

IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET MESURES D'ADAPTATION POUR LES RAVAGEURS PRESENTS ET POTENTIELS EN GRANDES CULTURES AU QUEBEC.

PV-3.2-DP-CÉROM-5 (MAPAQ) / 550020 (OURANOS)

30 JUIN 2015 - 30 JUIN 2019

RAPPORT PREPARE PAR JULIEN SAGUEZ (CÉROM)

**ONT PARTICIPE A LA REALISATION DE CE PROJET : ANNIE-ÈVE GAGNON (CÉROM/AAC), JULIE-ÉLEONORE
MAISONHAUTE (CÉROM), DJAZIA KICHOU (CÉROM/AAC), ANNIE-CHRISTINE BOUCHER (CÉROM),
CHRISTINE TOMA (CÉROM), PATRICK GRENIER (OURANOS), TRAVIS LOGAN (OURANOS), ANNE BLONDLOT
(OURANOS), GAETAN BOURGEOIS (AAC), JOSIANNE CARON (AAC) ET NATHALIE BEAUDRY (AAC)**

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



Agriculture and
Agri-Food Canada

Agriculture et
Agroalimentaire Canada



Agriculture, Pêcheries
et Alimentation
Québec



Table des matières

1. Contexte.....	5
2. Objectifs.....	6
3. Compte-rendu de la revue de la littérature	7
4. Méthodologie	9
5. Résultats	18
6. Analyse et discussion.....	42
7. Conclusion et recommandations	44

1. Contexte

Au Québec, les grandes cultures (maïs, soya, blé, canola) couvrent plus d'un million d'hectares et représentent un important volet économique. Les conditions météorologiques actuelles et les changements climatiques (CC) futurs qui affectent la planète ont et auront un impact sur la production agricole. Les prévisions associées à ces changements climatiques sont par exemple, une augmentation des températures moyennes et une hausse du nombre de degrés-jours, des hivers moins rigoureux, une augmentation des événements météorologiques extrêmes (ex : canicules et sécheresse, pluies torrentielles, ...). Tout cela aura bien évidemment un impact sur les cultures, mais aussi sur leurs ennemis, qu'ils s'agissent d'espèces endémiques (déjà présentes) ou d'espèces exotiques envahissantes (EEE). Plusieurs facteurs bioclimatiques peuvent affecter la durée de croissance des plantes, mais aussi leur exposition aux ennemis des cultures (insectes, maladies, ...). Il est donc nécessaire d'envisager les répercussions de plusieurs scénarios de changement climatique, afin d'anticiper les éventuels problèmes phytosanitaires que pourraient rencontrer les producteurs et toute la filière agricole. Cela sera indispensable s'ils veulent effectuer une agriculture compétitive tout en assurant le maintien des rendements et des coûts de production.

Dans ce contexte, il convient d'acquérir des connaissances (ex. : synthèses bibliographiques, fiches techniques) et de développer des outils (ex. : modèles bioclimatiques, cartes de distribution actuelles et futures des cultures et de leurs ennemis) pour aider la filière agricole (producteurs, agronomes, chercheurs, industriels, et décideurs) à mettre en place des mesures d'adaptation pour pallier à ces changements climatiques et environnementaux, dans le cadre d'une agriculture durable.

2. Objectifs

Trois objectifs principaux ont été définis dans ce projet :

- Identifier les principales espèces d'insectes et maladies des grandes cultures qui seront affectées par les changements climatiques parmi celles déjà présentes au Québec ou pouvant potentiellement s'y établir.
- Évaluer les impacts des changements climatiques sur l'aire de distribution, le développement phénologique ou la capacité d'établissement d'espèces ciblées ainsi que sur les dommages aux cultures.
- Identifier les mesures d'adaptation possibles pour les espèces ciblées, et plus globalement pour la protection des grandes cultures.

