergénérationnel) des producteurs et conseillers pour faire face au CC	51	4	23	
	I) Lacune au niveau de la formation universitaire/collegial en phytoprotection	0			
	J) Absence d'un processus de veille technologique au Québec et ailleurs (biologie, moyens de lutte potentiel)	59	2	26	5
Intervenants	K) Arrivée de nouveaux ennemis des cultures (particulièrement d'Asie)	8			
	L) Augmentation de la complexité des stratégies de lutte	22			
	M) Manque de concertation au niveau de la recherche	4			
	N) Sévérité accrue des problématiques actuellement marginales	1			
	O) Manque d'engagement/désengagement et manque de vision de la part de l'État	53	3	30	3
	P) Manque de service de deuxième ligne (personnes expérimentées sur le terrain) pour les nouveaux conseillers	48			
	Q) Manque de recherche en phytoprotection (manque de ressources humaines/chercheurs)	47	7	15	
	R) Manque d'extension entre la recherche et le terrain	10			
	S) Manque de proactivité face aux nouveaux ennemis des cultures	0			
	T) Manque de synthèse, d'intégration et de diffusion de l'information (vulgarisation)	28			
	U) Manque de compétences transversales	9			
	V) Manque de support financier pour les producteurs aux prises avec des EEE (situations d'urgence)	8			
	W) Manque de réseau de surveillance permanent pour les ennemis des cultures	17			
	X) Manque d'adaptation des modèles de gestion du risque pour les producteurs	5			
	Y) Manque d'intérêt de l'industrie pour les petits marchés	2			
	Z) Manque de diversité des méthodes de lutte et des approches	23			
	AA) Manque de développement d'outils de diagnostics sur le terrain et laboratoire (ex. : PCR)	20			
	BB) Spécialisation des cultures (diminution des rotations)	49	6	28	4
	CC) Dégradation de la qualité de l'environnement	15			
	DD) Manque d'études économiques globales	14			

Tableau 53. Priorisation des vulnérabilités proposées par les producteurs lors des entrevues et par divers intervenants du secteur de la phytoprotection lors des ateliers de consultation.

5.6.2.1. Synthèse des vulnérabilités retenues et proposées lors des ateliers de consultation

Comme on le voit dans les Tableaux 52 et 53, cinq vulnérabilités ont été retenues par les participants suite à la priorisation effectuée lors des deux différents ateliers. Le tableau suivant présente les cinq vulnérabilités retenues pour chacune des ateliers de consultation.

Les vulnérabilités proposées par les producteurs s'y retrouvent aussi. Lors de l'atelier de consultation avec les intervenants du secteur de la phytoprotection, les participants ont fusionné certaines vulnérabilités des producteurs et c'est pourquoi on n'en retrouve que cinq dans le Tableau 54.

Tableau 54. Résumé des vulnérabilités proposées par les producteurs et lors des ateliers de consultation

Vulnérabilités	Producteurs	Comité de suivi	Intervenants du secteur
LUTTE PHYTOSANITAIRE			
Arrivée de nouveaux ennemis des cultures		✓	
Adaptation des différents ennemis des cultures		✓	
Inefficacité des outils de lutte pour les nouveaux ennemis des cultures	✓	✓	
Manque de ressources humaines pour supporter les producteurs	✓		✓
Faible capacité financière des producteurs pour assumer les risques liés au climat	✓		
Perturbations au niveau du calendrier agricole (ex.: retard pour le semis dû aux pluies printanières)	✓		
Désengagement de l'État			✓
LUTTE INTÉGRÉE			
Absence ou perte des outils de lutte intégrée (ex.: dépistage, seuil d'intervention, modèles prévisionnels)	✓	✓	
Spécialisation des cultures			✓
RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT			
Manque de ressources (financières – humaines) disponibles pour développer des méthodes de lutte		✓	
Manque de coordination entre la recherche et développement (R&D) et le transfert technologique			✓
Absence d'un processus de veille technologique au Québec et ailleurs			✓

Vulnérabilités des producteurs versus celles des ateliers de consultation

Parmi les vulnérabilités mentionnées par les producteurs agricoles, deux ont été retenues par le comité de suivi, soit la perte d'outils de lutte intégrée et l'inefficacité des outils de lutte pour les nouveaux ennemis. Les producteurs avaient surtout ciblé des vulnérabilités touchant directement la production agricole (ex. méthodes de lutte actuelles plus ou moins efficace, perturbation au niveau du calendrier agricole) alors que le comité de suivi a plutôt ciblé des vulnérabilités concernant les intervenants du milieu (ex. manque de ressources disponibles pour développer des méthodes de lutte). Les intervenants du secteur ont conservé une seule vulnérabilité mentionnée par les producteurs, soit le manque de ressources humaines pour supporter les producteurs. On remarque la même tendance du côté des intervenants à prioriser des vulnérabilités se situant surtout au niveau gouvernemental ou technologique, plutôt qu'au niveau de la ferme.

Comparaison des vulnérabilités proposées en fonction des participants aux ateliers

En observant les vulnérabilités proposées lors des ateliers, il est possible de les diviser en trois groupes en fonction du secteur ciblé soit ; 1) la lutte phytosanitaire en général, 2) la lutte intégrée plus précisément et 3) la recherche et le développement (R&D).

Au niveau de la **lutte phytosanitaire**, le comité de suivi met surtout l'accent sur la vulnérabilité au niveau de l'entreprise agricole face à des changements chez les ennemis des cultures (arrivée de nouveaux ennemis, adaptation au climat des ennemis déjà présents, inefficacité des méthodes de lutte lors de l'arrivée de nouveaux ennemis). Les intervenants du secteur ont plutôt mis l'emphase sur les vulnérabilités au niveau de l'État dans un contexte de changements climatiques, en soulignant son désengagement face à la lutte phytosanitaire et le manque de ressources disponibles pour les producteurs.

Les deux groupes mentionnent des vulnérabilités face aux CC concernant la **lutte intégrée**. Le comité de suivi parle plutôt d'un manque de développement et d'adaptation du secteur de la phytoprotection tandis que les intervenants mettent surtout l'accent sur un manque d'adoption des méthodes de lutte intégrée par les producteurs agricoles (ex. une trop grande spécialisation des cultures). Le comité de suivi cerne donc un manque de volonté au niveau du gouvernement et au niveau de la recherche alors que les intervenants soulignent plutôt le manque de volonté de la part des producteurs agricoles.

Les vulnérabilités en **recherche et développement** ont aussi été abordées par les deux groupes lors des ateliers. Tout comme pour la lutte intégrée, le comité de suivi note un manque de ressources (humaines et financières) pour le développement de méthodes de lutte alors que les intervenants mentionnent des lacunes au niveau du transfert des connaissances vers les producteurs.

5.7. Mesures d'adaptation

5.7.1. Tirées des études de cas

Plusieurs mesures d'adaptation sont ressorties des études de cas lors de l'analyse de la situation dans les régions analogues et suite à la validation avec les modèles bioclimatiques. Elles ont été regroupées afin de s'appliquer au secteur de la phytoprotection en général (Mesures d'adaptation un à cinq ci-dessous) Voici une liste de ces différentes mesures d'adaptation avec la liste des mesures en fonction de l'ennemi étudié.

1) Disponibilité de cultivars adaptés aux nouvelles conditions

Fusariose de l'épi

- Choisir les cultivars de blé les plus résistants à la fusariose de l'épi.
- Cultiver le blé d'hiver afin d'éviter les travaux au printemps dans un contexte où les précipitations sont plus élevées.

2) Disponibilité d'outils de lutte intégrée adaptés aux nouvelles conditions (dépistage, seuil, modèles)

Pyrale du maïs

- Réaliser le dépistage plus tôt en saison pour mieux cibler la date de la première intervention de lutte.
- Assurer un suivi rigoureux du dépistage pour assurer un bon contrôle des pyrales lors du moment critique de contrôle (entre le stade œufs et le deuxième stade larvaire).
- Valoriser l'utilité de faire du dépistage pour faire un usage raisonné des insecticides.

Fusariose de l'épi

- Utiliser des outils pour mieux évaluer le risque de fusariose afin de limiter l'usage des fongicides.

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.

3) Développer une gestion des pesticides adaptée aux nouvelles conditions

Pyrale du maïs

- Valoriser l'utilité de faire du dépistage pour faire un usage raisonné des insecticides.
- Faire une rotation des insecticides afin de diminuer les risques de résistance.
- Utiliser les insecticides les plus sensibles à la température en début de saison.
- Répertorier la sensibilité aux températures élevées des insecticides utilisés au Québec.

Fusariose de l'épi

- Utiliser des outils pour mieux évaluer le risque d'infection de la fusariose afin de limiter l'usage des fongicides.

4) Offrir davantage de support aux producteurs pour l'utilisation de lutte antiparasitaire

Pyrale du maïs

- Effectuer un meilleur suivi auprès des producteurs pour l'utilisation des trichogrammes.
- Fournir une information claire et neutre par rapport à l'utilisation du maïs sucré Bt afin que les producteurs et les consommateurs puissent faire un choix éclairé.

Fusariose de l'épi

- Adopter les engrais verts ou les couverts végétaux pour limiter les éclaboussures contaminées de fusariose provoquées par les fortes pluies.

Doryphore de la pomme de terre

- Offrir davantage de support aux producteurs pour l'utilisation de lutte antiparasitaire
- Promouvoir les outils de lutte biologique

5) Effectuer un suivi de la résistance développée chez les ennemis des cultures

Pyrale du maïs et doryphore de la pomme de terre

- Posséder une bonne connaissance de la population locale par rapport à son adaptation climatique et phytosanitaire

Spécifiques à l'utilisation des trichogrammes pour la pyrale du maïs

- Effectuer un meilleur suivi auprès des producteurs pour l'utilisation des trichogrammes.
- Ajuster les doses relâchées de trichogrammes selon les densités de pyrale.
- Élaborer des projets de recherche pour optimiser la lutte biologique avec différentes espèces de trichogrammes mieux adaptées aux températures élevées.
- Promouvoir et faire connaître l'utilisation des trichogrammes comme méthode de lutte

5.7.2. Résultats des ateliers de consultation

Les ateliers de consultations ont aussi été l'occasion de faire ressortir différentes mesures d'adaptation pour le secteur de la phytoprotection. Comme pour la section 5.6.2., où sont présentées les vulnérabilités proposées lors des ateliers de consultation, les tableaux 55 et 56 présentent les mesures d'adaptation tirées des études de cas et celles proposées par les participants présents à ces ateliers ainsi que la priorisation qu'ils ont faite de celles-ci.

Il est à noter que lors de l'atelier avec le comité de suivi, un seul tour de table a été effectué (Tableau 55).

		Mesures d'adaptation		Nombre de points Tour 1	Priorisation Tour 1
Etude de cas	A) Disponibilité de cultivars adaptés aux nouvelles conditions			17	3
	B) Disponibilité d'outils de lutte intégrée adaptés aux nouvelles conditions (dépistage, seuil, modèles)			41	1
	C) Développer une gestion des pesticides adaptée aux nouvelles conditions (ex: rotation...)			4	9
	D) Offrir d'avantage de support aux producteurs pour l'utilisation de lutte antiparasitaire			10	5
	E) Effectuer un suivi de la résistance développée chez les ennemis des cultures			0	-
	F) Potentialité régionale des cultures/cultivars sous les nouvelles conditions climatiques			2	11
	G) Augmenter les ressources humaines et matérielles pour la R & D			24	2
	H) Observatoire de l'évolution du développement des ennemis actuels			3	10
	I) Réseau de détection d'arrivée de nouveaux ravageurs			11	4
	J) Pôle d'expertise pour assurer le transfert technologique (expertises: scientifique, agronomique, climatique, opérationnelle)			8	7
Intervenants	K) Mise à jour périodique (ex: 5 ans) des informations provenant des indices bioclimatiques			0	-
	L) Veille technologique des nouvelles méthodes de lutte dans les zones analogues			9	6
	M) Revoir la réglementation les programmes de soutien périodiquement en fonction de l'évolution des conditions			0	-
	N) Favoriser de façon législative ou économique les méthodes de lutte alternatives aux pesticides ou moins affectées par les CC			6	8

Tableau 55. Priorisation des mesures d'adaptation tirées des études de cas et proposées par le comité de suivi du projet lors des ateliers de consultation.

Mesures d'adaptation face aux CC		Nombre de points tour 1	Priorisation tour 1	Nombre de points tour 2	Priorisation tour 2
A) Disponibilité de cultivars adaptés aux nouvelles conditions (sélection traditionnelle)		13			
B) Disponibilité d'outils d'aide à la décision et de transfert d'informations adaptés aux nouvelles conditions (dépistage, seuil, modèles prévisionnels, utilisation des TIC)		78	3	56	1
C) Développer une gestion des pesticides adaptée aux nouvelles conditions (ex: rotation des herbicides)		2			
D) Offrir d'avantage de support (financier et humain) aux producteurs et aux conseillers (service d'extension) pour l'utilisation de lutte antiparasitaire		79	2	45	2
E) Augmenter le financement pour le dépistage (service-conseil)		38	10	avec B)	
F) Mettre en place des ressources (humaines et financières) et des structures qui permettent la concertation et l'optimisation des ressources en R&D, en transfert et en diffusion (pour une vision commune)		83	1	32	3
G) Mieux informer/sensibiliser/former les intervenants (producteurs/conseillers) en phytoprotection sur les impacts potentiels des CC sur les ennemis des cultures (synthèse des informations disponibles)		52	6	10	
H) Développement de technologies novatrices pour la réduction de l'usage de pesticides (ex. : agriculture de précision)		26			
I) Mieux connaître l'évolution du climat local et développer les réseaux de stations météo qui les supportent (ex. : réseau provincial collectif facilement accessible)		45	9	4	
J) Accroître la recherche (nombre de chercheurs, durée de financement, support scientifique) pour développer des méthodes de lutte intégrée et approfondir les connaissances sur les ennemis des cultures (ex. : systèmes culturaux)		70	5	28	4
K) Intensification des réseaux de surveillance (nombre de sites, financement et pérennité)		61	7	avec B)	
L) Mise en place d'un réseau de veille pour les EEE pour que l'information circule plus rapidement		16			
M) Suivi de la qualité des cours d'eau (indicateur des pratiques)		5			
N) Implanter et soutenir les méthodes de lutte intégrée en priorisant les moyens les plus efficaces (ex. : rotations des cultures, diversification, aménagement du territoire)		77	4	26	5
O) Documenter la rentabilité économique et environnementale des pratiques agricoles en amont de la production et au niveau des systèmes culturaux		45	8	7	
P) Augmenter la durée de financement accordé pour les programmes d'aide		22			
Q) Plus grande flexibilité réglementaire pour la recherche et pour la gestion de nouvelles problématiques liées aux CC		18			
R) Favoriser des projets-pilotes locaux et régionaux ou de sites de démonstration pour la lutte intégrée		25			
S) Mettre en place des mesures qui incitent à l'échange d'informations et la mise en commun des ressources		18			
T) Disponibilité de cultivars adaptés aux nouvelles conditions (OGM)		0			

Tableau 56. Priorisation des mesures d'adaptation tirées des études de cas et proposées par le comité de suivi du projet lors des ateliers de consultation.

5.7.3. Synthèse des mesures d'adaptation

Les différentes mesures d'adaptation qui ressortent de l'étude sont présentées au Tableau 57. Il est à noter que les mesures d'adaptation tirées des études de cas sont celles visant le secteur de la phytoprotection en général. Les mesures d'adaptation listées en fonction de l'ennemi se retrouvent toutefois à la section 5.7.1. Concernant les ateliers, ce sont les cinq mesures d'adaptation retenues par les participants qui sont présentées. Les mesures d'adaptation subséquentes peuvent être consultées aux Tableaux 55 et 56, à la section 5.7.2.

Tableau 57. Résumé des mesures d'adaptation

Vulnérabilités	Étude de cas sur les ennemis des cultures	Comité de suivi	Intervenants du secteur
LUTTE PHYTOSANITAIRE			
Offrir davantage de support (financier et humain) aux producteurs et aux conseillers (service d'extension) pour l'utilisation de lutte antiparasitaire	✓	✓	✓
Mettre en place un réseau de détection d'arrivée de nouveaux ravageurs		✓	
Effectuer un suivi de la résistance développée chez les ennemis des cultures	✓		
LUTTE INTÉGRÉE			
Développer une gestion des pesticides adaptée aux nouvelles conditions	✓		
Disponibilité d' outils de lutte intégrée adaptés aux nouvelles conditions (dépistage, seuil, modèles)	✓	✓	
Disponibilités d' outils d'aide à la décision et de transfert d'informations adaptés aux nouvelles conditions (dépistage, seuil, modèles prévisionnels, utilisation des Technologies de l'information et de la communication (TIC))			✓
Planter et soutenir les méthodes de lutte intégrée en priorisant les moyens les plus efficaces (ex. : rotations des cultures, diversification, aménagement du territoire)			✓
RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT			
Disponibilité de cultivars adaptés aux nouvelles conditions	✓	✓	
Accroître la recherche (nombre de chercheurs, durée de financement, support scientifique) pour développer des méthodes de lutte intégrée et approfondir les connaissances sur les ennemis des cultures (ex.: systèmes culturaux)		✓	✓
Mettre en place des ressources (humaines et financières) et des structures qui permettent la concertation et l'optimisation des ressources en R&D, en transfert et en diffusion (pour une vision commune)			✓

Mesures d'adaptation tirées des études de cas

Sur les cinq mesures d'adaptation tirées des études de cas et présentées lors des ateliers de consultation, trois ont été retenues comme prioritaires par le comité de suivi du projet soit un meilleur support aux conseillers et aux producteurs, la disponibilité de cultivars adaptés aux nouvelles conditions et la disponibilité d'outils de lutte intégrée adaptés aux nouvelles conditions. Cette dernière mesure est la seule tirée des études de cas à avoir été retenue lors de l'atelier avec les intervenants du secteur de la phytoprotection. Les deux mesures suivantes n'ont pas été retenues lors des ateliers :

- Effectuer un **suivi de la résistance** développée chez les ennemis des cultures
- Développer une **gestion des pesticides** adaptée aux nouvelles conditions

Il est possible que ces deux mesures d'adaptation n'aient pas été retenues par les participants aux ateliers soit parce qu'elles ne touchent pas l'ensemble du secteur de la phytoprotection (ex. : Il n'y a pas de problèmes de résistance chez tous les ennemis) ou soit parce que d'autres mesures ont semblé prioritaires (ex. : favoriser et soutenir des méthodes de lutte intégrée au lieu de développer une meilleure gestion des pesticides). Ces mesures ont toutefois été retenues dans la formulation de recommandations pour l'élaboration d'une stratégie d'adaptation pour les cas étudiés, comme détaillé à la section 7.2.

Mesures d'adaptation en fonction des ateliers

Comme pour l'analyse des vulnérabilités, les mesures d'adaptation ont été divisées en fonction du sujet ciblé soit la lutte antiparasitaire, la lutte intégrée et la R&D.

Concernant la **lutte antiparasitaire** en général, les participants aux deux ateliers ont proposé d'offrir davantage de support (financier et humain) aux producteurs agricoles. Les intervenants spécifient qu'un meilleur support pour les conseillers agricoles en plus des producteurs est nécessaire pour faire face aux CC.

Le renforcement de la **lutte intégrée** fait également partie des mesures d'adaptation proposées lors des ateliers. Les deux groupes ont mentionné l'importance d'une meilleure disponibilité des outils d'aide à la décision adaptés aux nouvelles conditions tels que le dépistage, les seuils de tolérance et les modèles prévisionnels.

Pour ce qui est de la **recherche et du développement**, les deux groupes ont souligné un besoin d'augmenter les ressources, autant humaines que financières. Le comité de suivi recommande de façon plus précise le besoin de développer des cultivars résistants alors que du côté des intervenants, on parle plutôt d'augmenter la recherche au niveau de la lutte intégrée en général. Ceux-ci notent aussi le besoin d'une meilleure concertation entre les différents acteurs du secteur, par l'amélioration du transfert et de la diffusion des connaissances, pour une vision commune de la phytoprotection.

6. Conclusion et recommandations

6.1 Résumé des impacts, vulnérabilités et mesures d'adaptation

6.1.1. Synthèse des impacts des CC en fonction de l'ennemi étudié

Pyrale et doryphore

Pour la pyrale du maïs et le doryphore de la pomme de terre, les deux insectes à l'étude, on peut s'attendre à une augmentation du nombre de générations par année, particulièrement dans les régions situées plus au sud. Cela nécessitera une plus grande quantité d'insecticides plus tard en saison. Dans le cas du doryphore de la pomme de terre, cela risque d'augmenter le développement de résistance déjà problématique pour les producteurs.

On pourra aussi s'attendre à une arrivée plus hâtive de ces deux ravageurs dans la saison de culture. Si la date de semis n'est pas ajustée pour le maïs sucré, les plants risqueraient d'être moins développés au moment de la ponte, ce qui augmenterait leur vulnérabilité à la pyrale.

L'augmentation de température durant l'hiver pourrait aussi favoriser les populations de pyrale en augmentant leur survie hivernale. Toutefois, si des périodes de dégels surviennent durant l'hiver, la diminution de la couverture nivéale pourrait compromettre la survie hivernale de la pyrale du maïs, diminuant les populations de pyrale de la première génération au printemps. Ces augmentations de température risquent aussi d'accélérer le développement de l'insecte, diminuant entre autres la période d'intervention au champ. De plus, l'efficacité des insecticides risque d'être affectée, comme c'est déjà le cas aux États-Unis avec les pyréthroides dans le maïs. Les quantités d'insecticide requises pourraient être augmentées. L'efficacité des trichogrammes risque aussi d'être compromise, en fonction des espèces.

Une plus grande incidence des épisodes de sécheresse pourrait aussi inciter la pyrale à attaquer d'autres cultures telles que la pomme de terre ou le haricot, puisque le maïs offrirait un habitat trop sec pour la survie de l'insecte.

L'entrée des cultivars de maïs Bt sur le marché américain, causée par la pression exercée par la pyrale, n'ont pas empêché de faire de ce ravageur l'ennemi numéro un du maïs. Le développement du Bt dans le maïs sucré québécois est à prévoir, malgré les risques de développement de résistance et d'augmentation d'utilisation d'insecticides qui y sont actuellement associés aux États-Unis.

Fusariose de l'épi

Les hausses de température prévues avec les changements climatiques risquent d'augmenter la production d'inoculum, la germination et la croissance du champignon, augmentant subséquemment les concentrations de mycotoxines (DON) dans les grains. Les hausses de température au printemps couplée à l'augmentation des pluies printanières pourraient aussi empêcher les semis hâtifs en empêchant l'entrée aux champs. Les semis hâtifs permettent de diminuer l'intensité des infections durant la floraison, en évitant des températures trop élevées à ce moment du développement de la plante. Tout comme pour la pyrale, la hausse des températures en hiver pourrait permettre une meilleure survie hivernale du champignon, augmentant les quantités d'inoculum au sol. Ces hausses pourraient toutefois permettre d'introduire le blé d'hiver (si les hivers devenaient moins rigoureux), contournant ainsi le problème de l'entrée au champ au printemps.