3. Compte-rendu de la revue de la littérature

Au cours des dernières années, des changements ont déjà pu être observés sur certaines espèces végétales et animales en lien avec les variations de températures et de précipitations, favorisant ainsi la dissémination et la propagation de certaines maladies et insectes ravageurs. Certaines espèces disparaissent, d'autres apparaissent ou s'étendent dans des environnements différents de leur aire de répartition d'origine. Couplés à l'intensification des échanges commerciaux, les CC représentent donc des facteurs de risque dans un contexte agricole. Ainsi, dans l'hémisphère nord, les CC ont conduit depuis quelques années à l'extension de l'aire de répartition de plusieurs espèces vers le nord, pouvant causer d'importants changements dans le cadre de la phytoprotection. Ces espèces qui sont parfois déjà dommageables pour les cultures pourraient causer, dans un avenir plus ou moins lointain, des dommages plus importants qu'elles n'en causent actuellement.

De plus, les espèces exotiques envahissantes (EEE) représentent une menace pour l'environnement et l'économie d'une région, d'un pays ou d'un continent. En effet, ces espèces nuisibles (champignons, bactéries, virus, phytoplasmes, végétaux, animaux) peuvent naturellement ou accidentellement envahir des écosystèmes différents de leur aire de répartition d'origine, s'y reproduire, les coloniser et ainsi modifier la biodiversité et l'équilibre des écosystèmes. Dans un contexte agricole, les EEE peuvent entrer en compétition avec des espèces indigènes, entraînant le déclin de ces dernières. De plus, les EEE possèdent des capacités d'adaptation qui leur permettent de coloniser efficacement leurs nouveaux territoires. Le contrôle des EEE est souvent difficile, car ces espèces arrivent souvent dans de nouveaux territoires où leurs ennemis naturels (ex. : prédateurs, parasitoïdes) ne sont pas encore présents ou non adaptés aux conditions environnementales.

Les CC auront aussi des impacts sur les cycles de vie et les paramètres biologiques (p. ex. vitesse de développement, nombre de générations) de ces espèces (indigènes et exotiques), sur le synchronisme avec leurs hôtes ou leurs ennemis naturels ou encore sur les liens trophiques. Du fait des CC, les espèces indigènes et les EEE pourraient donc provoquer des pertes de rendement majeures liées à la phytophagie ou à l'introduction et la dissémination de maladies pouvant avoir des répercussions sur des cultures ciblées.

Le Québec n'est pas épargné par cette progression des espèces et il est fort probable que dans les prochaines décennies, on assiste à l'introduction, l'établissement et la dispersion de nouveaux ennemis des cultures, qui sont actuellement présents aux États-Unis ou dans des environnements similaires à ceux rencontrés au Québec. Dans l'optique d'une agriculture durable, il convient donc d'identifier les espèces indigènes et exotiques menaçantes et l'influence des CC sur ces espèces en grandes cultures. Ceci permettra d'évaluer et d'anticiper dès aujourd'hui les effets combinés potentiels des CC, des espèces indigènes et des EEE sur les grandes cultures. La modélisation et l'anticipation des risques de propagation (déplacements, cycles de vie et générations) des maladies et des ravageurs rendront possible la mise en place des programmes de recherche et des stratégies visant à lutter contre ces espèces afin de minimiser l'utilisation des pesticides et de favoriser l'utilisation de méthodes de lutte alternatives. Au cours des dernières années, de nombreux articles scientifiques ont été publiés sur la répartition et la propagation potentielles de plusieurs espèces. De plus des réseaux de surveillance ont été mis en place pour suivre l'évolution des infestations de certaines espèces à partir des sites d'introduction.

De nombreuses études ont été réalisées au cours des dernières années à travers le monde pour évaluer l'impact des changements climatiques sur l'expansion des aires de répartition des plusieurs espèces d'ennemis des cultures. Ces études sont basées sur l'utilisation de modèles prévisionnels qui permettent de prédire où une espèce serait en mesure de s'établir en fonction de différents scénarios de réchauffement climatique. Souvent ces analyses sont globales et à l'échelle planétaire.