La diminution des pluies estivales observée pourrait quant à elle être bénéfique à la culture de blé en diminuant le développement de la toxine dans les grains.

6.1.2. Les mesures d'adaptation versus les vulnérabilités

Les ateliers de consultations ont permis de conclure l'analyse des impacts, des vulnérabilités et des mesures d'adaptation du secteur climatique face aux changements climatiques, en ciblant les besoins des acteurs du milieu de la phytoprotection au Québec, afin d'élaborer des recommandations en ce sens. Dans les deux ateliers, on remarque une cohérence entre les vulnérabilités mentionnées et les mesures d'adaptation proposées. Ces liens sont le fil conducteur qui a mené à l'élaboration de recommandations s'intégrant à la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture du Québec (section 6.2.)

Les deux tableaux suivants (58 et 59) présentent les liens entre les vulnérabilités mentionnées et les mesures d'adaptation retenues pour chaque atelier.

Tableau 58. Liens entre les vulnérabilités et les mesures d'adaptation proposées par les membres du comité de suivi.

VULNÉRABILITÉS	MESURES D'ADAPTATION
Arrivée de nouveaux ennemis des cultures + Adaptation des différents ennemis des cultures	Réseau de détection d'arrivée de nouveaux ravageurs + Disponibilité de cultivars adaptés aux nouvelles conditions
Perte d'outils de lutte intégrée (besoin d'adaptation ou de développement)	Disponibilité d' outils de lutte intégrée adaptés aux nouvelles conditions (dépistage, seuil, modèles prévisionnels)
Inefficacité des outils de lutte pour les nouveaux ennemis des cultures + Manque de ressources (financières – humaines) disponibles pour développer des méthodes de lutte	Augmenter les ressources humaines et matérielles pour la R&D + Offrir davantage d'appui aux producteurs pour l'utilisation de la lutte antiparasitaire intégrée

Tableau 59. Liens entre les vulnérabilités et les mesures d'adaptation proposées par les intervenants du secteur de la phytoprotection.

VULNÉRABILITÉS	MESURES D'ADAPTATION
<p>Manque de coordination entre la R&D et le transfert technologique</p>	<p>Disponibilités d'outils d'aide à la décision et de transfert d'informations adaptés aux nouvelles conditions (dépistage, seuil, modèles prévisionnels, utilisation des TIC) + Mettre en place des ressources (humaines et financières) et des structures qui permettent la concertation et l'optimisation des ressources en R&D, en transfert et en diffusion (pour une vision commune)</p>
<p>Manque de ressources humaines pour supporter les producteurs</p>	<p>Offrir davantage de support (financier et humain) aux producteurs et aux conseillers (service d'extension) pour l'utilisation de la lutte antiparasitaire intégrée</p>
<p>Spécialisation des cultures (diminution des rotations) + Manque d'engagement/désengagement de l'État + Absence d'un processus de veille technologique au Québec et ailleurs</p>	<p>Implanter et soutenir les méthodes de lutte intégrée en priorisant les moyens les plus efficaces (ex. : rotations des cultures, diversification, aménagement du territoire) + Accroître la recherche (nombre de chercheurs, durée de financement des projets, support scientifique) pour développer des méthodes de lutte intégrée et approfondir les connaissances sur les ennemis des cultures (ex. : systèmes culturaux)</p>

6.2 Recommandations aux décideurs

Un des objectifs du projet était de formuler des recommandations pertinentes pour élaborer une stratégie d'adaptation aux CC pour les cas étudiés et pour amorcer une stratégie d'adaptation pour le secteur de la phytoprotection au Québec.

6.2.1. Recommandations pour une stratégie d'adaptation aux CC pour les cas étudiés

Pour ce qui est d'une stratégie d'adaptation aux CC pour les cas étudiés, il est suggéré de mettre en application les mesures d'adaptation décrites à la section 5.7.1. pour chacun des ennemis des cultures.

6.2.2. Recommandations pour une stratégie d'adaptation aux CC pour le secteur de la phytoprotection

Les mesures d'adaptation qui ont été retenues lors des ateliers de consultation permettent de compléter la stratégie d'adaptation en répondant aux besoins de l'ensemble du secteur de la phytoprotection du Québec. La Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture couvre la période 2011-2021. Il est des plus pertinents et tout à propos d'analyser comment les actions de la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture peuvent rejoindre les mesures d'adaptation aux changements climatiques à l'égard de la phytoprotection et ainsi permettre au secteur agricole de mieux s'adapter concernant l'impact qu'auront les changements climatiques sur les ennemis des cultures.

Cette stratégie se divise en 3 volets : le volet « Santé », le volet « Environnement » et le volet « Agronomie et Économie ». La présente étude rejoint le volet « Agronomie et Économie », qui se sépare en 3 orientations:

ORIENTATION 5

Accélérer le développement de connaissances en gestion intégrée des ennemis des cultures.

ORIENTATION 6

Renforcer l'adoption de pratiques agricoles favorisant la gestion intégrée des ennemis des cultures.

ORIENTATION 7

Accélérer le transfert de connaissances et encourager la diffusion d'information.

Pour chaque orientation, on retrouve des **objectifs**, qui se sous-divisent en **actions**.

Les différentes mesures d'adaptation retrouvées à la section 6.3. (Tableau 62) ont été regroupées en fonction de leur cohérence avec diverses **actions** de la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture (Tableaux 60 à 65). On remarque d'ailleurs que ces mesures d'adaptation s'intègrent bien aux actions retrouvées dans la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture. Cela semble démontrer que les changements climatiques viennent en fait accentuer des problèmes déjà présents actuellement en phytoprotection. Par conséquent, il est recommandé de mettre en œuvre les actions de la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture qui sont cohérentes avec les mesures d'adaptation identifiées dans le projet, pour permettre d'amorcer la prise en compte des CC par le secteur.

Des **interventions du MAPAQ, non incluses dans la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture** pourraient être proposées dans le cadre d'une stratégie d'adaptation aux changements climatiques ont aussi été ciblées afin de faire ressortir les outils disponibles pour soutenir l'adaptation du secteur de la phytoprotection du Québec aux changements climatiques.

Tableau 60. Actions de la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021 répondant aux options d'adaptations aux changements climatiques proposées par l'étude R Axe 1

AXE 1 ROUILLONS DE LUTTE INTÉGRÉE, D'AIDE À LA DÉCISION ET DE TRANSFERT D'INFORMATIONS

MESURES D'ADAPTATION provenant de l'étude	Disponibilité d' outils de lutte intégrée adaptés aux nouvelles conditions (dépistage, seuil, modèles)
	Disponibilités d' outils d'aide à la décision et de transfert d'informations adaptés aux nouvelles conditions (dépistage, seuil, modèles prévisionnels, utilisation des TIC)
STRATÉGIE PHYTOSANITAIRE QUÉBÉCOISE EN AGRICULTURE	<p>OBJECTIF 5.2. Accroître les connaissances sur les ennemis des cultures priorités et sur les organismes bénéfiques</p> <p style="text-align: center;">ACTIONS</p> <p>5.2.1 Documenter les ennemis des cultures et les organismes bénéfiques. 5.2.3 Établir, dans des conditions québécoises, des seuils d'intervention et des modèles prévisionnels pour lutter contre les ennemis des cultures.</p>
	<p>OBJECTIF 5.3. Développer des moyens de lutte antiparasitaire rentables et à moindre risque</p> <p style="text-align: center;">ACTIONS</p> <p>5.3.1 Mettre au point des méthodes autres que les pesticides pour lutter contre les ennemis des cultures. 5.3.2 Mettre en œuvre un réseau d'essais des pesticides à moindre risque et des biopesticides afin de soutenir la gestion intégrée des ennemis des cultures. 5.3.4 Mettre en œuvre des essais d'efficacité pour appuyer les demandes d'extension d'homologation des pesticides à moindre risque et des biopesticides.</p>
	<p>OBJECTIF 6.1. Réduire les risques de développement et de dissémination d'ennemis des cultures</p> <p style="text-align: center;">ACTIONS</p> <p>6.1.2 Renforcer les activités du Réseau d'avertissements phytosanitaires.</p>

Autres interventions du MAPAQ	<p>Le MAPAQ soutient financièrement des centres de recherche et des centres d'expertise qui par leurs activités peuvent contribuer à la mise en œuvre de mesures d'adaptation aux changements climatiques. De plus, les divers programmes d'appui financier à la recherche et au développement du MAPAQ peuvent également contribuer à la stratégie d'adaptation aux changements climatiques. Ces interventions se concrétisent ainsi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - CRAAQ : Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec pour le <i>regroupement et la diffusion de connaissances appliquées</i> - Centres de recherche appliquée et centres d'expertise financés par le MAPAQ pour le <i>développement de connaissances appliquées et le transfert du savoir aux entreprises agricoles et à leurs conseillers</i> - Programme d'appui financier du MAPAQ pour la recherche et le développement (ex. : Prime-Vert sous-volet 11.1, PSIH, PSIA, InnovBio) <i>pour le soutien au développement de connaissances appliquées</i>
--------------------------------------	---

Tableau 61. Actions de la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021 répondant aux options d'adaptations proposées par l'étude R Axe 2

AXE 2 RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT

MESURES D'ADAPTATION provenant de l'étude	<p>Augmenter les ressources humaines et matérielles pour la R&D</p>
STRATÉGIE PHYTOSANITAIRE QUÉBÉCOISE EN AGRICULTURE	<p>Accroître la recherche (nombre de chercheurs, durée de financement, support scientifique) pour développer des méthodes de lutte intégrée et approfondir les connaissances sur les ennemis des cultures (ex. : systèmes culturaux)</p>
STRATÉGIE PHYTOSANITAIRE QUÉBÉCOISE EN AGRICULTURE	<p>OBJECTIF 5.3. Développer des moyens de lutte antiparasitaire rentables et à moindre risque</p> <p style="text-align: center;">ACTIONS</p> <p>5.3.1 Mettre au point des méthodes autres que les pesticides pour lutter contre les ennemis des cultures</p> <p>5.3.3 Mettre en œuvre un réseau d'essais des pesticides à moindre risque et des biopesticides afin de soutenir la gestion intégrée des ennemis des cultures.</p> <p>5.3.4 Mettre en œuvre des essais d'efficacité pour appuyer les demandes d'extension d'homologation des pesticides à moindre risque et des biopesticides.</p>
STRATÉGIE PHYTOSANITAIRE QUÉBÉCOISE EN AGRICULTURE	<p>OBJECTIF 6.1. Réduire les risques de développement et de dissémination d'ennemis des cultures</p> <p style="text-align: center;">ACTIONS</p> <p>6.1.2 Renforcer les activités du Réseau d'avertissements phytosanitaires.</p>

Autres interventions du MAPAQ	<p>Les divers programmes d'appui financier à la recherche et au développement du MAPAQ peuvent contribuer à la stratégie d'adaptation aux changements climatiques. Ces interventions se concrétisent ainsi :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Programme d'appui financier du MAPAQ pour la recherche et le développement (ex. : Prime-Vert sous-volet 11.1, PSIH, PSIA, InnovBio) pour le <i>soutien au développement de connaissances appliquées</i>
--------------------------------------	---

Tableau 62. Actions de la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021 répondant aux options d'adaptations proposées par l'étude R Axe 3

AXE 3 RDÉVELOPPEMENT DE CULTIVARS ADAPTÉS

MESURES D'ADAPTATION provenant de l'étude	Disponibilité de cultivars adaptés aux nouvelles conditions
STRATÉGIE PHYTOSANITAIRE QUÉBÉCOISE EN AGRICULTURE	<p>OBJECTIF 5.3. Développer des moyens de lutte antiparasitaire rentables et à moindre risque</p> <p style="text-align: center;">ACTIONS</p> <p>5.3.2 Mettre en place des essais pour l'évaluation de la résistance de cultivars aux ennemis des cultures.</p>
Autres interventions du MAPAQ	<p>Actuellement, des essais sur les cultivars sont réalisés pour lesquels le MAPAQ apporte un soutien financier:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Grandes cultures → Centre de recherche sur les grains (CÉROM) - Pommes de terre → Centre de recherche Les Buissons (CRLB) - Petits fruits → (Carrefour industriel et expérimental de Lanaudière)

Tableau 63. Actions de la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021 répondant aux options d'adaptations proposées par l'étude R Axe 4

AXE 4 RÉSEAU DE DÉTECTION

<p>MESURES D'ADAPTATION provenant de l'étude</p>	<p>Réseau de détection d'arrivée de nouveaux ravageurs</p>
<p>STRATÉGIE PHYTOSANITAIRE DU MAPAQ</p>	<p>OBJECTIF 6.1. Réduire les risques de développement et de dissémination d'ennemis des cultures</p> <p>ACTIONS</p> <p>6.1.2 Renforcer les activités du Réseau d'avertissements phytosanitaires. 6.1.3 Appuyer le développement de techniques de laboratoire et d'outils diagnostiques pour l'identification des problèmes phytosanitaires. 6.1.4 Maintenir l'accès à des services spécialisés d'identification des ennemis des cultures.</p>
<p>Autres interventions du MAPAQ</p>	<p>La Direction de la phytoprotection du MAPAQ a les responsabilités suivantes:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Laboratoire de diagnostic en phytoprotection - Réseau d'avertissements phytosanitaires <p>Il existe au Québec tout un réseau de service-conseil qui est appuyé financièrement par le MAPAQ;</p> <ul style="list-style-type: none"> - Réseau Agri-Conseil, lequel appuie le financement du dépistage et le service-conseil technique - Club d'encadrement technique - Club-conseil en agroenvironnement

Tableau 64. Actions de la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021 répondant aux options d'adaptations proposées par l'étude R Axe 5

AXE 5 R SUPPORT AUX PRODUCTEURS ET CONSEILLERS AGRICOLES

MESURES D'ADAPTATION provenant de l'étude	Offrir davantage de support (financier et humain) aux producteurs et aux conseillers (service d'extension) pour l'utilisation de lutte antiparasitaire
	Implanter et soutenir les méthodes de lutte intégrée en priorisant les moyens les plus efficaces (ex. : rotations des cultures, diversification, aménagement du territoire)
STRATÉGIE PHYTOSANITAIRE QUÉBÉCOISE EN AGRICULTURE	<p>OBJECTIF 6.1. Réduire les risques de développement et de dissémination d'ennemis des cultures</p> <p>ACTIONS</p> <p>6.1.1 Encourager les producteurs à mettre en œuvre des activités de dépistage des ennemis des cultures</p> <p>6.1.2 Renforcer les activités du Réseau d'avertissements phytosanitaires.</p>
	<p>OBJECTIF 6.3. Encourager les producteurs agricoles à adopter une gestion intégrée des ennemis des cultures</p> <p>ACTIONS</p> <p>6.3.1 Identifier les leviers et les freins liés à l'adoption par les producteurs de la gestion intégrée des ennemis des cultures.</p> <p>6.3.2 Favoriser l'accès à des services-conseils en phytoprotection.</p> <p>6.3.3 Favoriser l'accompagnement individuel des producteurs pour l'adoption de la gestion intégrée des ennemis des cultures priorités. *</p> <p>6.3.4 Favoriser la mise en place d'incitatifs, d'outils de gestion du risque et de mesures de compensation pour soutenir les producteurs qui adoptent la gestion intégrée des ennemis des cultures.</p>
Autres interventions du MAPAQ	<p>Le MAPAQ intervient en agroenvironnement et pour les services-conseils en phytoprotection</p> <ul style="list-style-type: none"> → Réseau Agri-Conseil → Clubs-conseils en agroenvironnement → Clubs d'encadrement technique <p>Les conseillers des directions régionales du MAPAQ en horticulture et grandes cultures offrent des services de deuxième ligne</p> <p>L'Institut québécois du développement de l'horticulture ornementale (IQDHO) qui est soutenu financièrement par le MAPAQ</p>

Tableau 65. Actions de la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture 2011-2021 répondant aux options d'adaptations proposées par l'étude RAXe 6

AXE 6 R TRANSFERT ET DIFFUSION DES CONNAISSANCES

MESURES D'ADAPTATION provenant de l'étude	Mettre en place des ressources (humaines et financières) et des structures qui permettent la concertation et l'optimisation des ressources en R&D, en transfert et en diffusion (pour une vision commune)
STRATÉGIE PHYTOSANITAIRE QUÉBÉCOISE EN AGRICULTURE	<p>OBJECTIF 6.1. Réduire les risques de développement et de dissémination d'ennemis des cultures</p> <p style="text-align: center;">ACTIONS</p> <p>6.1.2 Renforcer les activités du Réseau d'avertissements phytosanitaires.</p> <hr/> <p>OBJECTIF 7.1. Renforcer le partage d'expertise en matière de gestion intégrée des ennemis des cultures</p> <p style="text-align: center;">ACTIONS</p> <p>7.1.1 Renforcer les activités de maillage entre les producteurs, l'industrie et les organisations de recherche et de transfert.</p> <p>7.1.2 Améliorer le réseautage des intervenants par production ou groupe de productions.</p>
Autres interventions du MAPAQ	<p>Le MAPAQ réalise directement des activités qui favorisent le regroupement des intervenants en phytoprotection</p> <ul style="list-style-type: none"> - Ateliers annuels provinciaux pour la détermination des problèmes phytosanitaires prioritaires dans le cadre du Programme d'homologation des pesticides et biopesticides à usage limité - Réseau d'avertissements phytosanitaires (RAP) qui est constitué de 13 réseaux en horticulture et d'un réseau en grandes cultures <p>Le MAPAQ soutient également financièrement le Centre de référence en agriculture et en agroalimentaire du Québec (CRAAQ), lequel permet le réseautage des intervenants œuvrant dans le secteur agricole</p>

6.2.3. Besoins en recherche

Dans les mesures d'adaptation tirées de cette étude, on propose entre autres d'accroître les ressources humaines et financières pour la recherche et le développement. Il est donc recommandé de poursuivre les efforts en recherche tout en prenant en compte les besoins mis en lumière pour les différents ennemis des cultures décrits ci-dessous.

6.2.3.1. Pyrale du maïs

La lutte contre la pyrale du maïs se fait en grande majorité à l'aide d'insecticides de synthèse, dont la plupart font partie de la classe des pyréthroïdes synthétiques. Or, ce groupe est très sensible à la température et les hausses du climat pourraient potentiellement diminuer son

efficacité. Il y a donc un besoin criant pour de nouvelles molécules chimiques afin de lutter contre la pyrale du maïs sous des conditions climatiques différentes. D'autant plus que les hausses de populations d'une seule race (la race bivoltine) pourraient accélérer les mécanismes de résistance chez ces insectes et ainsi rendre inefficaces certains de nos outils. Par ailleurs, la valorisation du dépistage dans les champs pour justifier une intervention chimique devrait être renforcée pour limiter les quantités de pesticides appliquées dans les champs. Certains producteurs préfèrent appliquer un insecticide de façon systématique pour diminuer tout risque d'infestation alors qu'il pourrait diminuer ses applications en se référant au risque réel. Si les changements climatiques augmentent les risques liés à la pyrale du maïs, il est probable qu'une plus grande proportion de producteurs appliquera les insecticides de façon systématique pour éviter tout risque d'infestation.

Quant aux producteurs biologiques, ils n'ont d'autres choix que d'utiliser les trichogrammes pour lutter contre la pyrale du maïs. Certains biofongicides sont aussi disponibles, mais sont surtout utilisés pour compléter la lutte aux autres ravageurs (ex.: pucerons). Plusieurs producteurs ont tenté d'utiliser les trichogrammes, mais seulement une faible proportion de ces derniers a implanté cette technique de façon permanente dans leur culture. Le relâchement des trichogrammes permet un contrôle efficace des populations de pyrale, pourvu que le suivi des populations soit réalisé de façon rigoureuse. De plus, lorsque les populations de pyrale sont très abondantes, le contrôle peut s'avérer moins efficace avec les doses recommandées. Il serait donc pertinent d'évaluer les capacités de contrôle des trichogrammes avec une densité de pyrale plus élevée afin d'ajuster les densités de trichogrammes à utiliser dans ces situations. Un meilleur soutien serait également souhaitable pour assurer le bon fonctionnement des trichogrammes au champ.

Par ailleurs, la pression exercée par pyrale du maïs risque d'être plus forte dans le futur et nous devons trouver les outils pour bien contrôler ses populations. Toutefois, certains ravageurs tels le ver de l'épi, la légionnaire d'automne et le ver-gris noir risquent également d'être plus problématiques dans les années futures. De nouveaux outils, mieux adaptés à ces ravageurs devront aussi être considérés.

6.2.3.2. Fusariose de l'épi

Les producteurs de blé souhaiteraient posséder de meilleurs outils pour contrôler la fusariose de l'épi. Les outils utilisés actuellement préviennent la maladie, mais aucun ne permet un contrôle total de la maladie. Premièrement, les fongicides disponibles ont souvent peu d'effet sur la fusariose de l'épi lorsque le risque est très élevé, et encore faut-il l'appliquer au bon moment (lors de la mi-floraison) pour offrir un contrôle adéquat lorsque les risques sont plus faibles. Par ailleurs, le développement de cultivars de blé résistants à la fusariose de l'épi serait souhaitable. Ceci permettrait de diminuer les traitements fongiques dans cette culture céréalière.

Parmi les outils qui sont actuellement utilisés dans les régions analogues à la Montérégie (Illinois et Ohio), aucun de semble applicable au Québec. L'utilisation de différentes dates de semis pour étaler le risque de fusariose (en ayant des dates de floraison différentes) n'est pas envisageable au Québec avec ses petites superficies de blé cultivées. Par ailleurs, l'utilisation de différents cultivars à maturités dissimilaires aurait plus de chance à s'intégrer au Québec, mais demanderait beaucoup plus de logistique pour l'entreposage des grains.

Les outils pour la prévision du risque sont plus ou moins populaires auprès des producteurs puisque la plupart n'utilisent pas les informations météorologiques pour déterminer la

justification d'un fongicide ou non. Les producteurs rencontrés utilisaient soit systématiquement un fongicide, soit aucun fongicide. Le développement d'un modèle prévisionnel robuste pour la fusariose serait nécessaire au Québec. En ayant des indices de risque plus fiables, les producteurs seraient probablement plus enclins à utiliser cet outil, et limiter ainsi les applications de fongicides en cas de faible risque.

L'utilisation des couverts végétaux et d'engrais verts pourrait limiter l'incidence de la fusariose en créant une barrière physique entre le sol et les résidus infectés de fusariose, si ces derniers couvrent le sol au moment de l'infection. Cette méthode mériterait d'être approfondie et transférée aux producteurs pour limiter les infections de la fusariose de l'épi.

Les producteurs de blé possèdent beaucoup de ressources humaines et financières, renforçant considérablement leur capacité d'adaptation aux changements climatiques. De plus, un nouveau guide intitulé « les céréales à paille » et publié cette année par le CRAAQ saura aider de façon notable les producteurs de blé.

La compréhension de l'influence des hausses de concentration en CO₂ demeure une orientation de recherche à explorer. Certaines études ont démontré un accroissement des taux en DON et une perte d'efficacité des mécanismes de résistance lorsque le blé était sous conditions élevées en CO₂. Il serait toutefois nécessaire de valider cette information avec des cultivars que nous utilisons au Québec et sous des conditions de CO₂ représentant un horizon moins lointain.

6.2.3.3. Doryphore de la pomme de terre

Le doryphore est enclin à développer une résistance aux différents insecticides utilisés. La lutte chimique demeure toutefois le moyen le plus utilisé présentement pour lutter contre cet insecte. Le développement de nouvelles méthodes de lutte alternative serait donc nécessaire afin de diminuer le développement de la résistance aux insecticides. Les producteurs de pomme de terre bénéficieraient aussi de la création d'un réseau de surveillance pour la détection du développement de résistance afin de réagir plus rapidement au champ. L'intégration de pratiques culturales et de lutte biologique permettant de réduire les besoins en insecticides permettrait aussi de limiter l'usage exclusif de ceux-ci. Le développement de cultivars résistants et mieux adaptés aux nouvelles conditions climatiques permettrait finalement de pallier aux risques engendrés par les CC.

6.2.3.4. Veille technologique

En plus d'accroître la recherche en phytoprotection, il est aussi recommandé d'assurer une veille technologique à l'extérieur du Québec, comme aux États-Unis par exemple, où le climat actuel, tel que démontré avec l'approche par analogues, est plus proche du climat futur du Québec. La présente étude a toutefois démontré que les États-Unis pallient souvent aux effets des CC sur les ennemis des cultures par l'utilisation de pesticides ou de cultivars transgéniques. Il serait donc intéressant d'aller aussi explorer ce qui se fait ailleurs, comme en Europe, où les méthodes de lutte alternatives sont plus développées qu'ici ou qu'aux États-Unis. Cette veille technologique permettra donc d'évaluer les vulnérabilités et les mesures d'adaptation utilisées dans un climat plus proche de notre climat futur et d'acquérir des connaissances sur les méthodes de lutte alternatives qui pourraient nous permettre de faire face aux impacts des CC.

6.2.3. Conclusions générales

La présente étude démontre que les changements climatiques d'ici l'an 2050 auront sans aucun doute un impact majeur sur les ennemis des cultures au Québec. En ce qui concerne les insectes étudiés (la pyrale du maïs et le doryphore de la pomme de terre), l'augmentation des températures causera possiblement une augmentation du nombre de générations, l'arrivée plus hâtive de l'ennemi au début de la saison de croissance et la diminution de l'efficacité des méthodes de lutte. Cela risque d'augmenter la pression des ennemis sur les cultures, augmentant possiblement les applications d'insecticides au champ ou le recours à des cultivars transgéniques résistants. L'étude sur la fusariose de l'épi a pour sa part démontré que la prédiction de l'évolution des organismes fongiques en regard des CC est plus difficile puisque la prédiction des précipitations et d'humidité relative présente une plus grande incertitude que la température.

Les entrevues avec les producteurs ont permis de constater que les vulnérabilités du secteur agricole varient en fonction des cultures. Les producteurs de blé, comparativement aux producteurs de maïs sucré, possèdent plus de ressources humaines et financières, renforçant considérablement leur capacité d'adaptation aux CC. Toutefois, les méthodes de lutte actuelles contre la fusariose de l'épi sont moins efficaces que celles pour la pyrale du maïs. De plus, les infestations de fusariose sont plus difficiles à prévoir d'année en année que celles pour la pyrale du maïs. Ceci est d'autant plus vrai pour des prédictions visant l'horizon 2041-2070.

Lors des ateliers de consultations avec le comité de suivi et les intervenants du secteur de la phytoprotection, les participants ont proposé diverses mesures d'adaptation pour le secteur de la phytoprotection au Québec. Ces mesures se sont avérées être peu spécifiques à la problématique des CC et plutôt axées sur les problématiques actuelles du secteur agricole. Ceci démontre que les changements climatiques risquent surtout d'accentuer des problèmes déjà présents dans le secteur de la phytoprotection et que les mesures mises en place devront surtout être renforcées pour pouvoir faire face aux variations du climat. Un lien très étroit a été établi entre les mesures d'adaptation proposées et les actions de la Stratégie phytosanitaire québécoise en agriculture. Cela suggère donc que cette stratégie est prête à répondre aux besoins d'adaptation aux CC du secteur de la phytoprotection. Les différentes actions de cette stratégie mises en valeur à la section 6.2.2. devront toutefois être mises en œuvre pour pouvoir pallier à la problématique dans le futur.

Glossaire

Degrés-jours de croissance : Mesure de la différence entre la température moyenne d'un jour donné par rapport à une température de référence minimale de croissance variant selon les espèces et qui exprime la quantité de chaleur disponible à la croissance ou développement.

Diapause : Stade correspondant à un arrêt du développement ou de la croissance, souvent associé aux saisons et accompagné d'un ralentissement important du métabolisme de l'insecte.

Fitness: (ou valeur sélective, valeur adaptative) Capacité d'un individu d'un certain génotype ou phénotype à survivre et se reproduire.

GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat, a pour mandat d'évaluer, sans parti pris et de manière méthodique, claire et objective, les informations scientifiques, techniques et socio-économiques disponibles en rapport avec la question du changement climatique d'origine humaine. Le GIEC a publié 4 rapports, dont le dernier était en 2007 et le prochain est attendu pour 2014.

Oviposition : Action de déposer un œuf à l'aide d'un organe spécialement conçu à cet effet, l'ovipositeur, chez les insectes.

Paléontologie : Branche de l'entomologie dont l'objet est l'étude des insectes fossiles dans le but de reconstituer les paléoclimats (les climats passés) et les paléoenvironnements (biotopes passés).

Plasticité phénotypique : Capacité d'un organisme à exprimer différents phénotypes à partir d'un génotype donné selon des conditions biotiques et/ou abiotiques environnementales.

Poïkilotherme : Inhabileté à maintenir une température corporelle indépendante de la température ambiante.

Voltinisme : Nombre de générations par année chez un organisme. On parle d'une espèce univoltine lorsqu'elle exécute une génération par année, bivoltine lorsqu'elle en exécute deux et multivoltine lorsqu'elle en produit plus de deux.

Références

- Agriculture et Agroalimentaire Canada.** (2012) Données tirées du logiciel CIPRA. Gaétan Bourgeois, AAC, Centre de recherche en horticulture de Saint-Jean-sur-Richelieu.
- Altermatt, F.** (2010) Climatic warming increases voltinism in European butterflies and moths. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences* **277**, 1281-1287.
- Alyokhin A.** (2009) Colorado potato beetle management on potatoes: current challenges and future prospects. *Fruit, Vegetable and Cereal Science and Biotechnology* **3**, 10-19.
- Alyokhin, A., Baker, M., Mota-Sanchez, D., Dively, G. et Grafius, E.** (2008) Colorado Potato Beetle Resistance to Insecticides. *American Journal of Potato Research* **85**, 395-413.
- Andrewartha, H.G. et Birch, L.E.** (1954). *The distribution and abundance of animals.* University of Chicago Press, Chicago.
- Archambault, D.J.** (2007). Efficacy of herbicides under elevated temperature and CO₂. Dans: Newton, P.C.D., Carran, R.A., Edwards, G.R., Niklaus, P.A. (Éds.), *Agroecosystems in a changing climate.* Taylor & Francis Group, New York, pp. 333-336.
- Aurambout, J.P., Finlay, K.J., Luck, J. et Beattie, G.A.C.** (2009) A concept model to estimate the potential distribution of the Asiatic citrus psyllid (*Diaphorina citri* Kuwayama) in Australia under climate change-A means for assessing biosecurity risk. *Ecological Modelling* **220**, 2512-2524.
- Bailey, K.L., Couture, L., Gossen, B.D., Gugel, R.K. et Morrall, R.A.A.** (2004) Maladies des grandes cultures au Canada. *Société canadienne de phytopathologie*, 318 p.
- Ballhorn, D.J., Schmitt, I., Fankhauser, J.D., Katagiri, F. et Pfanz, H.** (2010) CO₂-mediated changes of plant traits and their effects on herbivores are determined by leaf age. *Ecological Entomology* **36**, 1-13.
- Baker, D. G., Sharratt, B.S., Chiang, H.C., Zandlo, J.A. et Ruschy, D.L.** (1984) Base temperature selection for the prediction of european corn borer instars by the growing degree day method. *Agricultural and Forest Meteorology* **32**, 55-60.
- Bélangier B.** (2005) Le doryphore de la pomme de terre: une bonne connaissance en assure une meilleure maîtrise. Réseau d'avertissements Phytosanitaires, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.
- Benoit, D.L.** (2012) *Communication personnelle.*
- Bernier, D.** 2008. Résistance aux herbicides du groupe 2 : deux nouveaux cas. Laboratoire de diagnostic en phytoprotection, MAPAQ. [En ligne] <http://www.agrireseau.qc.ca/lab/documents/MHR%202008.pdf> (consultée le 13 novembre 2012).

- Bohl W.H. et Johnson S.B.** (2010) Commercial potato production in North America. The potato association of America Handbook, 85p.
- Boland, G.J., Melzer, M.S., Hopkin, A., Hihhins, V. et Nassuth, A.** (2004) Climate change and plant disease in Ontario. *Canadian Journal of Plant Pathology* **26**, 335-350.
- Bourdages, L.** (2011) Analogues spatiaux, Dans le cadre du projet 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 interne du groupe Scénarios climatiques, 48 p.
- Bradley, B.A., Wilcove, D.S. et Oppenheimer, M.** (2010) Climate change increases risk of plant invasion in the Eastern United States. *Biological Invasions* **12**, 1855-1872.
- Bradley, B.A.** (2009) Regional analysis of the impacts of climate change on cheatgrass invasion shows potential risk and opportunity. *Global Change Biology* **15**, 196-208.
- Bradshaw, B., Dolan, H. et Smit, B.** (2004) Farm-Level Adaptation to Climatic Variability and Change: Crop Diversification in the Canadian Prairies. *Climatic change* **67**, 119-141.
- Brewer, C. E. et Oliver, L. R.** (2009) Confirmation and resistance mechanisms in glyphosate-resistant common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) in Arkansas. *Weed Science* **57**, 567-573.
- Bruckner, D.J.** (1998) The allelopathic effect of ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) on the germination of cultivated plants. *Növénytermeles* **47**, 635-644.
- Cannon, R.J.C.** (1998) The implications of predicted climate change for insect pest in the UK, with emphasis on non-indigenous species. *Global Change Biology* **4**, 785-796.
- Cantin J., Weill A. et Vachon É.** (2012) Chapitre 5. Système de production biologique et sans intrants chimiques, dans: Vanasse *et coll.* (Eds.), Guide de production - les céréales à paille, CRAAQ, Québec. pp. 73-92.
- Casagrande, R. A.** (1987) The Colorado Potato Beetle: 125 Years of Mismanagement. *Bulletin of the ESA* **33**, 142-150.
- Carrière Y., Crowder D.W. et Tabashnik B.E.** (2010) Evolutionary ecology of insect adaptation to Bt crops. *Evolutionary Applications* **3**, 561-573.
- Carrière Y. et Boivin G.** (1997) Evolution of thermal sensivity of parasitization capacity in egg parasitoids. *Evolution* **51**, 2028-2032.
- Caya, D. et Laprise, R.** (1999) A semi-implicit semi-lagrangian regional climate model : The Canadian RCM. *Monthly Weather Review*, **127**, 341-362.
- Chakraborty, S. et Newton, A.C.** (2011) Climate change, plant diseases and food security : an overview. *Plant Pathology* **60**, 2-14.

- Chakraborty, S. et Datta, S.** (2003) How will plant pathogens adapt to host plant resistance at elevated CO₂ under a changing climate ? *New Phytologist* **159**, 733-742.
- Chakraborty, S., Tiedemann, A.V. et Teng, P.S.** (2000) Climate change: potential impact on plant diseases. *Environmental Pollution* **108**, 317-326.
- Cloutier C., Boiteau G. et Goettel M.S.** (2002) *Leptinotarsa decemlineata* (Say), Colorado potato beetle (Coleoptera: Chrysomelidae), dans: P. G. Mason and J. T. Huber (Eds.), Biological control programmes in Canada, 1981-2000, CABI, New York. pp. 583.
- Coakley, S.M., Scherm, H. et Chakraborty, S.** (1999) Climate change and plant disease management. *Annual Review of Phytopathology* **37**, 399-426.
- Cook, R.J. et Christen, A.A.** (1976) Growth of cereal root-rot fungi as affected by temperature-water potential interactions. *Phytopathology* **66**, 193-197.
- Cornell University.** The European corn borer. [En ligne] http://www.nysipm.cornell.edu/fieldcrops/scouting_info/fcorn/scout_cal/ecb_guide.asp (consultée le 14 décembre 2012)
- Cowbrough, M. J., R. B. Brown, et Tardif, F.J.** (2003) Impact of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) aggregation on economic thresholds in soybean. *Weed Science* **51**, 947-954.
- Deen, W., L. A. Hunt, et Swanton, C.J.** (1998) Photothermal time describes common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.) phenological development and growth. *Weed Science* **46**, 561-568.
- Del Ponte, E. M., Fernandes, J.M.C., Pavan, W.M. et Baethgen, W.E.** (2009) A model-based assessment of the impacts of climate variability on fusarium head blight seasonal risk in southern Brazil. *Journal of Phytopathology* **157**, 675-681.
- Delahaut K.A.** (2000) Crop profile for potatoes in Wisconsin. NSF Center for integrated pest management, USDA, Wisconsin.
- Delahaut K.A.** (1997) A3678 Colorado potato beetle. University of Wisconsin-Extension, Wisconsin.
- Detrixhe, P., Chandelier, A., Cavelier, M., Buffet, D. et Oger, R.** (2003) Development of an agrometeorological model integrating leaf wetness duration estimation to assess the risk of head blight infection in wheat. *Aspects of Applied Biology* **68**, 199-2004.
- De Wolf, E.D., L.V. Madden et Lipps, P.E.** (2003) Risk assessment models for *Fusarium* head blight epidemics based on within-season weather data. *Phytopathology* **93**, 428-435.
- Dupuis, S.** (2010) Les trichogrammes pour lutter contre la pyrale du maïs et se distinguer sur les marchés. Réseau d'avertissement phytosanitaire, Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation (MAPAQ), Décembre 2010. [En ligne] <http://www.agrireseau.qc.ca/agriculturebiologique/documents/parabio.pdf> (consultée le 13 novembre 2012).

- Eastburn, D.M., Degennaro, M.M., Delucia, E.H., Dermody, O. et McElrone, A.J.** (2010) Elevated atmospheric carbon dioxide and ozone alter soybean diseases at SoyFACE. *Global Change Biology* **16**, 320-330.
- Estay, S.A., Lima, M. et Labra, F.A.** (2009) Predicting insect pest status under climate change scenarios: combining experimental data and population dynamics modelling. *Journal of Applied Entomology* **133**, 491-499.
- Étilé, E.** (2012) *Communications personnelles*.
- Étilé E., Boisclair J., Lucas É., Cormier D. et Todorova S.** (2011) Optimisation de la lutte biologique contre la pyrale du maïs et les pucerons dans la culture du maïs sucré frais. Projet 400003 - Programme de soutien à l'innovation en agroalimentaire 100p.
- Fasano, G. et Franceschini, A.** (1987) A multidimensional version of the Kolmogorov-Smirnov test. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, **225**, 155-170.
- Fernandez M.R., Zentner R.P., Basnyat P., Gehl D., Selles F. et Huber D.** (2009) Glyphosate associations with cereal diseases caused by *Fusarium* spp. in the Canadian Prairies. *European Journal of Agronomy* **31**, 133-143.
- Fernandez-Quintanilla, C., Quadranti, M., Kudsk, P. et Bàrberi, P.** (2008) Which future for weed science ? *Weed Research* **48**, 297-301.
- Ford, J.D., E. C. H. Keskitalo, T. Smith, T. Pearce, L. Berrang-Ford, F. Duerden, et B. Smit.** (2010) Case study and analogue methodologies in climate change vulnerability research. *WIREs Climate Change* **1**, 374-392.
- Ford, J.D. et Smit, B.** (2004) A framework for assessing the vulnerability of communities in the canadian arctic to risks associated with climate change. *Arctic* **57**, 389-400.
- Fuhrer, J.** (2003) Agroecosystem responses to combinations of elevated CO₂, ozone, and global climate change. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **97**, 1-20.
- Füssel, H.-M. et Klein, R.** (2006). Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution of Conceptual Thinking. *Climatic Change* **75**, 301-329.
- Gagnon, AE.** (2011) Impacts directs et indirects des changements climatiques sur les ennemis des cultures. Ouranos. 80 p. [En ligne] http://www.agrireseau.qc.ca/lab/documents/Revue%20de%20litt%C3%A9rature%20C_phyto.pdf (consultée le 6 novembre 2012).
- Gauvrit, C. et Chauvel, B.** (2010). Sensitivity of *Ambrosia artemisiifolia* to glufosinate and glyphosate at various developmental stages. *Weed Research* **50**, 503-510.
- GIEC, 2007. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the intergovernmental Panel on Climate Change** (M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 976 pp. [En ligne] http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report

[wg2 report impacts adaptation and vulnerability.htm](#) (consultée le 14 décembre 2012)

- Gouvernement du Québec** (2010) Approbation des OGM, [En ligne] http://www.ogm.gouv.qc.ca/regl_approbations.html (consulté le 13 octobre 2010).
- Gregory, P.J., Johnson, S.N., Newton, A.C. et Ingram, J.S.I.** (2009) Intergrating pest and pathogens into the climate change/food security debate. *Journal of Experimental Botany* **60**, 2827-2838.
- Grenier P., Parent A.-C., Huard D., Anctil F. et Chaumont D.** (2012): Assessment of six dissimilarity metrics for climate analogues. Article soumis à *Journal of Applied Meteorology and Climatology (JAMC)*.
- Groves, R.** (2012) *Communications personnelles*.
- Hallegatte, S., J.C. Hourcade, et P. Ambroisi.** (2007) Using climate analogues for assessing climate change economic impacts in urban areas. *Climatic Change* **82**, 47-60.
- Hare J.D.** (1990) Ecology and management of the Colorado potato beetle. *Annual Review of Entomology* **35**, 81-100.
- Hooker, D.C., A.W. Schaafsma et L. Tamburic-Ilinci.** (2002) Using weather variables pre- and post-heading to predict deoxynivalenol content in winter wheat. *Plant Disease* **86**, 611-619.
- Hovenden, M.J.** (2007) Distinguishing between acclimation and adaptation. 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. 291-308.
- Hunter, M.D.** (2001) Effects of elevated atmospheric carbon dioxide on insect-plant interactions. *Agricultural and Forest Entomology* **3**, 153-159.
- Hutchinson, M.F., McKenney, D.W., Lawrence, K., Pedlar, J.H., Hopkinson, R.F., Milewska, E. et Papadopol, P.** (2009) Development and Testing of Canada-Wide Interpolated Spatial Models of Daily Minimum–Maximum Temperature and Precipitation for 1961–2003. *J. Appl. Meteor. Climatol.* **48**, 725–741
- Jarnevich, C. et Stohlgren, T.** (2009) Near term climate projections for invasive species distributions. *Biological Invasions* **11**, 1373-1379.
- Jeffree, C.E. et Jeffree, E.P.** (1996) Redistribution of the potential geographical ranges of Mistletoe and Colorado Beetle in Europe in response to the temperature component of climate change. *Functional Ecology* **10**, 562-577.
- Jungclaus, JH., Keenlyside, N. et Botzet, M.** (2006) Ocean circulation and tropical variability in the coupled model ECHAM5/MPI-OM, *Journal of Climate*, **19**, 3952-3972.
- Kim K.S., Coates B.S., Bagley M.J., Hellmich R.L. et Sappington T.W.** (2011) Genetic structure and gene flow among European corn borer populations from the Great Plains

- to the Appalachians of North America. *Agricultural and Forest Entomology* **13**, 383-393.
- Klass, C. et Muka, A. A.** (2009) Colorado potato beetle, *Leptinotarsa decemlineata*. Insect and Plant Disease Diagnostic Laboratory, Cornell Cooperative Extension, New York.
- Kocmankova, E., Trnka, M., Eitzinger, J., Dubrovsky, M., Stepanek, P., Semeradova, D., Balek, J., Shalak, P., Farda, A., Juroch, J et Zalud, Z.** (2011) Estimating the impact of climate change on the occurrence of selected pests at a high spatial resolution: a novel approach. *The Journal of Agricultural Science* **149**, 185-195.
- Kopf, S., M. Ha-Duong, and S. Hallegatte.** (2008) Using maps of city analogues to display and interpret climate change scenarios and their uncertainty. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **8**, 905-918.
- Kriss, A. B., P. A. Paul, et Madden, L.V.** (2010) Relationship between yearly fluctuations in Fusarium Head Blight intensity and environmental variables: a window-pane analysis. *Phytopathology* **100**, 784-797.
- Lacey, J., Bateman, G. L., et Mirocha, C. J.** (1999) Effects of infection time and moisture on development of ear blight and deoxynivalenol production by *Fusarium* spp. in wheat. *Annals of Applied Biology* **134**, 277-283.
- Ladanyi, M. et Horvath, L.** (2010) A review of the potential climate change impact on insect populations - general and agricultural aspects. *Applied Ecology and Environmental Research* **8**, 143-152.
- Lake, J.A. et Wade, R.N.** (2009) Plant-pathogen interactions and elevated CO₂: morphological changes in favour of pathogens. *Journal of Experimental Botany* **60**, 3123-3131.
- Lawton, J.H.** (1995) The response of insects to environmental change. Dans: Harrington, R., Stork, N.E (Éds.) *Insects in a changing environment: symposium of the Royal Entomological Society*. Academic Press, San Diego, USA, pp. 3-26.
- Madgwick, J.W., J.S. West, R.P. White, M.A. Semenov, J.A. Townsend, J.A. Turner et Fitt, B.D.L.** (2011) Impacts of climate change on wheat anthesis and fusarium ear blight in the UK. *European Journal of Plant Pathology* **130**, 117-131.
- Manning, W.J. et Tiedemann, A.V.** (1995) Climate change: Potential effects of increased atmospheric Carbon dioxide (CO₂), ozone (O₃), and ultraviolet-B (UV-B) radiation on plant diseases. *Environmental Pollution* **88**, 219-245.
- McKenney, D., Papadopol, P., Campbell, K., Lawrence, K. et Hutchinson, M.** (2006) Spatial models of Canada and North America wide 1971/2000 minimum and maximum temperature, total precipitation and derived bioclimatic variables. Technical report, Canadian Forest Services, Natural Resources Canada, *Technical Note No 106*
- McMullen, M., Jones, R. et Gallenberg, D.** (1997) Scab of wheat and barley : A re-emerging disease of devastating impact. *Plant Disease* **81**, 1340-1348.