Dans un contexte d'amélioration de la phytoprotection au Québec, il convient de réaliser des modèles prévisionnels plus régionalisés qui tiennent compte des réalités climatiques et agricoles de la province. Au cours des dernières années, plusieurs projets de recherche financés par le MAPAQ, OURANOS et Agriculture et Agroalimentaires Canada ont été réalisés pour modéliser le développement de plusieurs ennemis des cultures, notamment dans les petits fruits et le soya. Il existe très peu de modèles prévisionnels dans les grandes cultures. De plus on sait peu de choses sur les mesures d'adaptation qui pourraient être mises en place au Québec pour lutter contre l'introduction d'espèces exotiques envahissantes. La recherche d'analogues spatiaux permet d'identifier des régions qui actuellement ressemblent à ce que sera le Québec dans le futur. Les données disponibles dans ces régions concernant les espèces qui pourraient être dommageables au Québec dans le futur constituent une source d'information qui peut servir à identifier des mesures d'adaptation aux changements climatiques pour le Québec. Les objectifs de ce projet étaient d'accroître les connaissances sur les ennemis potentiels des grandes cultures au Québec, de réaliser des modèles prévisionnels pour ces ennemis et d'identifier plusieurs méthodes qui pourraient être mises en place dans des programmes de phytoprotection.

4. Méthodologie

OBJECTIF 1: - Identifier les principales espèces d'insectes et maladies des grandes cultures qui seront affectées par les changements climatiques parmi celles déjà présentes au Québec ou pouvant potentiellement s'y établir.

Réalisation de la base de données

Une base de données a été constituée et comprend les insectes ravageurs et les maladies (fongiques, bactériennes, virales, phytoplasmiqiques et liées aux nématodes) associés aux grandes cultures, à savoir le soya, le maïs, le blé, l'orge, l'avoine et le canola.

Cette base de données a été réalisée à partir de différents sites internet (Plantwise, CABI, EPPO), qui tiennent à jour des fiches techniques concernant plusieurs maladies et ravageurs représentant des risques dans différentes régions de la planète. Des ouvrages et guides de références (p. ex. Noms des maladies des plantes au Canada édité par la Société de Protection des Plantes du Québec en 2003, Guide d'identification des ravageurs des grandes cultures et cultures fourragères et de leurs ennemis naturels et mesures de lutte applicables à l'Ouest Canadien publié par Agriculture et Agroalimentaire Canada en 2015) ont aussi été utilisés pour bâtir ces deux bases de données. Des articles scientifiques sont venus compléter les informations quant à la biologie des espèces.

Cotation des espèces

Afin de sélectionner les espèces qui ont fait l'objet de la revue de littérature et incluant celles ayant fait l'objet d'une étude de cas dans le cadre de ce projet, les différentes espèces ont tout d'abord été catégorisées en fonction de leur aire de distribution. Les cinq catégories suivantes ont été définies :

Espèces présentes au Québec :

- les espèces déjà établies au Québec (**catégorie 1**);
- les espèces migratrices présentes durant la saison estivale, et qui pourraient migrer de plus en plus tôt au Québec grâce aux changements climatiques (**catégorie 2**);

Espèces exotiques envahissantes :

- celles dont l'aire de répartition s'accroît vers le nord en Amérique du Nord et qui sont déjà implantées dans des régions proches ou qui pourraient naturellement s'implanter au Québec en cas de réchauffement climatique (**catégorie 3**);
- les espèces présentes sous des climats similaires à ceux du Québec, mais qui ne pourraient s'implanter qu'en cas d'introductions accidentelles liées aux activités humaines (notamment lors d'échanges commerciaux) (**catégorie 4**);
- les espèces présentes uniquement sous des climats tropicaux et qui n'ont pas le potentiel de s'établir au Québec dans un avenir proche, mais qui pourraient potentiellement s'adapter au climat futur (**catégorie 5**).

Par la suite, une cotation a été réalisée pour chacune des espèces. Pour établir cette cotation, les critères suivants ont été pris en compte pour l'ensemble des espèces (présentes et exotiques).

Notez que le choix des critères de sélection concernant les EEE, est basé sur ceux définis par l'Agence Canadienne d'Inspection des Aliments (ACIA), et légèrement adaptés pour les CC. La cote A s'appliquait uniquement aux espèces exotiques envahissantes. Les autres côtes s'appliquaient autant aux espèces exotiques envahissantes qu'aux espèces déjà présentes au Québec.