- Mearns, L. O., M. Hulme, T. R. Carter, R. Leemans, M. Lal, P. Whetton, L. Hay, R. N. Jones, R. Katz, T. Kittel, J. Smith, et Wilby R.** (2001) Climate Scenario Development. *Climate Change 2001 : The Scientific Basis*. J. T. Houghton, and co-editors, Ed, 739-768. [En ligne] http://www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/ (consultée le 20 novembre 2012).
- Mendelsohn R. and Dinar A.** (1999) Climate Change, Agriculture, and Developing Countries: Does Adaptation Matter ? *The World Bank Research Observer* **14**, 277-93.
- Minnesota Association of Wheat Growers.** [En ligne] <http://www.smallgrains.org/> (consultée le 14 décembre 2012)
- Molineros, J.E.** (2007) Understanding the challenges of *Fusarium* head blight forecasting. Ph.D. Thesis in Plant Pathology, Pennsylvania State University. 101 p.
- Moschini, R.C., R. Pioli, M. Carmona et O. Sacchi.** (2001) Empirical predictions of wheat head blight in the Northern Argentinean Pampas region. *Crop Science* **41**, 1541-1545.
- Mpeloska, F.S. et Chiew, F.H.S.** (2009) Influence of rainfall scenario construction methods on runoff projections. *Journal of Hydrometeorology*, **10**, 1168-1183.
- Music, B. et Caya, D.** (2007) Evaluation of the hydrological cycle over the Mississippi River basin as simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM). *Journal of Hydrometeorology*, **8**, 969-988.
- Musser, F. R., et Shelton, A. M.** (2005) The influence of post- exposure temperature on the toxicity of insecticides to *Ostrinia nubilalis* (Lepidoptera: Crambidae). *Pest management science* **61**, 508-510.
- Mutch, D. R., T. E. Martin, et Kosola, K.R.** (2003). Red clover (*Trifolium pratense*) suppression of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) in winter wheat (*Triticum aestivum*). *Weed Technology* **17**, 181-185.
- Nakicenovic, N. et Swart, R.** (2000) Special Report on Emissions Scenarios. A special Report of Working III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- O'Brien, K., R. Leichenko, R., Kelkar, U., Venema, H., Aandahl, G., Tompkins, H., Javed, A., Bhadwal, S., Barg, S., Nygaard, L. et West, J.** (2004) Mapping vulnerability to multiple stressors: climate change and globalization in India. *Global Environmental Change* **14**, 303–313.
- Olfert, O. et 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.
- Ouranos** (2010) *Savoir s'adapter aux changements climatiques*. Rédaction: DesJarlais, C., Allard, M., Bélanger, D., Blondlot, A., Bouffard, A., Bourque, A., Chaumont, D., Gosselin, P., Houle, D., Larrivée, C., Lease, N., Pham, A.T., R. Roy, Savard, J.-P., Turcotte, R., Villeneuve, C. Montréal, Qc.

- Palmer, W.A. et Goeden, R.D.** (1991) The host range of *Ophraella communa* lesage (coleoptera : chrysomelidae). *The Coleopterists Bulletin* **45**, 115-120.
- Patterson, D.T., Westbrook, J.K., Joyce, R.J.V., Lingren, P.D. et Rogasik, J.** (1999) Weeds, insects, and diseases. *Climatic Change* **43**, 711-727.
- Peacock, L. et Worner, S.** (2006) Using analogous climates and global insect distribution data to identify potential sources of new invasive insect pests in New Zealand. *New Zealand Journal of Zoology* **33**, 141-145.
- Pearce, T., Smit, B., Duerden, F., Ford, J.D., Goose, A. et Kataoyak, F.** (2010) Inuit vulnerabilities and adaptative capacity to climate change in Ulukhatok, Northwest territories, Canada. *Polar Record* **46**, 157-177.
- Perpillou A.** (1933) La propagation du doryphore en 1932 et 1933. Dans : *Annales de Géographie*. 1934, t. 43, n°244. pp. 418-421.
- Pierce, P.** Ohio State University, *communications personnelles*.
- Porter, J.H., Parry, M.L. et Carter, T.R.** (1991) The potential effects of climatic change on agricultural insects pests. *Agricultural and Forest Meteorology* **57**, 221-240.
- Pugh GW, Johann H, et Dickson JG.** (1933) Factors affecting infection of wheat heads by *Gibberella saubinetii*. *J Agr Res* **46**, 771-797.
- Rafoss, T. et Saethre, M.G.** (2003) Spatial and temporal distribution of bioclimatic potential for the Codling moth and the Colorado potato beetle in Norway: model predictions versus climate and field data from the 1990s. *Agricultural and Forest Entomology* **5**, 75-85.
- Ramírez-Villegas, J., C. Lau, A.-K. Köhler, J. Signer, A. Jarvis, N. Arnell, T. Osborne, et Hooker, J.** (2011) Climate analogues: finding tomorrow's agriculture today. Working Paper no. 12. Cali, Colombia: CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS). [En ligne] www.ccafs.cgiar.org (consultée le 20 novembre 2012).
- Raupach, M.R., Maland, G., Cias, P., Le Quéré, C., Canadell, J.G., Klepper, G. et Field, C.B.** (2007) Global and regional drivers of accelerating CO2 emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, **104**, 18866-18870.
- Réseau Grandes Cultures du Québec (RGXQ).** (2011). *Grandes Cultures, Résultats 2011 et recommandations 2012 des RGCQ. CEROM*, 56p.
- Rillig, M.C.** (2007). Climate change effects on fungi in agroecosystems. Dans: Newton, P.C.D., Carran, R.A., Edwards, G.R., Niklaus, P.A.(Éds.), *Agroecosystems in a changing climate*. Taylor & Francis group, New York, pp. 211-226.
- Rioux S., Bernier D. et Labrie G.** (2012) Chapitre 6. Phytoprotection, dans: *Vanasse et coll.* (Éds.), *Guide de production - les céréales à paille*, CRAAQ, Québec. pp. 93-134.

- Rosenzweig, C., Iglesias, A., Yang, X.B., Epstein, P.R., Chivian, E.** (2000) *Climate change and U.S. agriculture: the impacts of warming and extreme weather events on productivity, plant diseases, and pests*. Center for Health and the Global Environment, Boston.
- Rosenzweig, C. et Parry, M.L.** (1994). Potential impact of climate change on world food supply. *Nature Publishing group* Vol. 367.
- Rossi, V., S. Giosuè, E. Patteri, F. Spanna et Del Vecchio, A.** (2003) A model estimating the risk of Fusarium head blight on wheat. *Bulletin OEPP* **33**, 421-245.
- Saint-Louis, S., A. DiTommaso, et Watson, A.K.** (2005) A common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*) biotype in southwestern Quebec resistant to linuron. *Weed Technology* **19**, 737-743.
- SAGÉ Pesticides**, outil d'information sur les risques pour la Santé et l'Environnement ainsi que sur les usages Agricoles pour une gestion rationnelle et sécuritaire des pesticides au Québec. [En ligne] <http://www.sagepesticides.gc.ca/Contact.aspx> (consultée le 14 décembre 2012)
- Salas-Media, D., Chauvin, F., Déqué, M., Douville, Hl, Gueremy, J.-F., Chauvin, F., Planton, S., Royer, J.-F. et Tyteca, S.** (2005) : Description and validation of the CNRM-CM3 global coupled model, CNRM, Tech. Rep. 103.
- Salinari, F., Giosuè, S., Tubiello, F.N., Rettori, A., Rossi, V., Spanna, F., Rosenzweig, C. et Gullino, M.L.** (2006) Downy mildew (*Plasmopara viticola*) epidemics on grapevine under climate change. *Global Change Biology* **12**, 1299-1307.
- Sandermann, H.J., Ernst, D., Heller, W. et Langebartels, C.** (1998) Ozone: an abiotic elicitor of plant defence reactions. *Trends in Plant Science* **3**, 47-50.
- Schaafsma, A.W. et Hooker, D.C.** (2007) Climatic models to predict occurrence of *Fusarium* toxins in wheat and maize. *International Journal of Food Microbiology* **119**, 116-125.
- Schroeder, J.B., Gray, M.E., Ratcliffe, S.T., Estes, R.E. et Long, S.P.** (2006) Effects of elevated CO₂ and O₃ on a variant of the western corn rootworm (Coleoptera : Chrysomelidae). *Environmental Entomology* **35**, 637-644.
- Scinocca, J.F., McFarlane, N.A., Lazare, M., Li, J. et Plummer, D.** (2008) Technical Note : The CCCma third generation AGCM and its extension into the middle atmosphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **8**, 7055-7074.
- Seaman, T.** (2012) *Communications personnelles*.
- Showers, W. B., Weiss, M.J., Derrick, M.E. et Hendrix III, W.H.** (1995) Potential movement on surface airflow of a bivoltine population of European corn borer (Pyralidae: Lepidoptera) into a historically univoltine habitat. *Environmental Entomology* **24**, 835-840.

- Simard, M. J. et Benoit, D.L.** (2010) Distribution and abundance of an allergenic weed, common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia* L.), in rural settings of southern Quebec, Canada. *Canadian Journal of Plant Science* **90**, 549-557.
- Smit, B. et Wandel, J.** (2006) Adaptation, adaptative capacity and vulnerability. *Global Environmental Change* **16**, 282-292.
- Smit, B. et Skinner, M.** (2002). Adaptation options in agriculture to climate change: a typology. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* **7**, 85-114.
- Snodgrass, G. L., Gore, J., Abee, C.A. et Jackson, R.** (2009) Acephate resistance in populations of the Tarnished plant bug (Heteroptera: Miridae) from the Mississippi river delta. *Journal of Economic Entomology* **102**, 699-707.
- Statistique Canada** (2011) Production canadienne de pommes de terre. Bulletin de service no 22-008-X. Vol 9, 14 p.
- Stivers L.** (2000) Crop Profile: Potatoes in New York. Cornell Cooperative Extension, New York.
- Subedi K.D., Ma B.L. et Xue A.G.** (2007) Planting date and nitrogen effects on fusarium head blight and leaf spotting diseases in spring wheat. *Agronomy Journal* **99**, 113-121.
- Thomson, L.J., MacFadyen, S. et Hoffmann, A.A.** (2010) Predicting the effects of climate change on natural enemies of agricultural pests. *Biological control* **52**, 296-306.
- Tobin, P.C., Nagarkatti, S., Loeb, G. et Saunders, M.C.** (2008) Historical and projected interactions between climate change and insect voltinism in a multivoltine species. *Global Change Biology* **14**, 951-957.
- Trnka, M., Muska, F., Semerádová, D., Dubrovský, M., Kocmánková, E. et Zalud, Z.** (2007) European Corn Borer life stage model: regional estimates of pest development and spatial distribution under present and future climate. *Ecological Modelling* **207**, 61-84.
- Trumble, J.T. et Butler, C.D.** (2009) Climate change will exacerbate California's insect pest problems. *California Agriculture* **63**, 73-78.
- Ulrichs, C. et Hopper, K.R.** (2008) Predicting insect distributions from climate and habitat data. *Biocontrol* **53**, 881-894.
- United States Department of Agriculture - National Agricultural Statistics Service.** Site internet de la USDA-NASS. [En ligne] National Agricultural Statistics Service (consultée le 14 décembre 2012)
- Van Rossum J., Lussier S. et Vanasse A.** (2012) Chapitre 4. Systèmes de production conventionnelles, dans: Vanasse *et coll.* (Eds.), Guide de production - les céréales à paille, CRAAQ, Québec. pp. 39-72
- Weaver, S. E.** (2001) Impact of lamb's-quarters, common ragweed and green foxtail on yield of corn and soybean in Ontario. *Canadian Journal of Plant Science* **81**, 821-828.

- Wolfe, D.W., Ziska, L., Petzoldt, C., Seaman, A., Chase, L. et Hayhoe, K.** (2008) Projected change in climate thresholds in the Northeastern U.S.: implications for crops, pests, livestock, and farmers. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* **13**, 555-575.
- Wong L.S.L., Abramson D., Tekauz A., Leisle D. et McKenzie R.I.H.** (1995) Pathogenicity and mycotoxin production of *Fusarium* species causing head blight in wheat cultivars varying in resistance. *Canadian Journal of Plant Science* **75**, 261-267.
- Wu, G., Chen, F.J., Ge, F. et Xiao, N.-W.** (2011) Impacts of elevated CO₂ on expression of plant defensive compounds in Bt-transgenic cotton in response to infestation by cotton bollworm. *Agricultural and Forest Entomology* **13**, 77-82.
- Xue A.G., Voldeng H.D., Savard M.E., Fedak G., Tian X. et Hsiang T.** (2009) Biological control of fusarium head blight of wheat with *Clonostachys rosea* strain ACM941. *Canadian Journal of Plant Pathology* **31**, 169-179.
- Zhou, X.L., Harrington, R., Woitwod, I.P., Perry, J.N., Bale, J.S. et Clark, S.J.** (1995) Effects of temperature on aphid phenology. *Global Change Biology* **1**, 303-313.
- Ziska, L.H.** (2010) Elevated carbon dioxide alters chemical management of Canada thistle in no-till soybean. *Field Crops Research* **119**, 299-303.
- 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. et Caulfield, F.A.** (2000) Rising CO₂ and pollen production of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*), a known allergy-inducing species: implications for public health. *Australian Journal of Plant Physiology* **27**, 893-898.
- 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.

ANNEXE 1

Superficies totales au Québec des cultures ciblées dans les études de cas

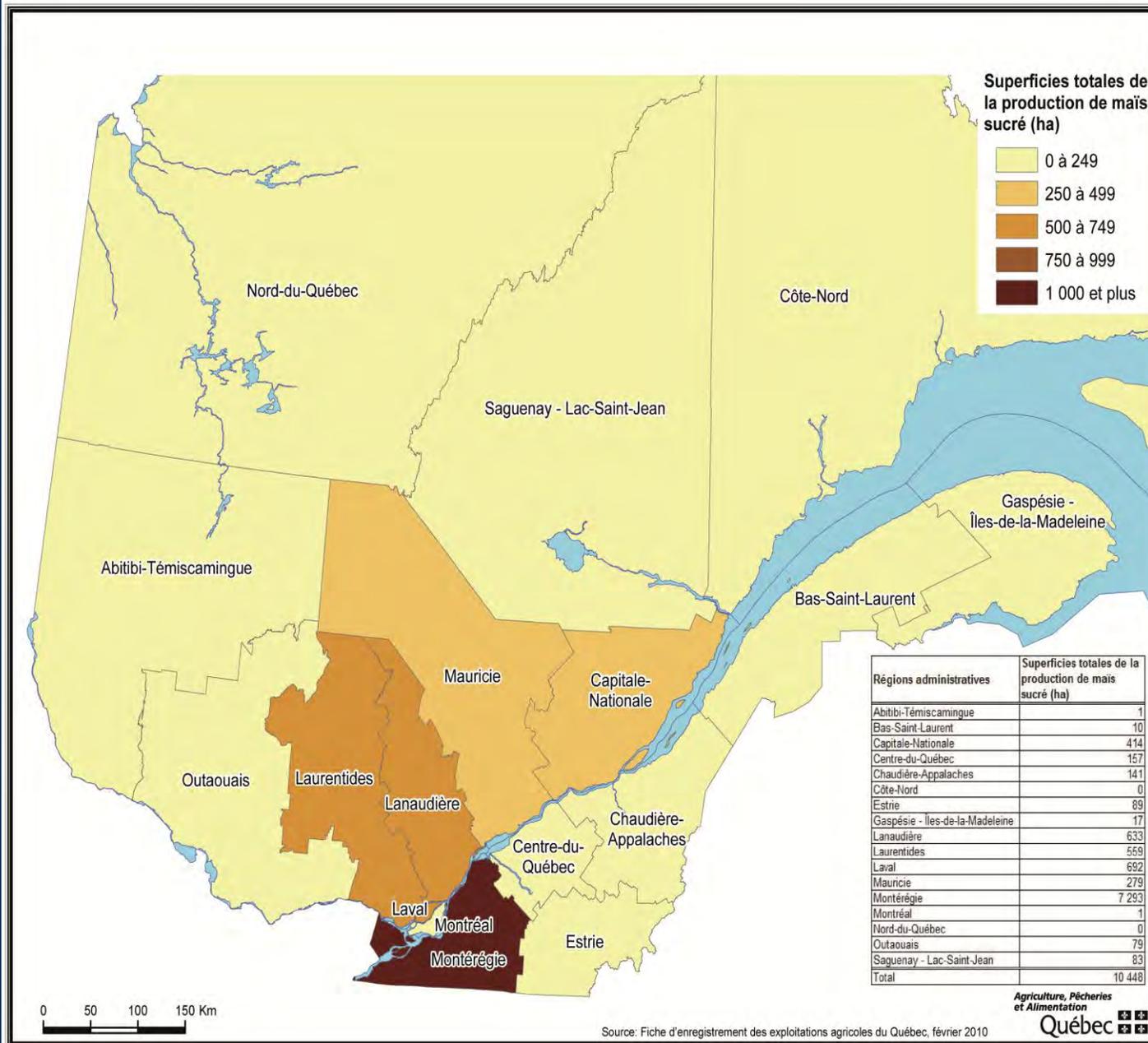


Figure 1. Superficies totales de la production du maïs sucré au Québec par régions administratives (Source : MAPAQ).

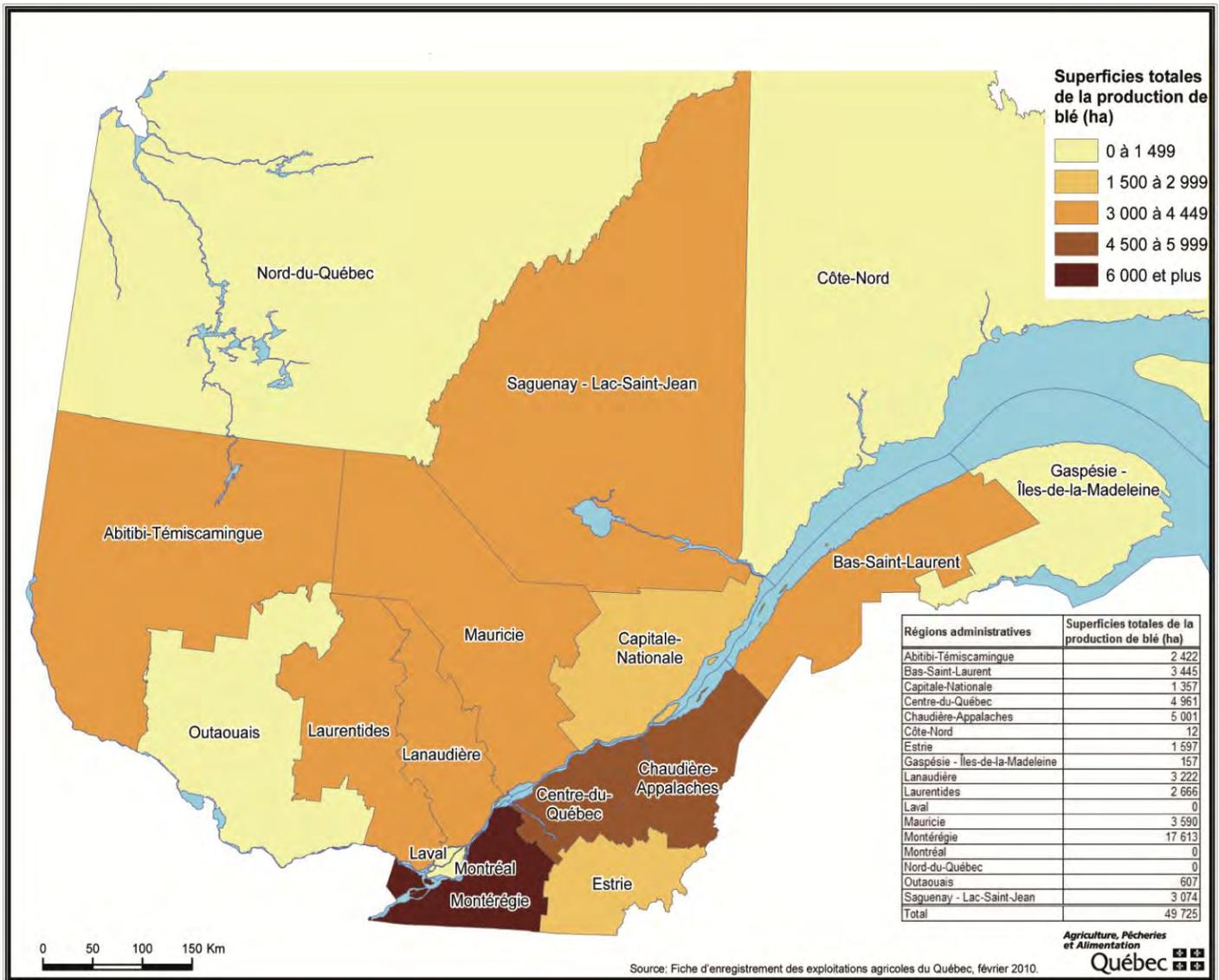


Figure 2. Superficies totales de la production de blé au Québec par régions administratives. (Source : MAPAQ)

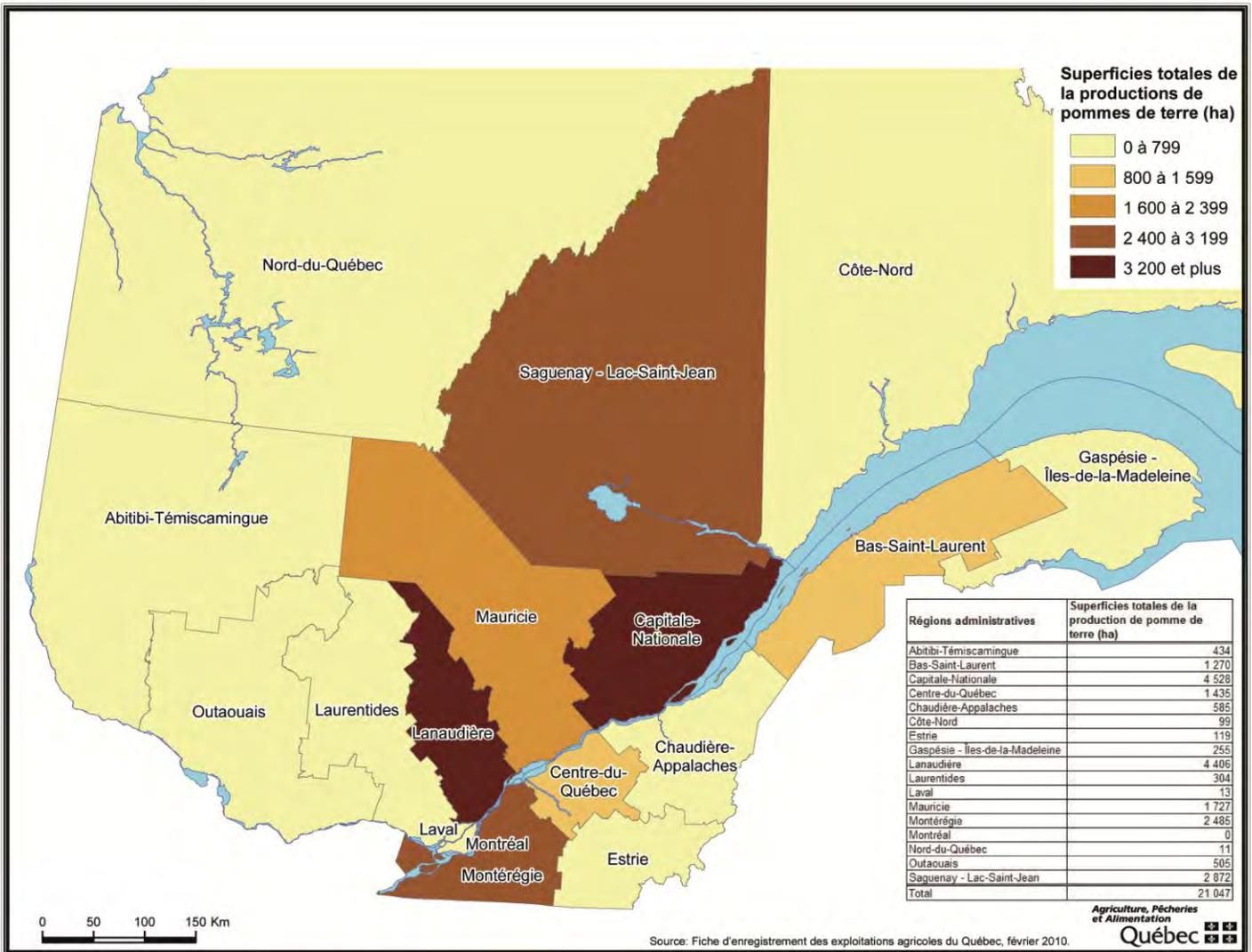


Figure 3. Superficies totales de la production de la pomme de terre par régions administratives. (Source : MAPAQ)

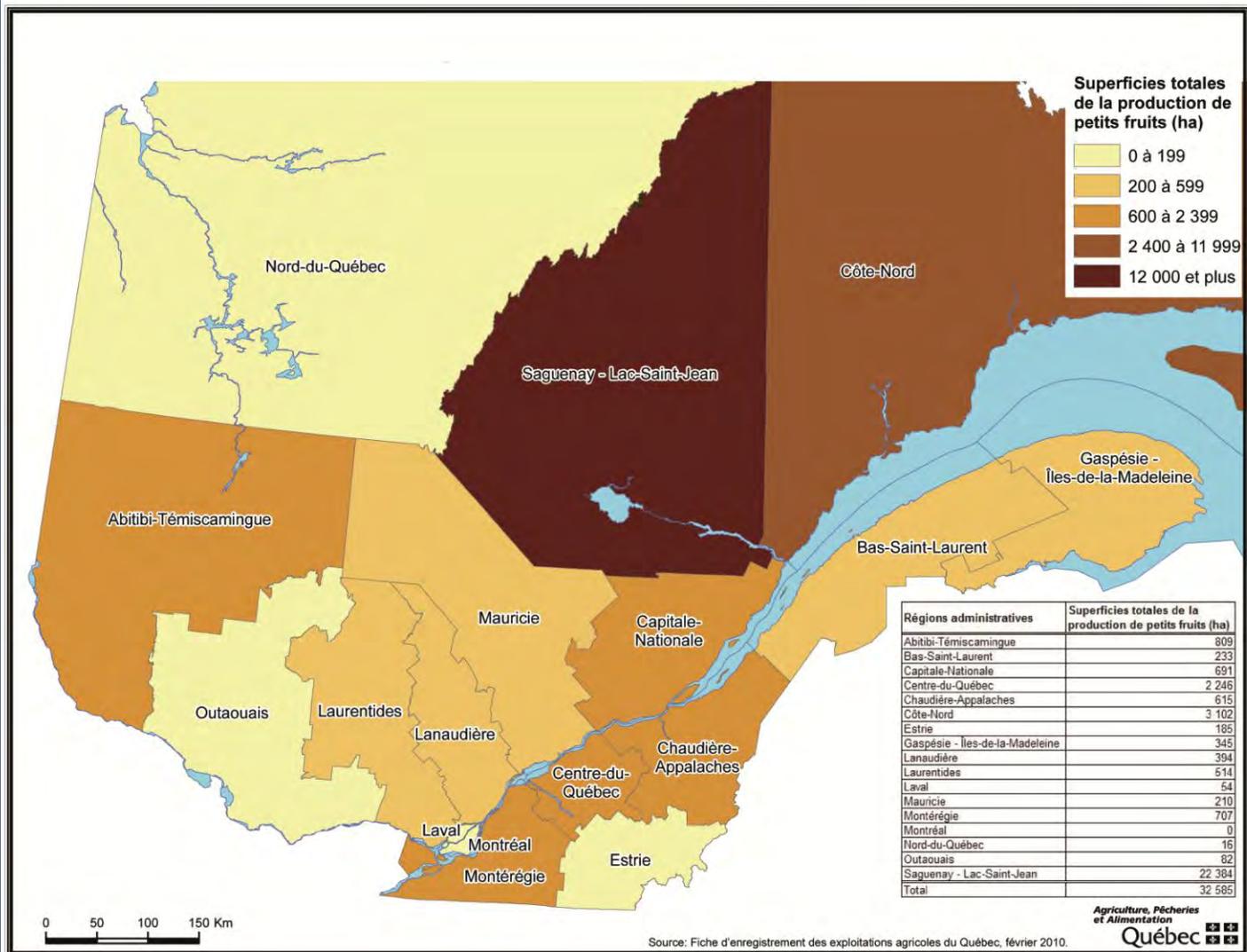


Figure 4. Superficies totales de la production de petits fruits (fraises, framboises, bleuets, canneberges) par régions administratives (Source : MAPAQ)

ANNEXE 2

Liste des pesticides utilisés au Québec en fonction de l'ennemi étudié

Tableau 1. Liste des insecticides homologués au Canada pour lutter contre la pyrale du maïs dans la culture du maïs sucré. (Source : SAgE Pesticides, 2012)

Produits commerciaux	Matière active	Famille Chimique	IRS*	IRE**
SEVIN 50W	carbaryl	Carbamate	378	121
SEVIN 5-D	carbaryl	Carbamate	378	121
SEVIN XLR PLUS	carbaryl	Carbamate	378	121
SEVIN XLR	carbaryl	Carbamate	378	121
SEVIN SL	carbaryl	Carbamate	378	121
CHIPCO SEVIN RP2	carbaryl	Carbamate	378	121
FURADAN 480	carbofuran	Carbamate	307	576
FURADAN 480 F	carbofuran	Carbamate	307	576
LANNATE Toss-N-Go	méthomyl	Carbamate	173	333
CORAGEN	chlordantraniliprole	Diamide anthranilique	4	90
ORTHENE 75 SP	acéphate	Organophosphaté	145	64
BIOPROTEC CAF	Bacillus thuringiensis var. kurstaki	Produit microbien	5	0
DIPEL 2X DF	Bacillus thuringiensis var. kurstaki	Produit microbien	5	
BIOPROTEC 3P	Bacillus thuringiensis var. kurstaki	Produit microbien	5	
UP-CYDE 2.5 EC	cyperméthrine	Pyréthroïde synthétique	135	210
RIPCORD 400 EC	cyperméthrine	Pyréthroïde synthétique	135	210
DECIS 5 CE	deltaméthrine	Pyréthroïde synthétique	15	72
SILENCER 120 EC	lambda-cyhalothrine	Pyréthroïde synthétique	94	81
WARRIOR	lambda-cyhalothrine	Pyréthroïde synthétique	47	81
MATADOR 120 EC	lambda-cyhalothrine	Pyréthroïde synthétique	94	81
POUNCE	perméthrine	Pyréthroïde synthétique	307	225
POUNCE 384 EC	perméthrine	Pyréthroïde synthétique	307	225
AMBUSH 500 EC	perméthrine	Pyréthroïde synthétique	307	225
PERM-UP	perméthrine	Pyréthroïde synthétique	307	225
SUCCESS 480 SC	spinosad	Spinosyne	4	110
ENTRUST 80 W	spinosad	Spinosyne	2	110

* Indice de risque pour la santé

** Indice de risque pour l'environnement

Tableau 2. Liste des fongicides homologués au Canada pour lutter contre la fusariose de l'épi dans la culture du blé. (Source : SAgE Pesticides, 2012)

Produits commerciaux	Matière active	IRS	IRE
BRAVO 500	chlorothalonil	583	12
BRAVO 720	chlorothalonil	583	12
ECHO 720	chlorothalonil	583	12
CARAMBA	metconazole	-	90
PROLINE 480 SC	prothioconazole	55	4
PROSARO 250 EC	prothioconazole / tébuconazole	488	104
PROSARO 421 SC	prothioconazole / tébuconazole	244	92
FOLICUR 250 EW	tébuconazole	433	100
FOLICUR 432 F	tébuconazole	433	100

Tableau 3. Liste des insecticides homologués au Canada pour lutter contre le doryphore de la pomme de terre dans la culture de la pomme de terre. (Source : SAgE Pesticides, 2012)

Produits commerciaux	Matière active	IRS	IRE
À la plantation			
CLUTCH 50 WDG	clothianidine	90	215
CLOTHIANIDINE	clothianidine	90	215
ADMIRE 240	imidaclopride	8	272
ALIAS 240 SC	imidaclopride	8	272
GRAPPLE	imidaclopride	8	272
GRAPPLE-2	imidaclopride	8	272
ACTARA 240 SC	thiaméthoxame	349	213
Foliaire			
ASSAIL 70 WP	acétamipride	20	1
NOVODOR	<i>Bacillus thuringiensis var. tenebrionis</i>	5 ^{††}	1 ^{††}
CHIPCO SEVIN RP2	carbaryl	- [†]	- [†]
SEVIN 5-D	carbaryl	375	121
SEVIN XLR PLUS	carbaryl	169	56
SEVIN XLR	carbaryl	169	56
SEVIN SL	carbaryl	169	56
SEVIN 50W	carbaryl	171	56
FURADAN 480	carbofuran	242	571
FURADAN 480 F	carbofuran	242	571
CORAGEN	chlorantraniliprole	4	92
LORSBAN 50 W	chlorpyrifos	68	446
LORSBAN 4 E	chlorpyrifos	136	446
PYRINEX 480 EC	chlorpyrifos	136	446
CITADEL 480 EC	chlorpyrifos	136	446
NUFOS 4 E	chlorpyrifos	136	446
CLUTCH 50 WDG	clothianidine	73	211
CLOTHIANIDINE	clothianidine	73	211
UP-CYDE 2.5 EC	cyperméthrine	107	183
RIPCORDER 400 EC	cyperméthrine	109	211
GOVERNOR 75WP	cyromazine	4	27
DECIS 5 CE	deltaméthrine	15	56

DECIS FL	deltaméthrine	15	56
CONCEPT	deltaméthrine / imidaclopride	21	267
DIAZINON 50 W	diazinon	46	457
THIONEX EC	endosulfan	349	246
THIODAN 4 EC	endosulfan	404	251
THIONEX 50 W	endosulfan	390	250
THIODAN 50 WP	endosulfan	390	250
ADMIRE 240	imidaclopride	6	211
ALIAS 240 SC	imidaclopride	6	211
GRAPPLE	imidaclopride	6	211
GRAPPLE-2	imidaclopride	6	211
MATADOR 120 EC	lambda-cyhalothrine	96	81
WARRIOR	lambda-cyhalothrine	48	81
SILENCER 120 EC	lambda-cyhalothrine	96	81
MALATHION 85 E	malathion	81	121
FYFANON 50% EC	malathion	91	144
MALATHION 25 W	malathion	88	121
MALATHION 500	malathion	84	121
MONITOR 480 (Bayer)	méthamidophos	629	138
DIBROM	naled	582	298
RIMON 10 EC (Makhteshim)	novaluron	4	36
RIMON 10 EC (Chemtura)	novaluron	4	36
VYDATE L	oxamyle	125	364
POUNCE 384 EC	perméthrine	91	212
POUNCE	perméthrine	91	212
PERM-UP	perméthrine	91	212
AMBUSH 500 EC	perméthrine	91	212
IMIDAN 50 WP INSTAPAK	phosmet	206	121
IMIDAN 70 WP INSTAPAK	phosmet	206	121
DELEGATE WG	spinétorame	14	100
SUCCESS 480 SC	spinosad	4	112
ENTRUST 80 W	spinosad	2	112
ACTARA 25 WG	thiaméthoxame	154	211
ACTARA 240 SC	thiaméthoxame	309	211

ANNEXE 3
Questionnaires pour les entrevues avec les producteurs et les conseillers agricoles

Questionnaire pour les producteurs de blé

PARTIE I – Description des problèmes phytosanitaires et de leurs liens avec le climat

- *Types de problèmes phytosanitaires et récurrence des problèmes*
- *Méthodes de contrôle utilisées*
- *Liens entre le climat et les problèmes phytosanitaires liés à la fusariose au cours du passé récent*

1. Quelle est la superficie cultivée en blé et quels cultivars utilisez-vous ?

< 15 ha

100-300 ha

%alimentation humaine

15-50 ha

> 300 ha

%alimentation animale

50-100 ha

Cultivars (spécifiez blé d'automne ou blé de printemps) :

2. Depuis combien d'années êtes-vous dans le métier ? _____ ans

3. Est-ce que vos rendements sont assez stables d'une année à l'autre ? Pouvez-vous donner une valeur approximative du rendement moyen (T/ha) ?

4. À quels problèmes phytosanitaires (maladies, insectes et mauvaises herbes) avez-vous dû faire face au cours des cinq dernières années dans la culture du blé ?

Fusariose de l'épi

Fonte des semis

Autres (précisez) :

Rouille

Oïdium

Cécidomyie orangée du blé

Mouche de Hesse

Légionnaire uniponctué

Pucerons

Tipule des prairies

Cèpe du blé

5. Au cours des 5 dernières années, combien de fois la fusariose de l'épi vous a-t-elle posé un problème dans votre culture de blé ?

Chaque année

4 années sur 5

évènements extrêmes plus fréquents, etc... ? *Pour un évènement particulier, indiquez l'année approximative.*

9. D'après vous, cette évolution du climat a-t-elle eu des conséquences sur la fusariose de l'épi ?

Oui / Non

Si oui lesquelles ?

Nombre d'épis fusariés plus importants

Concentrations en DON plus élevées

Perte d'efficacité des fongicides

Autre :

10. Est-ce que cela vous a déjà obligé à modifier vos méthodes de gestion de cet ennemi des cultures, et si oui, comment ?

PARTIE II – Impact des changements climatiques

- *Importance des changements climatiques par rapport aux autres enjeux et niveau de sensibilisation*
- *Perception des impacts futurs et des outils nécessaires pour y faire face*

11. Voici une liste de défis auxquels les entreprises agricoles risquent d'être confrontées aujourd'hui et dans les années à venir. Veuillez indiquer l'ordre d'importance de ces défis (de 1 à 5) pour votre entreprise :

- Les échanges commerciaux et l'augmentation de la concurrence mondiale
- Le manque de relève agricole et de personnel qualifié
- L'impact des changements climatiques sur la productivité agricole
- Maintien de la rentabilité des productions agricoles tout en protégeant l'environnement
- L'innovation de produits et de procédés pour le développement du secteur agricole

12. Mise à part votre expérience personnelle, êtes-vous informé des impacts probables des changements climatiques en agriculture ? Et si oui, par quelle source ? *Sur une échelle de 1 à 5 (1 n'étant pas informé), quantifiez votre niveau d'informations recueillies au sujet des changements climatiques.*

Connaissances sur les changements climatiques 1 2 3 4 5

Types de sources	Précisez
<input type="checkbox"/> Conseiller agricole	

<input type="checkbox"/> Journaux et revues	
<input type="checkbox"/> Sources gouvernementales	
<input type="checkbox"/> Sites Internet	
<input type="checkbox"/> Journées d'information, colloques, etc	
Autres _____	

Présentation des résultats des analogues spatiaux et des implications probables des changements climatiques sur la biologie de la pyrale du maïs (voir feuille synthèse)

13. Quels sont, selon vous, les impacts que ces modifications auront sur votre production de blé ?

14. Pensez-vous avoir les outils et les moyens de faire face aux effets des ennemis des cultures influencés par les changements climatiques (moyens de lutte, ressources financières, réglementation, programme d'assurance) ?

PARTIE III – Mesures de gestion dans les régions analogues

- *Applicabilité au Québec*
- *Besoins en information*

Présentation des méthodes de contrôle retrouvées dans les régions analogues (voir feuille synthèse)

15. Est-ce que ces méthodes de contrôle vous semblent envisageables pour la situation québécoise ? Si oui pourquoi ? Si non, pourquoi ? Que faudrait-il faire pour pouvoir appliquer ici celles qui vous semblent les plus pertinentes ?

16. Selon vous, quels outils ou collaborations vous aideraient à prendre des décisions et mener des actions en tant que producteur agricole pour faire face aux changements climatiques ?

- Guide de bonnes pratiques
- Formations/Séminaires
- Programmes gouvernementaux de support pour la mise en place des bonnes pratiques
- Études de cas
- Sites Internet d'information
- Support de conseils fournis sur le sujet

Autre : _____

Questionnaire pour les producteurs de maïs sucré

PARTIE I – Description des problèmes phytosanitaires et de leurs liens avec le climat

- *Types de problèmes phytosanitaires et récurrence des problèmes*
- *Méthodes de contrôle utilisées*
- *Liens entre le climat et les problèmes phytosanitaires liés à la pyrale du maïs au cours du passé récent*

1. Quelle est la superficie cultivée en maïs sucré et quels cultivars utilisez-vous ?

< 5 ha 50-100 ha

5-20 ha > 100 ha

20-50 ha

Cultivars : _____

2. Depuis combien d'années êtes-vous dans le métier ? _____ ans

3. Est-ce que vos rendements sont assez stables d'une année à l'autre ? Pouvez-vous donner une valeur approximative du rendement moyen (T/ha) ?

4. À quels principaux problèmes phytosanitaires (maladies, insectes et mauvaises herbes) avez-vous dû faire face au cours des cinq dernières années dans la culture du maïs sucré ?

Pyrale du maïs

Chrysomèles des racines

Autres (précisez):

Légionnaires

Pucerons

Ver de l'épi

Nitidule

Rouille commune

Charbon commun

Fusariose de l'épi

Pourriture des semences et brû

Amarante à racine rouge

Chénopode blanc

Petite herbe à poux

5. Au cours des 5 dernières années, combien de fois la pyrale du maïs vous a-t-elle posé un problème dans votre culture de maïs sucré ?

Chaque année

4 années sur 5

3 années sur 5

2 années sur 5

1 année sur 5

Jamais

6. **Quels outils de lutte utilisez-vous ou avez utilisé pour contrôler ce ravageur ? Ces méthodes étaient-elles efficaces ? (svp, entourez les réponses appropriées 1= faible contrôle, 2= contrôle intermédiaire, 3= bon contrôle)**

Dépistage/Piégeage 1 2 3

Insecticides 1 2 3

Trichogrammes 1 2 3

Enfouissement des résidus 1 2 3

Choix des cultivars 1 2 3

Autre _____ 1 2 3

Aucun

Détaillez les outils de lutte utilisés (calendrier de dépistage, type de piégeage, classes d'insecticides, fournisseur de trichogrammes, etc...) et la raison de leur efficacité ou inefficacité.

7. **Quelles sont vos sources d'information pour cet ennemi des cultures et comment jugez-vous la qualité de chacune d'elles (svp, entourez les réponses appropriées 1=insuffisante, 2= modérément satisfaisante, 3= satisfaisante)**

Types de sources	Qualité	Précisez
<input type="checkbox"/> Conseiller agricole	1 2 3	
<input type="checkbox"/> Bulletin d'information du RAP	1 2 3	
<input type="checkbox"/> Presse spécialisée	1 2 3	
<input type="checkbox"/> Sites Internet	1 2 3	
<input type="checkbox"/> Journées d'information, colloques, etc	1 2 3	
Autres _____	1 2 3	

8. **Avez-vous observé une évolution des conditions climatiques au cours des 10 à 20 dernières années ? Comment cela s'est-il manifesté (date de semis plus précoce, récolte plus tardive, utilisation de cultivars plus hâtifs, été plus chaud, évènements extrêmes plus fréquents, etc... ? Pour un évènement particulier, indiquez l'année approximative.**

9. D'après vous, cette évolution du climat a-t-elle eu des conséquences sur la pyrale du maïs ?

Oui / Non Si oui lesquelles ?

- Arrivée plus précoce des vols (adultes)
- Densité de population de la pyrale plus abondante
- Développement plus important de la 2e génération de pyrale
- Perte d'efficacité des insecticides ou méthodes biologiques

Autre :

10. Est-ce que cela vous a déjà obligé à modifier vos méthodes de gestion de cet ennemi des cultures, et si oui, comment ?

PARTIE II – Impact des changements climatiques

- *Importance des changements climatiques par rapport aux autres enjeux et niveau de sensibilisation*
- *Perception des impacts futurs et des outils nécessaires pour y faire face*

11. Voici une liste de défis auxquels les entreprises agricoles risquent d'être confrontées aujourd'hui et dans les années à venir. Veuillez indiquer l'ordre d'importance de ces défis (de 1 à 5) pour votre entreprise :

- Les échanges commerciaux et l'augmentation de la concurrence mondiale
- Le manque de relève agricole et de personnel qualifié
- L'impact des changements climatiques sur la productivité agricole
- Maintien de la rentabilité des productions agricoles tout en protégeant l'environnement
- L'innovation de produits et de procédés pour le développement du secteur agricole

12. Mise à part votre expérience personnelle, êtes-vous informé des impacts probables des changements climatiques en agriculture ? Et si oui, par quelle source ? Sur une échelle de 1 à 5 (1 n'étant pas informé), quantifiez votre niveau d'informations recueillies au sujet des changements climatiques.