Voici les critères de sélections utilisés pour la cotation :

- Potentiel d'introduction (Cote A). Ce critère était principalement basé sur la proximité géographique (présence en Ontario ou au Canada ou dans le nord des États-Unis vs présence dans le sud des États-Unis vs un autre continent) et les risques liés aux échanges commerciaux.
- Potentiel d'établissement (Cote B). Ce critère était basé sur la biologie des espèces et notamment leurs températures minimale/maximale/optimale de développement et la possibilité de survivre à l'hiver.
- Potentiel de dispersion (Cote C). Ce critère était essentiellement basé sur le nombre de générations, la fécondité des espèces et la mobilité de l'espèce (vol, dispersion par le vent, ...).
- Potentiel destructeur (Cote D). Ce critère était basé sur le nombre de grandes cultures possiblement touchées et les pertes de rendements potentielles.

Une cotation de 1 à 3 a été attribuée pour chacune des espèces et chacun des critères, 1 étant le moins probable et 3 le plus probable. En multipliant les cotes pour les quatre critères ci-dessus, nous avons obtenu une cote finale.

Réalisation de la revue de littérature

À partir des catégories et des cotes attribuées précédemment, nous avons procédé au choix d'une quarantaine d'espèces qui ont fait l'objet d'une revue de littérature :

Espèces présentes au Québec :

Pour les espèces déjà présentes au Québec (catégories 1 et 2), en plus de tenir compte de la cote obtenue pour chaque espèce, nous avons sélectionné soit des espèces récemment introduites et qui causent ou causeraient des dommages importants aux grandes cultures ou soit des espèces indigènes pour lesquelles les dommages sont présentement faibles, mais qui pourraient s'accroître avec les changements climatiques. Plusieurs espèces ont été écartées puisqu'elles ont déjà fait l'objet d'études de modélisation face aux CC dans deux autres projets de recherche (Gagnon et al. 2013, Mimee et al. 2013), notamment la pyrale du maïs, la fusariose du blé, le nématode à kyste du soya et le ver de l'épi.

Espèces exotiques envahissantes:

Pour établir la liste des EEE faisant l'objet d'une revue de littérature, en plus de tenir compte de la cote obtenue pour chaque espèce, nous n'avons gardé que les catégories 3, 4 et 5 et qui possèdent une cote D de 3 (potentiel destructeur le plus probable). Ces espèces d'insectes ou de maladies pourraient causer des pertes économiques notables comme observées ailleurs dans le monde. Parmi ces espèces, nous avons retenu un sous-ensemble d'espèces pour lesquelles la cote finale était la plus élevée. Chacune des listes (insectes ou maladies) a été traitée indépendamment pour le tri des espèces.

Sélection des espèces retenues pour l'étude de cas.

Suite à la réalisation de la revue de littérature, l'acquisition d'informations sur les différentes espèces et l'établissement d'une cotation pour chacune des espèces sélectionnées pour la revue de littérature, un comité d'experts s'est réuni pour identifier les cinq espèces devant faire l'objet d'une étude de cas.

Le choix s'est basé sur la revue de littérature, la cotation des espèces, mais aussi en prenant en considération d'autres critères tels que la disponibilité d'un modèle phénologique ou de données disponibles dans la littérature développer de tels modèles. Des études de cas ayant été réalisées auparavant sur les ravageurs du soya, il a été décidé de choisir des espèces pouvant s'attaquer à d'autres cultures dans le cadre de ce projet. Le tableau ci-dessous présente les cinq ennemis des cultures retenus pour une étude de cas. Le comité d'experts ayant émis des réserves sur la possibilité de réaliser des modèles bioclimatiques pour la rouille du soya. Il a donc été convenu qu'une mise à jour du modèle de la fusariose du blé serait effectuée si le modèle pour la rouille du soya ne pouvait être établi.

Tableau 1 : Indicateurs bioclimatiques pour les cinq espèces sélectionnées pour les études de cas et la recherche d'analogues spatiaux.