Connaissances sur les changements climatiques 1 2 3 4 5

Types de sources	Précisez
<input type="checkbox"/> Conseiller agricole	
<input type="checkbox"/> Journaux et revues	

<input type="checkbox"/> Sources gouvernementales	
<input type="checkbox"/> Sites Internet	
<input type="checkbox"/> Journées d'information, colloques, etc	
Autres _____	

Présentation des résultats des analogues spatiaux et des implications probables des changements climatiques sur la biologie de la pyrale du maïs (voir feuille synthèse)

- 13. Quels sont, selon vous, les impacts que ces modifications auront sur votre production de maïs sucré ?**
- 14. Pensez-vous avoir les outils et les moyens de faire face aux effets des ennemis des cultures influencés par les changements climatiques (moyens de lutte, ressources financières, réglementation, programme d'assurance, information, soutien technique) ?**

PARTIE III – Mesures de gestion dans les régions analogues

- *Applicabilité au Québec*
- *Besoins en information*

Présentation des méthodes de contrôle retrouvées dans les régions analogues (voir feuille synthèse)

- 15. Est-ce que ces méthodes de contrôle vous semblent envisageables pour la situation québécoise ? Si oui pourquoi ? Si non, pourquoi ? Que faudrait-il faire pour pouvoir appliquer ici celles qui vous semblent les plus pertinentes ?**
- 16. Selon vous, quels outils ou collaborations vous aideraient à prendre des décisions et mener des actions en tant que producteur agricole pour faire face aux changements climatiques ?**
- Guide de bonnes pratiques
 - Forations/Séminaires
 - Programmes gouvernementaux de support pour la mise en place des bonnes pratiques
 - Études de cas
 - Sites Internet d'information
 - Support de conseils forés sur le sujet

Autre : _____

Questionnaires pour les conseillers agricoles RBlé

PARTIE I – Description des problèmes phytosanitaires et de leurs liens avec le climat

- *Types de problèmes phytosanitaires et récurrence des problèmes*
- *Méthodes de contrôle utilisées*
- *Liens entre le climat et les problèmes phytosanitaires liés à la fusariose au cours du passé récent*

1. **Combien de producteurs de blé comptez-vous parmi votre clientèle ?**

Producteurs

2. **Quels secteurs géographiques couvrez-vous à travers votre clientèle ?**

3. **Depuis combien d'années êtes-vous dans le métier ? _____
ans**

4. **À quels problèmes phytosanitaires (maladies, insectes et mauvaises herbes) avez-vous dû faire face au cours des cinq dernières années dans la culture du blé ?**

- | | |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> Fusariose de l'épi | <input type="checkbox"/> Fonte des semis |
| <input type="checkbox"/> Rouille | <input type="checkbox"/> Oïdium |
| <input type="checkbox"/> Cécidomyie orangée du blé | <input type="checkbox"/> Mouche de Hesse |
| <input type="checkbox"/> Légionnaire uniponctué | <input type="checkbox"/> Pucerons |
| <input type="checkbox"/> Tipule des prairies | <input type="checkbox"/> Cèphe du blé |

Autres (précisez) :

5. **Au cours des 5 dernières années, combien de fois la fusariose de l'épi vous a-t-elle posé un problème dans la culture de blé dans votre secteur ?**

- Chaque année
- 4 années sur 5
- 3 années sur 5
- 2 années sur 5
- 1 année sur 5
- Jamais

6. **Quels outils de lutte proposez-vous ou avez proposé pour contrôler cette maladie ? Ces méthodes étaient-elles efficaces ? (svp, choisir les réponses appropriées 1= faible contrôle, 2= contrôle intermédiaire, 3= bon contrôle)**

- Fongicides 1 2 3
- Rotation des cultures 1 2 3
- Prévisions météo / RAP 1 2 3
- Enfouissement des résidus 1 2 3
- Choix des cultivars 1 2 3
- Autre: _____ 1 2 3
- Aucun

Détaillez les outils de lutte utilisés (classes de fongicides, type de rotation, source d'information météo, etc...) et la raison de leur efficacité ou inefficacité.

7. **Quelles sont vos sources d'information pour cet ennemi des cultures et comment jugez-vous la qualité de chacune d'elles (svp, entourez les réponses appropriées 1=insuffisante, 2= modérément satisfaisante, 3= satisfaisante)**

Types de sources	Qualité	Précisez
<input type="checkbox"/> Collègues de travail	1 2 3	
<input type="checkbox"/> Bulletin d'information du RAP	1 2 3	
<input type="checkbox"/> Presse spécialisée	1 2 3	
<input type="checkbox"/> Sites Internet	1 2 3	
<input type="checkbox"/> Journées d'information, colloques, etc	1 2 3	
Autres _____	1 2 3	

8. **Avez-vous observé une évolution des conditions climatiques au cours des 10 à 20 dernières années ? Comment cela s'est-il manifesté (date de semis plus précoce, récolte plus tardive, utilisation de cultivars plus hâtifs, été plus chaud, évènements extrêmes plus fréquents, etc... ? Pour un évènement particulier, indiquez l'année approximative.**

9. D'après vous, cette évolution du climat a-t-elle eu des conséquences sur la fusariose de l'épi ?

Oui / Non

Si oui lesquelles ?

Nombre d'épis fusariés plus importants

Concentrations en DON plus élevées

Perte d'efficacité des fongicides

Autre : _____

10. Est-ce que cela vous a déjà obligé à modifier vos méthodes de gestion de cet ennemi des cultures, et si oui, comment ?

PARTIE II – Impact des changements climatiques

- *Importance des changements climatiques par rapport aux autres enjeux et niveau de sensibilisation*
- *Perception des impacts futurs et des outils nécessaires pour y faire face*

11. Voici une liste de défis auxquels les entreprises agricoles risquent d'être confrontées aujourd'hui et dans les années à venir. Veuillez indiquer l'ordre d'importance de ces défis (de 1 à 5) pour votre entreprise :

- Les échanges commerciaux et l'augmentation de la concurrence mondiale
- Le manque de relève agricole et de personnel qualifié
- L'impact des changements climatiques sur la productivité agricole
- Maintien de la rentabilité des productions agricoles tout en protégeant l'environnement
- L'innovation de produits et de procédés pour le développement du secteur agricole

12. Mise à part votre expérience personnelle, êtes-vous informé des impacts probables des changements climatiques en agriculture ? Et si oui, par quelle source ? Sur une échelle de 1 à 5 (1 n'étant pas informé), quantifiez votre niveau d'informations recueillies au sujet des changements climatiques.

Connaissances sur les changements climatiques 1 2 3 4 5

Types de sources	Précisez
<input type="checkbox"/> Collègues de travail	
<input type="checkbox"/> Journaux et revues	
<input type="checkbox"/> Sources gouvernementales	
<input type="checkbox"/> Sites Internet	

<input type="checkbox"/> Journées d'information, colloques, etc	
Autres _____	

Présentation des résultats des analogues spatiaux et des implications probables des changements climatiques sur la biologie de la pyrale du maïs (voir feuille synthèse)

13. Quels sont, selon vous, les impacts que ces modifications auront sur la production de blé ?

14. Pensez-vous que vous et les producteurs agricoles possédez les outils et les moyens de faire face aux effets des ennemis des cultures influencés par les changements climatiques (moyens de lutte, ressources financières, réglementation, programme d'assurance, information, soutien technique) ?

Vous :

Producteurs :

PARTIE III – Mesures de gestion dans les régions analogues

- *Applicabilité au Québec*
- *Besoins en information*

Présentation des méthodes de contrôle retrouvées dans les régions analogues (voir feuille synthèse)

15. Est-ce que ces méthodes de contrôle vous semblent envisageables pour la situation québécoise ? Si oui pourquoi ? Si non, pourquoi ? Que faudrait-il faire pour pouvoir appliquer ici celles qui vous semblent les plus pertinentes ?

16. Selon vous, quels outils ou collaborations vous aideraient à prendre des décisions et mener des actions en tant que conseiller agricole pour faire face aux changements climatiques ?

- Guide de bonnes pratiques
- Formations / Séminaires
- Programmes gouvernementaux de support pour la mise en place des bonnes pratiques
- Études de cas
- Sites Internet d'information

Autre : _____

Déroulement des ateliers de consultations

PHASE 1 - Vulnérabilités des producteurs et des intervenants en phytoprotection face aux CC

La présentation des vulnérabilités mentionnées par les producteurs face aux CC pour deux études de cas (pyrale du maïs et fusariose de l'épi) a précédé une première phase de travail.

Question 1 : Y a-t-il, selon vous, des vulnérabilités qu'il conviendrait d'ajouter si l'on considère le secteur de la phytoprotection dans son ensemble ?

- a) Chaque participant, de manière individuelle, répond à la question en produisant une liste des vulnérabilités qui selon lui seraient les plus importantes à ajouter dans un contexte d'adaptation aux CC du secteur de la phytoprotection dans son ensemble. Chaque idée doit être synthétisée en quelques mots avec possibilité de justification.
- b) Une fois les listes complétées, on en fait un inventaire par un tour de table. L'animateur prend en note, sur l'ordinateur (projeté sur l'écran) la première idée que chaque participant a sur sa liste (si la première est déjà mentionnée, le participant en mentionne une autre). Ceci jusqu'à épuisement de toutes les propositions. Si nécessaire, on peut clarifier certains termes, certaines propositions.

Question 2 : En se basant sur la liste complétée des vulnérabilités, quelles sont, selon-vous, les 10 vulnérabilités aux CC les plus importantes pour le secteur de la phytoprotection ?

- a) Sur la base de la liste établie à l'étape précédente, chaque participant classe individuellement, en ordre de priorité (1=moins important, 10 = plus important) les 10 vulnérabilités qui lui apparaissent les plus importantes.
- b) Une fois les priorisations individuelles finalisées, l'animateur fait une synthèse des pointages obtenus par chaque vulnérabilité ou mesure d'adaptation. Ces dernières sont ensuite classées selon l'importance.

Résultat : Une liste des 10 vulnérabilités les plus importantes

Discussion avec les participants concernant la priorisation obtenue.

Question 3 : En se basant sur la liste complétée des vulnérabilités et sur les discussions que nous venons d'avoir, quelles sont, selon-vous, les 5 vulnérabilités aux CC les plus importantes pour le secteur de la phytoprotection ?

- a) Sur la base de la liste établie à l'étape précédente, chaque participant classe individuellement, en ordre de priorité (1=moins important, 5 = plus important) les 5 vulnérabilités qui lui apparaissent les plus importantes.
- b) Une fois les priorisations individuelles finalisées, l'animateur fait une synthèse des pointages obtenus par chaque vulnérabilité. Ces dernières sont ensuite classées selon l'importance.

Résultat : Une liste des 5 vulnérabilités les plus importantes

Les mesures d'adaptation mises en œuvre dans les régions analogues pour ces 2 mêmes études de cas (pyrale du maïs et fusariose de l'épi) ont ensuite été présentées avant d'enchaîner sur un second atelier de travail.

PHASE 2 - Identification des mesures d'adaptation aux CC pour le secteur de la phytoprotection

La phase 2 s'est déroulée de la même façon que la première, mais en proposant et en priorisant des mesures d'adaptation au lieu des vulnérabilités.

Résultat : Une liste de toutes les vulnérabilités ou mesures d'adaptation

ANNEXE 4

Résultats obtenus pour la petite herbe à poux et la punaise terne

La petite herbe à poux

Pour la petite herbe à poux, aucune région analogue n'a été sélectionnée pour la Montérégie et le Saguenay-Lac-Saint-Jean puisque cette plante adventice est présente partout aux États-Unis. Toutes les régions identifiées comme analogues auraient donc pu être utilisées pour l'étude.

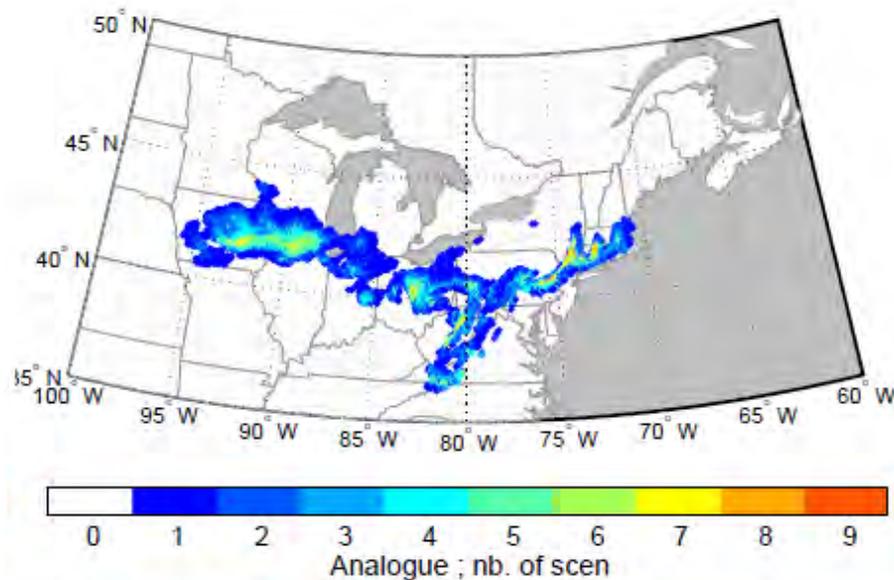


Figure 1. Nombre de scénarios climatiques identifiant la région comme analogue au climat futur projeté (2041-2070) de la région de la Montérégie.

Montérégie

Selon les modèles climatiques, le climat de la Montérégie à l'horizon 2041-2070 sera similaire à ceux des États de l'Iowa, de l'Illinois, de l'Indiana, de l'Ohio et de la Pennsylvanie (Figure 1).

Saguenay-Lac-Saint-Jean

Selon les modèles climatiques, le climat du Saguenay-Lac-Saint-Jean à l'horizon 2041-2070 sera similaire à ceux des États du Wisconsin, de la Pennsylvanie, de New York, du Massachusetts, du New Hampshire, du Maine ainsi que des régions de Lanaudière et la Montérégie (Figure 2).

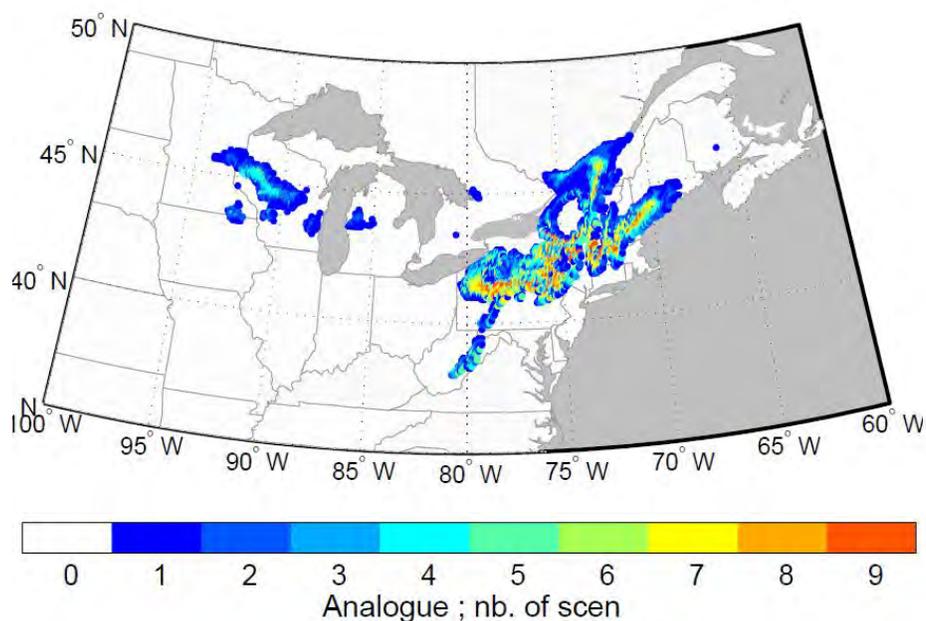


Figure 2. Nombre de scénarios climatiques identifiant la région comme analogue au climat futur projeté (2041-2070) de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean.

La punaise terne

Montérégie

Les régions analogues à la Montérégie sont présentées à la Figure 1 de la présente annexe. Parmi les régions analogues identifiées, ce sont les États de l'Ohio et de la Pennsylvanie où l'on retrouve les plus grandes surfaces cultivées de fraises (Tableau 1).

Tableau 1. Superficie cultivée en fraises en 2007 pour les régions analogues à la Montérégie. (Source USDA-NASS Census 2007)

Régions analogues	Superficie (ha)
Ohio	384
Pennsylvanie	346
Indiana	168
Illinois	147
Iowa	55
Québec	1862

Centre-du-Québec

Selon les modèles climatiques, le climat du Centre-du-Québec à l'horizon 2050 sera similaire à ceux des États du Wisconsin, de l'Illinois, de l'Ohio, de la Pennsylvanie, de la Virginie-Occidentale et du Connecticut (Figure 3).

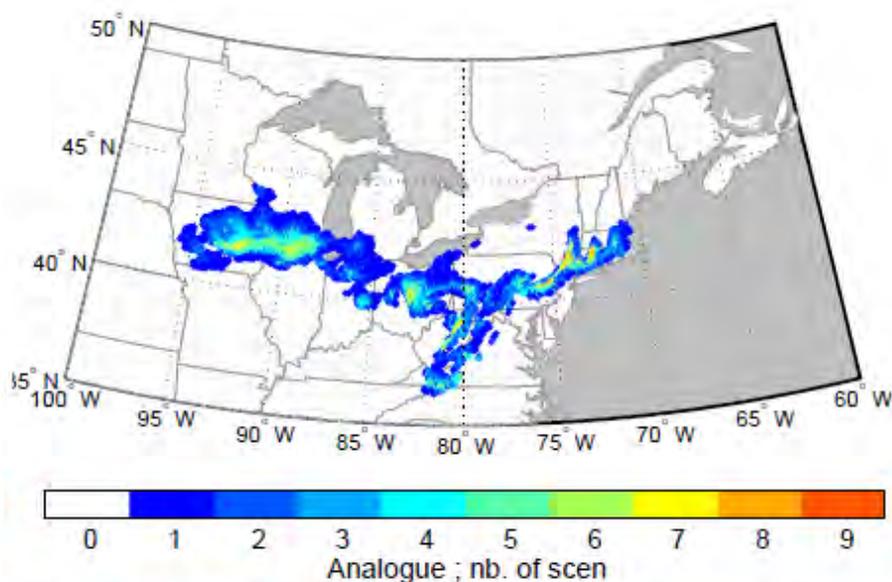


Figure 3 Nombre de scénarios climatiques identifiant la région comme analogue au climat futur projeté (2041-2070) de la région du Centre-du-Québec.

Parmi ces régions, ce sont les régions du Wisconsin, de l'Ohio et de la Pennsylvanie où l'on retrouve les plus grandes surfaces cultivées de fraises (Tableau 2).

Tableau 2 . Superficie cultivée en fraises en 2007 pour les régions analogues au Centre-du-Québec. (Source USDA-NASS Census 2007)

Régions analogues	Superficie (ha)
Wisconsin	497
Ohio	384
Pennsylvanie	346
Illinois	147
Connecticut	84
Virginie-Occidentale	31
Québec	1862

ANNEXE 5

Modifications attendues du climat Résultats détaillés

Tableau 1. Différences climatiques entre la période de référence (1970-1999) et la période future (2041-2070) pour la région de la Montérégie.

Montérégie	
Paramètres climatiques	25 ^e et 75 ^e percentiles
Moyenne de la température annuelle	+2,3 à +3,2 °C
Moyenne de la température printanière (MAM*)	+1,8 à +3,3 °C
Moyenne de la température estivale (JJA**)	+2,3 à +2,7 °C
Cumul de précipitations annuelles	+6,5 à +13,6 %
Cumul de précipitations printanières	+9,3 à +19,0 %
Cumul de précipitations estivales	-4,3 à +7,5 %
Début de la saison de croissance	-12,4 à -4,7 jours
Fin de la saison de croissance	+13,5 à +16,6 jours
Longueur de la saison de croissance	+ 18,6 à 26,6 jours

*MAM = Mars-Avril-Mai

** JJA = Juin-Juillet-Août

Tableau 2. Différences climatiques entre la période de référence (1970-1999) et la période future (2041-2070) pour la région de la Capitale-Nationale.

Capitale-Nationale	
Paramètres climatiques	25 ^e et 75 ^e percentiles
Moyenne de la température annuelle	+2,3 à +3,0 °C
Moyenne de la température printanière (MAM*)	+1,7 à +2,9 °C
Moyenne de la température estivale (JJA**)	+2,2 à +2,5 °C
Cumul de précipitations annuelles	+7,6 à +13,7 %
Cumul de précipitations printanières	+6,6 à +19,5 %
Cumul de précipitations estivales	+1,8 à +4,3 %
Début de la saison de croissance	-10,0 à -4,7 jours
Fin de la saison de croissance	+16,6 à +20,6 jours
Longueur de la saison de croissance	+ 21,8 à 30,6 jours

*MAM = Mars-Avril-Mai

** JJA = Juin-Juillet-Août

Tableau 3. Différences climatiques entre la période de référence (1970-1999) et la période future (2041-2070) pour la région du Bas-Saint-Laurent.

Bas-Saint-Laurent	
Paramètres climatiques	25 ^e et 75 ^e percentiles
Température annuelle	+ 2,1 à +2,9 °C
Température printanière (MAM)	+ 1,6 à +3,0 °C
Température estivale (JJA)	+ 2,1 à +2,5 °C
Cumul de précipitations annuelles	+ 8,0 à 13,4 %
Cumul de précipitations printanières	+ 5,4 à 17,9 %
Cumul de précipitations estivales	+ 3,9 à 7,2 %
Début de la saison de croissance	-8,2 à -4,1 jours
Fin de la saison de croissance	10,1 à 17,1 jours
Longueur de la saison de croissance	14,9 à 25,5 jours

*MAM = Mars-Avril-Mai
 ** JJA = Juin-Juillet-Août

Tableau 4. Différences climatiques entre la période de référence (1970-1999) et la période future (2041-2070) pour la région de la Lanaudière.

Lanaudière	
Paramètres climatiques	25 ^e et 75 ^e percentiles
Moyenne de la température annuelle	+ 2,3 à +3,0 °C
Moyenne de la température printanière (MAM)	+ 1,7 à +2,9 °C
Moyenne de la température estivale (JJA)	+ 2,3 à +2,6 °C
Cumul de précipitations annuelles	+ 9,5 à +13,5 %
Cumul de précipitations printanières	+ 11,9 à +20,5 %
Cumul de précipitations estivales	+ 0,1 à +5,5 %
Début de la saison de croissance	-9,9 à -5,3 jours
Fin de la saison de croissance	+ 16,5 à +18,7 jours
Longueur de la saison de croissance	22,3 à 27,9 jours

Tableau 5. Différences climatiques entre la période de référence (1970-1999) et la période future (2041-2070) pour la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean.

Saguenay-Lac-Saint-Jean	
Paramètres climatiques	25^e et 75^e percentiles
Moyenne de la température annuelle	+2,3 à +3,0 °C
Moyenne de la température printanière (MAM)	+1,8 à +2,8 °C
Moyenne de la température estivale (JJA)	+2,1 à +2,6 °C
Cumul de précipitations annuelles	+10,3 à +17,9 %
Cumul de précipitations printanières	+7,3 à +21,4 %
Cumul de précipitations estivales	+3,7 à +12,9 %
Début de la saison de croissance	-8,7 à -4,7 jours
Fin de la saison de croissance	+10,7 à +14,7 jours
Longueur de la saison de croissance	15,9 à 23,5 jours

ANNEXE 6
Compte-rendu des entrevues avec les producteurs

Compte-rendu des entretiens **Pyrale du maïs**

Partie I- Description des problèmes phytosanitaires et de leurs liens avec le climat

Problèmes phytosanitaires

Parmi tous les producteurs et conseillers rencontrés, tous étaient aux prises avec la problématique de la pyrale du maïs. Il est à noter que la culture du maïs sucré possède également tout un éventail de problèmes phytosanitaires autres que la pyrale du maïs, dont la pourriture des semis, le ver de l'épi et les légionnaires, pour ne nommer que ceux-là.

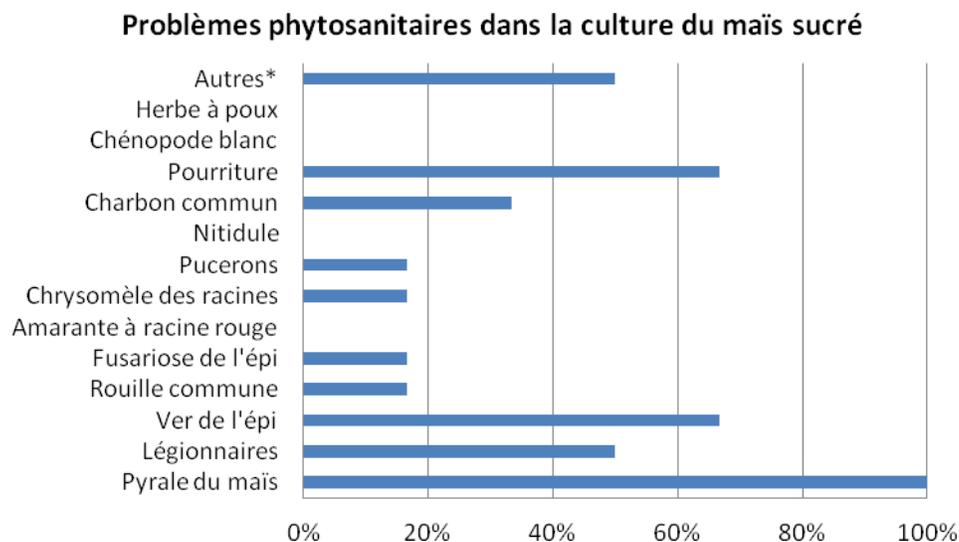


Figure 1. Incidences des problèmes phytosanitaires dans la culture de maïs sucré.

* Oiseaux, rats laveurs et vers-gris noir

La majorité des participants ont répondu que la pyrale du maïs demeure un ravageur récurrent, où l'on doit intervenir chaque année pour contrôler les dommages.

Outils de gestion

Les méthodes de contrôle utilisées pour lutter contre la pyrale du maïs sont en ordre d'importance, l'utilisation d'insecticides, l'enfouissement des résidus, le dépistage pour mieux cibler les interventions chimiques et l'utilisation des trichogrammes. La moitié des producteurs réalisaient le dépistage au champ, ou suivaient le Réseau d'avertissements phytosanitaires (RAP) pour limiter l'usage des insecticides. L'efficacité des méthodes de lutte varie beaucoup entre elles (vert : très efficace, jaune : modérément efficace, rouge : peu efficace). L'utilisation d'insecticides demeure donc l'outil le plus utilisé et le plus efficace à présent pour lutter contre la pyrale du maïs.

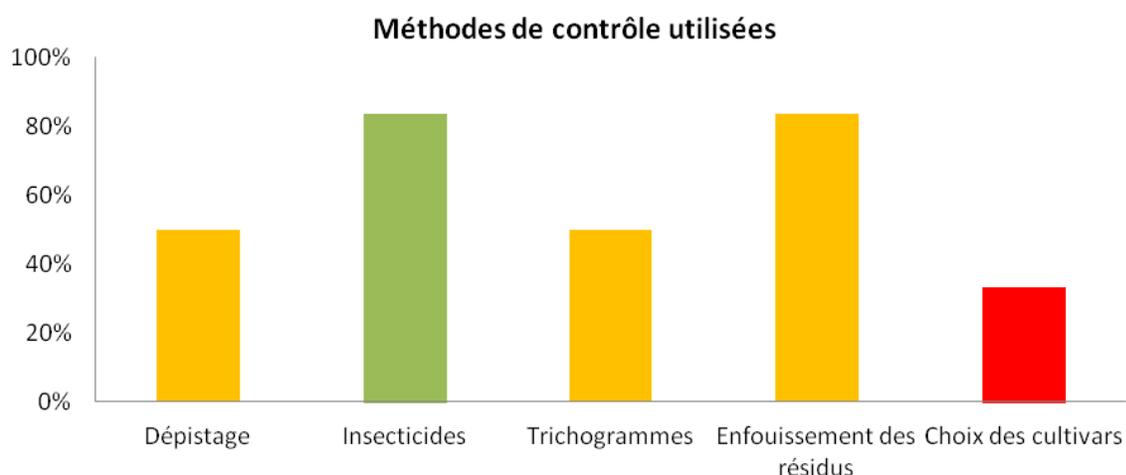


Figure 2. Méthodes de contrôle utilisées par les producteurs pour lutter contre la pyrale du maïs.

Sources d'informations pour la pyrale du maïs

Les informations recueillies par les producteurs concernant la problématique de la pyrale du maïs proviennent surtout du RAP (pour une information générale), des conseillers agricoles et des journées d'information.

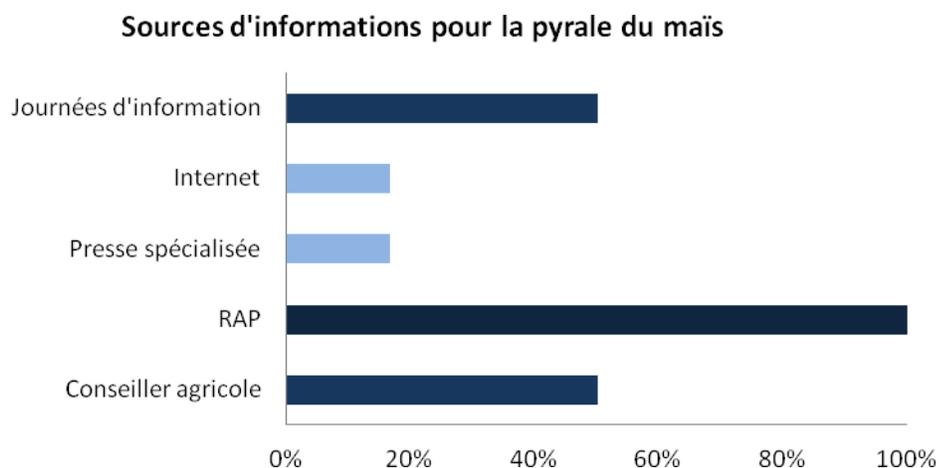


Figure 3. Sources d'informations des producteurs concernant la pyrale du maïs.

Évolution des conditions climatiques

Les producteurs ont observé quelques modifications du climat depuis les 10 à 20 dernières années, soit l'augmentation des vagues de chaleur durant l'été, l'allongement de l'automne, l'accroissement du nombre d'événements extrêmes (principalement les précipitations). Certains ont modifié leurs pratiques en utilisant des cultivars de températures plus chaudes, en semant plus tôt ou en récoltant plus tardivement.

Influence du climat sur la pyrale du maïs

La moitié des répondants croient que la problématique de la pyrale du maïs a évolué avec les changements climatiques en provoquant une arrivée plus hâtive des vols d'adultes et en favorisant le développement de la 2^e génération de pyrale. Certains ont aussi remarqué une augmentation générale de la densité des populations ainsi qu'une perte d'efficacité des insecticides ou des méthodes de lutte biologique. L'autre moitié croit plutôt que ce sont les pratiques culturales (plasticulture, primeurs) qui ont modifié le portrait, en favorisant le développement de la génération bivoltine en lui offrant un hôte plus tôt en saison.

Évolution des outils de lutte

Certains producteurs ont modifié leurs méthodes de gestion depuis les dernières années. Quelques-uns avaient fait l'essai des trichogrammes quelques années auparavant, mais sont maintenant retournés à l'utilisation des insecticides. Les principales raisons évoquées pour expliquer leur échec étaient le faible taux de contrôle des pyrales du maïs et la demande d'un suivi plus rigoureux. Par ailleurs, la disponibilité des insecticides s'est grandement améliorée et une rotation des modes d'action peut ainsi être instaurée afin d'éviter les phénomènes de résistance. Les applications par avion ont été abandonnées au profit des applications terrestres par machinerie. Lors de l'application, les traitements insecticides utilisent aussi beaucoup plus d'eau qu'auparavant afin de bien couvrir les plants et ainsi assurer une protection optimale. Certains mentionnent que le nombre de traitements était beaucoup moins grand auparavant que présentement (par exemple : intervalles de 10 jours au lieu de 7 jours). Pour les producteurs biologiques, certains ont dû doubler la dose recommandée de trichogrammes afin d'obtenir un contrôle satisfaisant de la pyrale du maïs.

Partie II- Impact des changements climatiques

Défis agricoles futurs

Parmi les cinq défis auxquels les entreprises agricoles risquent d'être confrontées aujourd'hui et dans les années à venir, les échanges commerciaux et l'augmentation de la concurrence mondiale, étaient ceux les plus préoccupants pour les participants. L'impact des changements climatiques sur la productivité agricole vient en quatrième position.

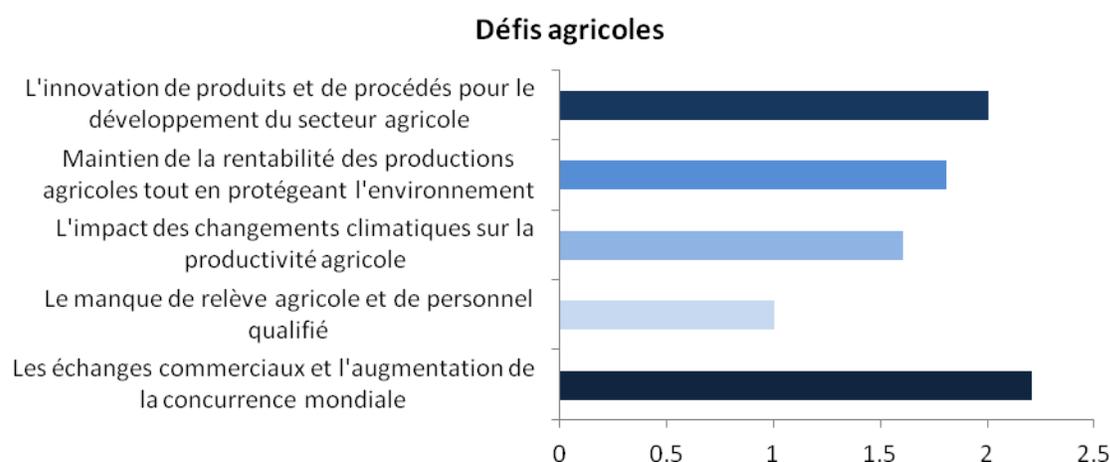


Figure 4. Les défis agricoles auxquels les entreprises agricoles risquent d'être confrontées aujourd'hui et dans le futur.

Informations sur les changements climatiques en agriculture

Selon leurs jugements, le niveau de connaissances des conseillers agricoles et des producteurs sur les changements climatiques en agriculture était en moyenne de 2,7 sur 5. Les principales sources d'informations sont les journaux et les revues, suivi des journées d'informations.

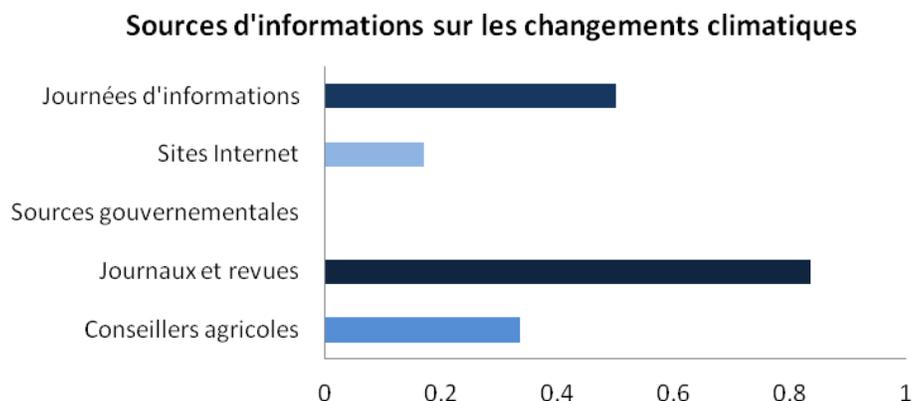


Figure 5. Sources d'informations des producteurs concernant les changements climatiques.

Impact des modifications du climat sur la production du maïs sucré

Les producteurs sont inquiets quant à l'augmentation des problèmes phytosanitaires en lien avec les changements climatiques. Ils sont particulièrement préoccupés par l'efficacité de leurs outils de lutte en situation où la densité de population de la pyrale du maïs serait beaucoup plus élevée, pouvant par exemple engendrer le développement de cas de résistance aux insecticides. L'augmentation de la saison de croissance est toutefois bien perçue par la plupart des personnes interrogées, en espérant pouvoir récolter un peu plus de maïs sucré qu'actuellement. Toutefois, certains croient que même si nous pouvions étendre la saison de production à l'automne, le marché ne serait plus présent (à partir de septembre, les consommateurs n'achètent pratiquement plus de maïs sucré). Ils sont aussi inquiets face à la hausse d'événements pluvieux durant le printemps, diminuant l'accessibilité au champ et provoquant des problèmes phytopathologiques lors de la levée.

Outils et moyens nécessaires pour faire face à la problématique

Les producteurs souhaiteraient pouvoir utiliser les cultivars transgéniques de maïs sucré, mais sont freinés par les craintes des consommateurs face à cette technologie. De plus, ils désireraient que le nombre et l'efficacité des méthodes de lutte biologique soient bonifiés. L'efficacité des trichogrammes devrait être améliorée, et un soutien aux producteurs devrait être offert lors de l'implantation de cette technique. D'autres sont confiants que de nouvelles molécules chimiques feront leur entrée sur le marché, et permettront ainsi de diminuer les risques de développement de résistance. Il serait toutefois nécessaire d'alléger les procédures d'homologation pour permettre une entrée plus rapide des pesticides ayant fait leurs preuves ailleurs. Les producteurs sont confiants dans leur capacité d'adaptation et pensent qu'ils sauraient probablement faire face à cette problématique dans le futur.

Partie III – Mesures de gestion dans les régions analogues

Possibilité d'utiliser les outils de gestion des régions analogues

L'utilisation des cultivars Bt est envisageable au Québec dans la mesure où la population serait réceptive à ce genre de technologie. Toutefois, les cultivars disponibles pour l'instant ne représentent pas toujours les variétés les plus intéressantes pour le goût. Une information neutre devrait être fournie aux producteurs et aux consommateurs afin de leur permettre de faire un choix éclairé quant à l'utilisation et la consommation du maïs Bt. Par ailleurs, l'augmentation probable du nombre de traitements insecticides risque d'engendrer plus de coûts pour les producteurs et le choix d'un cultivar transgénique plus dispendieux, mais offrant un bon contrôle sera beaucoup plus attrayant.

Outils de communication

Les producteurs et les conseillers agricoles semblent préférer le support de conseillers agricoles formés sur le sujet ainsi que les formations comme outils de communication. Peu sont intéressés par les études de cas, les programmes gouvernementaux et les guides de bonnes pratiques.

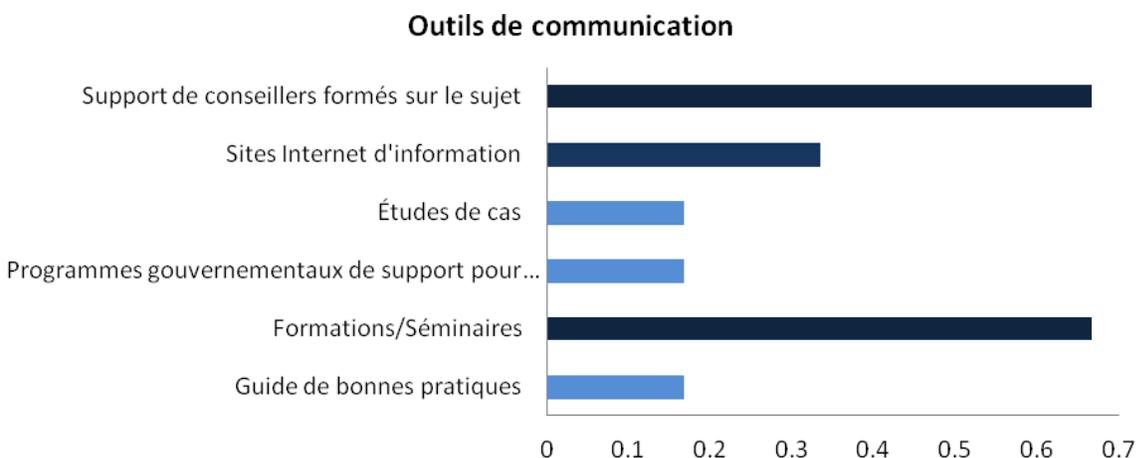


Figure 6. Outils de communication des producteurs.

Compte-rendu des entretiens – Fusariose de l'épi

Problèmes phytosanitaires

Parmi tous les problèmes phytosanitaires associés au blé, la fusariose de l'épi était celui le plus couramment rencontré, suivi de la légionnaire uniponctué.

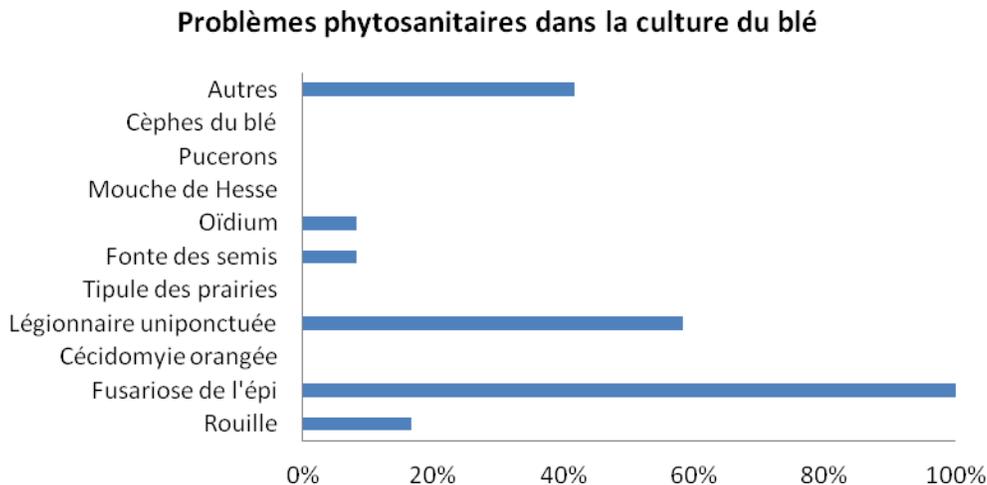


Figure 7. Incidences des problèmes phytosanitaires dans la culture de blé.

Récurrence des épidémies de fusariose

Bien qu'aucun répondant n'ait répondu que la fusariose était problématique chaque année, la plupart la classaient entre 2 à 4 années sur 5. Elle demeure donc une problématique récurrente pour les producteurs de blé.

Outils de gestion

Les méthodes de contrôle utilisées présentement pour diminuer les risques de fusariose sont principalement les rotations afin d'éviter de semer du blé sur un retour de céréales ou de maïs. Les fongicides représentent le deuxième outil le plus utilisé pour lutter contre la fusariose. Parmi toutes ces méthodes, seules les rotations étaient jugées comme méthode satisfaisante pour réduire les risques de fusariose, les autres méthodes étant jugées modérément efficaces.

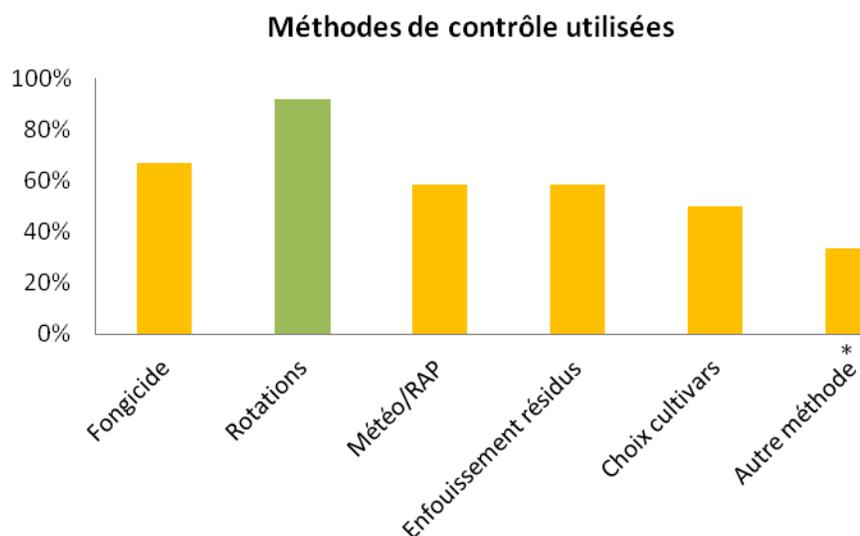


Figure 8. Méthodes de contrôle utilisées par les producteurs pour lutter contre la fusariose de l'épi.

* semer hâtivement ou opter pour la culture du blé d'automne
 RAP = Réseau d'avertissement phytosanitaire (MAPAQ)

Sources d'informations pour la fusariose

Les sources d'informations liées à la fusariose sont principalement les conseillers agricoles, suivi de la presse spécialisée et du Réseau d'avertissements phytosanitaires (RAP).

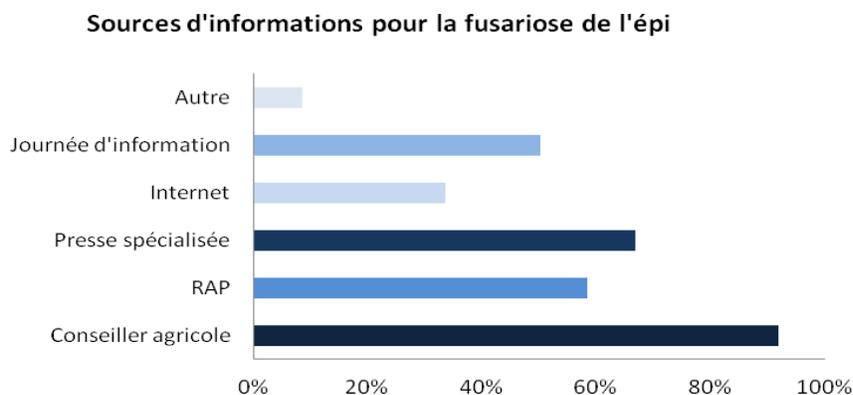


Figure 9. Sources d'informations des producteurs concernant la fusariose de l'épi.

Évolution des conditions climatiques

La plupart des producteurs et des conseillers agricoles disent avoir observé des modifications du climat depuis les dernières années. Les modifications les plus couramment citées sont l'augmentation des événements extrêmes comme les pluies printanières et l'arrivée plus tardive de l'automne. Les canicules estivales plus fréquentes, l'accroissement de l'intensité des ravageurs et des maladies, les semis plus hâtifs, les stress hydriques plus fréquents sont autant d'observations mentionnées par les répondants.

Influence du climat sur la fusariose de l'épi

À savoir si les producteurs et les conseillers agricoles ont remarqué une modification dans les intensités d'épidémie liées aux changements climatiques, les réponses sont plutôt partagées. C'est 58 % des répondants qui croient que les symptômes visuels de fusariose ainsi que les niveaux de DON (désoxynivalénol) ont augmenté depuis les dernières années, et que cela serait attribuable aux changements climatiques. Par ailleurs, la portion restante croit que la problématique de la fusariose de l'épi n'a pas évolué depuis les dernières années, mais que c'est plutôt la rigueur des normes pour les niveaux de DON qui s'est renforcée depuis quelques années.

Évolution des outils de lutte

Les méthodes de gestion pour contrôler la fusariose ont évolué depuis les dernières années. Premièrement, les fongicides sont disponibles seulement depuis environ 5 ans, et donc cet outil demeure encore nouveau. Les rotations aussi sont maintenant beaucoup plus respectées depuis que l'on sait que les spores de fusariose peuvent se retrouver sur les résidus de maïs ou des céréales. La récolte plus hâtive, puis le séchage des grains, permettent également de réduire le risque du développement DON. Semer hâtivement permet à certains producteurs d'éviter les conditions favorables au développement de la maladie lors de la floraison du blé.

Partie II- Impact des changements climatiques

Défis agricoles futurs

Parmi les cinq défis auxquels les entreprises agricoles risquent d'être confrontés aujourd'hui et dans les années à venir, le maintien de la rentabilité des productions agricoles tout en protégeant l'environnement était celui le plus préoccupant pour les participants. L'impact des changements climatiques sur la productivité agricole vient en 4^e position.

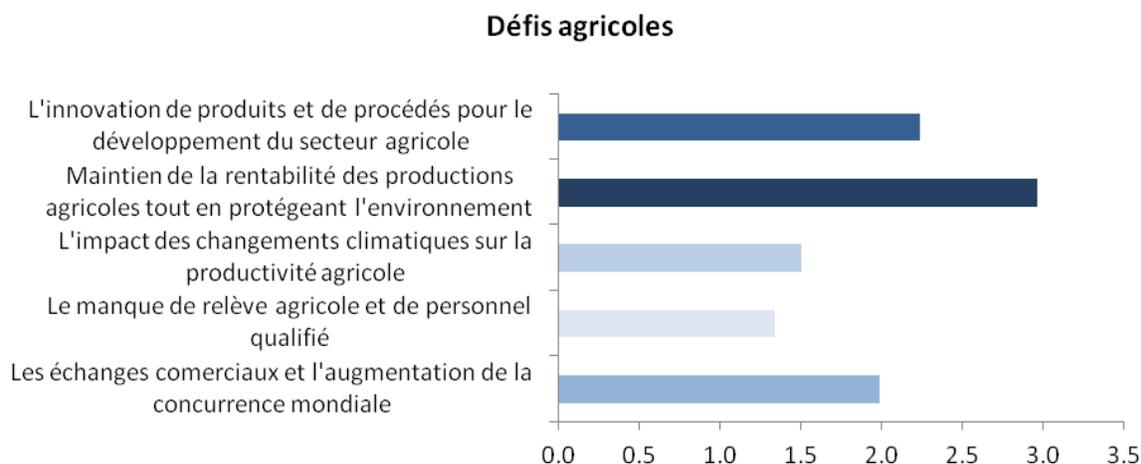


Figure 10. Les défis agricoles auxquels les entreprises agricoles risquent d'être confrontées aujourd'hui et dans le futur.

Informations sur les changements climatiques en agriculture

Selon leurs jugements, le niveau de connaissances des conseillers agricoles et des producteurs sur les changements climatiques en agriculture était en moyenne de 3,4 sur 5. Les principales sources d'informations sont les journaux et les revues.

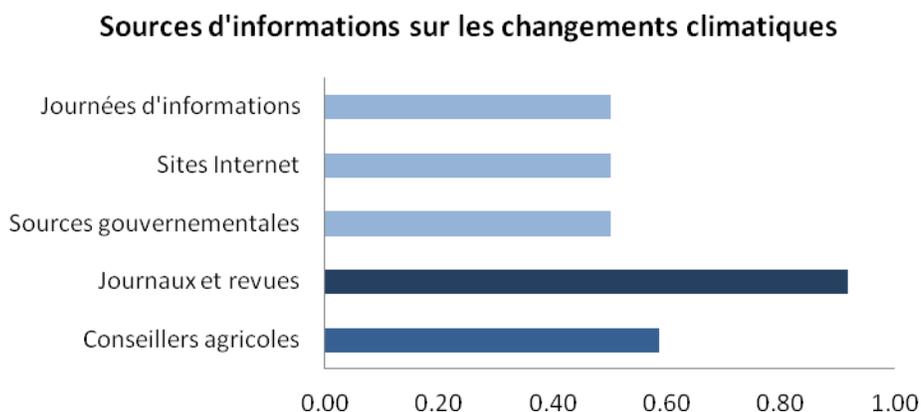


Figure 11. Sources d'informations des producteurs concernant les changements climatiques.

Impact des modifications du climat sur la production de blé

Les producteurs voient d'un bon œil l'augmentation des températures, en leur permettant peut-être de cultiver du blé d'automne, et donc possiblement d'augmenter leurs rendements. Les hausses de précipitations durant le printemps représentent un scénario inquiétant puisqu'elles retarderaient l'entrée au champ pour le semis. La culture du blé pourrait prendre de l'expansion au Québec avec les changements climatiques, toutefois, elle demeurerait probablement une culture moins rentable que le maïs et le soya. Les producteurs sont inquiets face à l'augmentation possible de l'intensité des épidémies de fusariose avec les changements climatiques.

Outils et moyens nécessaires pour faire face à la problématique

Pratiquement tous les participants s'entendent pour dire qu'il y a un grand besoin au niveau de la recherche pour développer de nouveaux outils de lutte contre la fusariose, tels que les cultivars résistants à la fusariose. Les fongicides représentent également un enjeu majeur puisque leur efficacité est souvent mise en doute. Le développement de produits plus performants serait donc souhaitable.

Partie III – Mesures de gestion dans les régions analogues

Possibilité d'utiliser les outils de gestion des régions analogues

Parmi les outils qui ne sont pas actuellement utilisés ici, aucun de semble applicable au Québec. L'utilisation de différentes dates de semis pour étaler le risque de fusariose (en ayant des dates de floraison différentes) n'est pas envisageable au Québec avec ses petites superficies de blé cultivées. Par ailleurs, l'utilisation de différents cultivars à maturités dissimilaires aurait plus de chance à s'intégrer au Québec, mais demanderait beaucoup plus de logistique pour l'entreposage des grains. L'outil interactif pour la prévision de risque est peu pertinent pour les producteurs. La plupart n'utilisent pas les informations météorologiques pour déterminer l'utilisation d'un fongicide ou non. Les producteurs rencontrés utilisaient soit systématiquement un fongicide, soit aucun fongicide.

Outils de communication

Les producteurs et les conseillers agricoles semblent préférer le soutien de conseillers agricoles formés sur le sujet comme outils de communication. Peu sont intéressés par les études de cas et les programmes gouvernementaux.

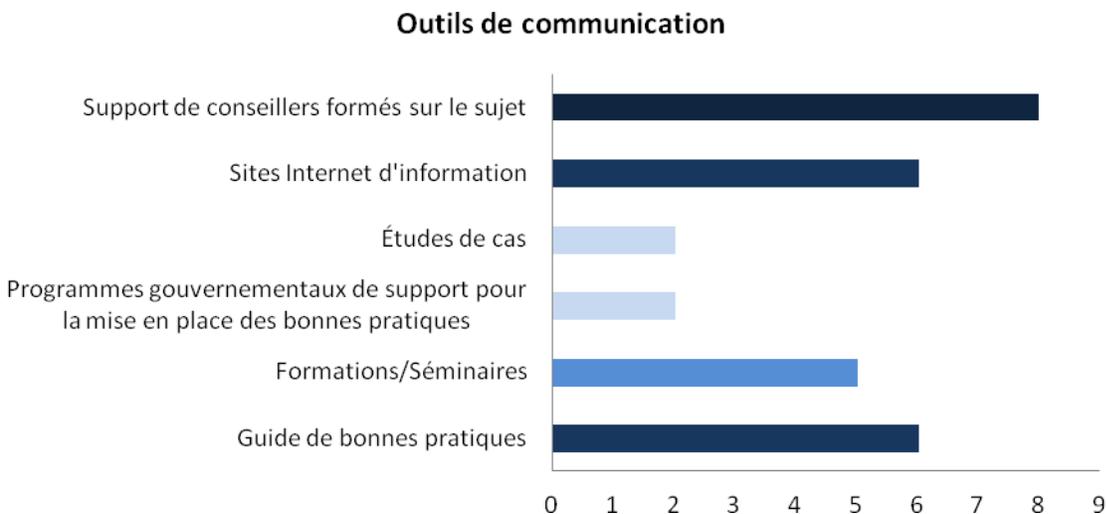


Figure 12. Outils de communication des producteurs.

ANNEXE 7

Entrevues réalisées avec différents spécialistes aux États-Unis pour connaître la situation des ennemis des cultures dans les différentes régions analogues

Tableau 1. Réponses des spécialistes sur la situation de la pyrale du maïs aux États-Unis

<i>Contact</i>	<i>Is this pest problematic ? Only in sweet corn ?</i>	<i>What is the typical life cycle ?</i>	<i>Is the abundance of ECB have increased or decreased recently ?</i>	<i>What are the management strategies adopted by the majority of producers ?</i>	<i>Are there new technologies that are promising to control ECB ?</i>	<i>Do you think that climate change can have an impact on this pest ?</i>
INDIANA Krupke, Christian H [ckrupke@purdue.edu]	It is, mainly in sweet corn and occasionally in some specialty varieties of field corn where Bt hybrids are not popular or available. Indiana is not very diverse agriculturally, so other crops are not really available for ECB.	Generally 2 generations a year. First flight late May early June, second flight late July – early August. Larval damage occurs about 2 weeks after each flight. The second flight is typically not very problematic since most corn is no longer vulnerable.	Definitely increased. Reasons are unknown, but far more reports of treatable levels of ECB in field and sweet corn. Prior to that level had been very low for over a decade.	Sweet corn = timed insecticide applications. Field corn = Bt corn for the vast majority. If not available for certain hybrids insecticides are used.	I believe the cyazypyr/rynaxypyr (coragen) products are labelled for this purpose.	Certainly possible. Although it may be a negative impact on populations, since overwintering success is partially based upon snow cover. If snow cover is not abundant due to climate changes, I could foresee a reduction in populations in some areas.
MASSACHUSETTS Ruth Hazzard [rhazzard@umext.umass.edu]		two generations, both the NY and the Iowa strains are bivoltine here. For some reason the univoltine strain has not been important in New England.		growers need to spray for both generations, but of course here it is also complicated by migratory flights of corn earworm and fall armyworm in July and August		

<p>NEW YORK</p> <p>Abby Seaman [ajs32@cornell.edu]</p>	<p>Yes, it's been our primary pest in sweet corn. Also a pest in peppers and occasionally apples.</p>	<p>We have both bivoltine and univoltine populations. The first generation bivoltine population flight is from mid-May-mid-June. The second flight is late July-late August. We have two and sometimes a partial third generation, depending on the number of degree-days accumulated. The univoltine flight peaks in mid-July.</p>	<p>The abundance has been generally decreasing; we hypothesize because of the increasing adoption of Bt transformed field corn.</p>	<p>Most sweet corn producers apply foliar insecticides to control ECB. Some are using Bt transformed sweet corn. A few organic or smaller acreage growers are releasing <i>Trichogramma ostriniae</i>.</p>	<p>Right now some fresh market growers and the vegetable processors are wary of Bt transformed corn because of possible consumer backlash. However, we heard of one processor accepting Bt corn last season, and once the barriers are down I think that technology will be widely adopted.</p>	<p>Yes, I think we'll have earlier emergence and move toward a full third generation.</p>
<p>OHIO</p> <p>Jim Jasinski Erin Hodgson</p>	<p>We have been conducting insecticide evaluation trials on sweet corn for the past several years and ECB does not seem to be our biggest pest of concern, rather corn earworm is.</p>	<p>2 generations</p>	<p>In general my sense is that ECB is not as big a pest in sweet corn as it has been in past years. This is broadly attributed to the use of more Bt's all around the country.</p>	<p>In most cases, Bt corn (Attribute) seems to do a good job on ECB, but looks better with 2-4 sprays added.</p>		

<p>PENNSYLVANIA</p> <p>Dennis D Calvin [ifa@psu.edu]</p> <p>John Tooker [tookert@psu.edu]</p>	<p>European corn borer is still common in Pennsylvania and can be found in sweet and field corn, along with numerous other crops.</p>	<p>Pennsylvania is in a transition zone between the multivoltine E and Z races and the univoltine Z-race. Thus, all three types occur and can co-occur in some geographic locations across the state.</p>	<p>Since the introduction of GMO technology populations have fallen off some, but continue to be present.</p> <p>Corn borer populations in PA have generally declined in PA over the past 10 yr, but there are some parts of the state that are exceptions to this general statement.</p>	<p>most folks growing sweet corn continue to rely on sprays because the Bt sweet corn seed is so expensive. There certainly are some out there, but most rely on chemical treatments. I have not encountered many folks that use <i>Trichogramma</i> despite studies showing it can be effective.</p>		<p>Climate change can influence race structure and geographic distribution. We in fact generated simulations of the effects of climate change on ECB populations.</p>
--	---	---	---	---	--	---

Tableau 2. Réponses des spécialistes sur la situation de la fusariose de l'épi aux États-Unis

Contact	<i>Are you using winter wheat or spring wheat ?</i>	<i>What is the typical plantation date for wheat in your region and the moment of anthesis ?</i>	<i>Is this disease is problematic in your region each year ? Since 10 years, have you observed an increase or decrease of this disease ?</i>	<i>What is the mean disease incidence level and/or DON levels in Ohio ?</i>	<i>What are the management strategies adopted by the majority of producers ?</i>	<i>Are there new technologies that are promising to control FHB ?</i>	<i>Do you think that climate change (increased temperature and changed precipitations) can have an impact on this disease ?</i>
OHIO Pierce Paul [paul.661@osu.edu]	Winter wheat	Plantation is anywhere between Sept. 23 (north of the state) and Oct. 5 (in the south)	We had our biggest epidemic on record in 1996, and just recently, in 2010, our second biggest. I would say that FHB problems are becoming more frequent.	It depends on the year. In field surveys conducted over the last 10 years, we have seen mean FHB incidence (% diseased spikes) from 0 to over 70%, with DON ranging from 0 to 30 ppm.	Fungicide application, resistance, crop rotation away from corn and wheat	Grain harvesting strategies and integrated approaches.	Certainly. In fact one of my students is preparing a grad student proposal on the subject.
PENNSYLVANIA Greg Roth [gwr@psu.edu]	Winter wheat	Generally our winter wheat is planted between 9/25 and 10/10. anthesis is the last two weeks in May, depending where you are in our state.	The disease has been severe in about 3-4 of the last 10 years with the worst in the last two years.	We don't collect good quantitative data on the disease, but in 2010, I would say that 50-60 % of the wheat had vomitoxin levels above 1 ppm.	Our growers are first relying on fungicides, then some rotation, but corn is a dominant crop, then variety selection and not much on staggering maturities.	-	I do think our changing climate may be having some effect on this disease. This year we had the worst predictions ever on the national computer scab forecasting tool we use here in the states.
PENNSYLVANIA Alyssa Collins [aac18@psu.edu]	Farmers almost always plant winter wheat here. Spring wheat tends to do poorly, and weather makes it difficult to get into the field for a spring planting.	PA is rather large, so we really have 3 zones, climatically. Target plant dates: Zone 1. Sept 20-Oct 3; Zone 2. Sept 25-Oct 8; Zone 3. Oct 1- Oct 15. Anthesis then ranges from mid-May to mid-June.	I've been in my position for 2 years now, so I don't have a good feel for this over the last decade. Anecdotally, I understand that it has been a problem in recent history, especially 2009 and 2011.	This is difficult to answer. We haven't done a comprehensive survey of growers on this topic. In the small fungicide study I did this year at one location, the mean DON level was 4.7 ppm. But, like I said, there is great variation in the state. Growers in the southern part dealt with levels around 3ppm while those to the north had little to no disease and toxin develop.	I would say that most farmers rely first on rotation, then fungicides when it comes to this disease. There is interest in resistant varieties, but many seed suppliers in the area only offer a few varieties of winter wheat.	I don't know of any. I am hoping that seed companies see fit to invest in more breeding for FHB resistance in wheat.	I just don't have enough experience yet to have an informed opinion on this one.
WISCONSIN Paul Esker [esker@wisc.edu]	Primarily winter wheat (as a percentage compared to	Typical planting date for winter wheat is late September into	Epidemics are probably in the 1 to 4-8 year range, which is some variable in terms of the severity of the	The mean disease incidence and DON fluctuates from season to season based on weather at anthesis and	Management strategies include crop rotation away from a cereal. Fungicides are used at anthesis, if conditions are warranted. Varietal	I think, based on the current data, the integrated management	Of the two and our experiences, rainfall patterns would be a major driver.

	spring wheat, it would be ~ 96-97% winter wheat to 3-4% spring wheat, at best)	mid-October. Anthesis (winter wheat) can vary by location in WI meaning areas away from Lake Michigan probably are in the first to second week of June. There is a small area along Lake Michigan that is delayed because of the weather and might be 7-10 days later.	epidemic. We can find disease each year, but incidence probably remains 5% or less.	cropping practices. On average though, I would say low. DON levels vary based on weather and cropping practices but in a non-epidemic year are typically less than 2 ppm to 2-3 ppm.	resistance is an important tool and data from regional trials indicate that a combination of resistance and fungicide can be effective in further reducing mycotoxin levels. Crop sequences in WI are typically corn-soybean or corn-corn-soybean...wheat has a smaller acreage and in those situations we can see a corn-wheat-soybean or corn-soybean-wheat rotation. Alfalfa is a large crop and there is probably a little bit of mixed rotations with that as a crop.	options of variety selection and fungicide offer promise	Temperature is important but I think extreme events like increased rainfall could be a major factor. We still have a lot of questions about intermittent rainfall/wetting patterns on the risk of disease.
--	--	--	---	--	--	--	--

Tableau 3. Réponses des spécialistes sur la situation du doryphore de la pomme de terre aux États-Unis

<i>Contact</i>	<i>Is this pest problematic ?</i>	<i>What is the typical life cycle ?</i>	<i>Is the abundance of CPB have increased or decreased recently ?</i>	<i>What are the management strategies adopted by the majority of producers ?</i>	<i>Cases of insecticide resistance ?</i>	<i>Are there new technologies that are promising to control ECB ?</i>	<i>Do you think that climate change can have an impact on this pest ?</i>
WISCONSIN Russell Groves [groves@entomology.wisc.edu]	Absolutely!! Has always been considered a 'key pest' species in potato pest management here in the state and within the upper Midwest and Northeastern Region where other potato is grown (e.g. ND, MN, WI, MI, NY, and ME). They are much less of a 'severe' issue in potato growing regions of the inter-mountain west (CO, NV, WA, OR, ID), southwest (CA), and mid-south (TX) areas.	We grow potatoes principally in two regions of the state, northern (seed production areas) and central (chip, processing and fresh) regions. Although each region is not too far from each other (ca. 130-150 km), the life history of the insect is a bit different. Specifically, the population in central WI is generally bivoltine, and with weather permitting, may try to produce a partial 3 rd generation. Populations in northern WI are generally univoltine, with some late season pressure at times from a partial 2 nd generation.	With the advent of GMO – corn in much of WI, populations of European corn borer have generally been suppressed now for the last 8-10 years. There are certainly discrete regions of the state where one can find populations that can still damage potato (particularly Russet Norkotah), but they have become less of a problem. The same can be said for other crops that can be affected by ECB including snap beans and sweet corn.	This is in transition. Since 1995 (initial registration of imidacloprid by Bayer Crop Sci), a larger portion of our industry has relied upon the at-plant neonicotinoids as their principle means of CPB control (and this also controlled PLH and colonizing aphid species). Since approximately 2005, we have documented localized farms with moderate to severe levels of resistance. A symptom of pending 'field resistance' is an erosion of long-term control with the neonicotinoids. This has been happening over much of the state and the average interval of control of CPB has now been reduced from approximately 80-90 days down to 50-60 days post-planting.	See previous response. We have been measuring levels of resistance (using topical assays) since 2006. We have assayed over 60 populations in the last 6 years and see a wide range in LD50's. We have some populations with RR as high as 50-70 fold resistance when compared to the susceptible reference control strain of CPB.	There are some new active ingredients that are in development which have been integrated into IPM and IRM strategies. Some are a few years old now (spinosad, spinetoram, chlorantraniliprole, cyantraniliprole, abamectin, novaluron, etc..) while others are under development (e.g. # cmpds).	Certainly climate change could be affecting this insect. It's emergence phenology and voltinism specifically. In fact, we have a currently funded project examining the relationship between neonicotinoid resistance and extended diapause/delayed emergence. This project is funded by the USDA and involves researchers from MI, NY, and VA.
NEW YORK Sandy Menasha <sr45@cornell.edu>	Yes. CPB is very problematic in NY, especially on the Eastern end of Long Island	We typically see 2 and sometimes 3 generations per year with the first major outbreak occurring	CPB abundance has been pretty consistent over the past 10 years. We are now beginning to see more	Majority of producers use an in-furrow application of imidacloprid at planting and follow	Yes. It has been a major obstacle in management of this pest	Yes. We have tested newer materials that have shown promise but unfortunately do not expect them to be	I'm sure it will. Increased temperatures likely result in more generations per year

		around May 25 and the second generation around July 10 or so.	of an increase.	with foliar sprays using spinosad, kryocide, and or acetamidprid		registered in our area due to leaching potential and groundwater contamination	
Carol R. MacNeil <crm6@cornell.edu>	Yes, definitely	Two generations per year; adult cpb just beginning to emerge now, usually a little later; summer adults come out in mid-summer	Abundance was huge before imidacloprid was labeled, dropped rapidly as growers began using it; in the past 2 – 3 years resistance to imidacloprid has shown up on muck potato farms with little to no rotation, or only rotating to adjacent fields. Growers had been using imidacloprid every year. Now they are looking at alternatives to imidacloprid and thankfully some have come along: spinosyns (radiant sc and blackhawk), diamides (chlorantraniliprole)	In terms of the majority of acreage, spray insecticides, try to rotate.	Yes, above	Yes, above	It could but we'd have to add on quite a bit to the season to have time enough for 3 generations. Sandy menasha from long island could tell you more about the potential.