Ennemis	Cultures	Indicateurs bioclimatiques	Régions ciblées pour la recherche d'analogues spatiaux
Punaise marbrée	Maïs, soya	Durée de la saison de croissance Précipitations moyennes journalières durant la saison de croissance Cumul de degrés-jours (base 14.2)	Montréal
Punaise verte ponctuée	Soya, maïs, blé	Durée de la saison de croissance Précipitations moyennes journalières durant la saison de croissance Cumul de degrés-jours (base 15)	Montréal
Noctuelle de la tomate	Maïs, blé, canola	Durée de la saison de croissance Précipitations moyennes journalières durant la saison de croissance Cumul de degrés-jours (base 10)	Montréal
Méligèthe des crucifères	Canola	Durée de la saison de croissance Précipitations moyennes journalières durant la saison de croissance Cumul de degrés-jours (base 7)	Saguenay-Lac-St-Jean Abitibi-Témiscamingue
Rouille du soya	Soya	Durée de la saison de croissance Précipitations moyennes journalières durant la saison de croissance Cumul de degrés-jours (base 7)	Montréal

OBJECTIF 2: - Évaluer les impacts des changements climatiques sur l'aire de distribution, le développement phénologique ou la capacité d'établissement d'espèces ciblées ainsi que sur les dommages aux cultures.

Réalisation de scénarios pour le climat futur du Québec.

Une gamme de climats futurs plausibles couvrant le Québec agricole a été établie par l'équipe d'Ouranos, en considérant une sélection de 20 simulations climatiques issues de modèles globaux du climat (correspondant à la génération CMIP5) ainsi qu'un produit de référence (soit les données interpolées sur grille de Ressources Naturelles Canada – ci-après nommées « données NRCan » – qui présentent l'avantage de couvrir l'espace et le temps de manière régulière tout en demeurant relativement près des observations là où la densité des stations est élevée). Le produit de référence sert à effectuer le post-traitement statistique (combinant correction de biais et mise à l'échelle) des simulations climatiques, qui, quant à elles, fournissent principalement une tendance (changement) à long terme. Une simulation post-traitée constitue un *scénario climatique*, qu'il faut distinguer du *scénario d'émissions* considéré par un modèle pour générer une simulation. L'ensemble de simulations couvre différents scénarios d'émissions, certains subjectivement dits « changement inférieur » (p. ex. : RCP4.5) et d'autres « changement supérieur » (p. ex. : RCP8.5). Les données quotidiennes de température et de précipitation issues de ces scénarios ont la résolution spatiale du produit de référence (soit 10 km), et ce sont deux périodes de 30 ans, soit 1981-2010 (période de référence correspondant au passé récent) et 2041-2070 (climat futur), qui ont été utilisées pour la modélisation subséquente (phénologique).

Modélisation du développement phénologique des cultures et de la croissance des ennemis des cultures

La première étape a consisté à recueillir et compiler de l'information (données historiques sur la saison de croissance à partir de données météorologiques et de dates des semis) dans la littérature sur le développement phénologique de différentes cultures (maïs, soya, blé et canola) et des ennemis des cultures ciblées et déterminer s'il existait déjà des modèles.

Pour les phytoravageurs, des données ont été recueillies sur le nombre de degrés-jours nécessaires (à partir d'une température de base), pour qu'ils atteignent chaque stade de développement, par exemple les durées et vitesses de développement des ennemis des cultures en fonction des différentes données climatiques (températures minimale et maximale de développement, nombre de degrés-jours nécessaires pour passer d'un stade de croissance/développement à un autre, impact des précipitations, etc.)

L'équipe de recherche en bioclimatologie et modélisation de Gaétan Bourgeois (Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de Recherche et de Développement, Saint-Jean-sur-Richelieu) a ensuite utilisé le logiciel CIPRA (Centre informatique de prévision des ravageurs en agriculture) pour y intégrer ces données, qui ont par la suite servi pour réaliser des modèles visant à prédire le développement phénologique des cultures et des phytoravageurs (insectes et maladies), sous différents scénarios climatiques. À partir du nombre de degrés-jours nécessaires pour atteindre le début, le pic et la fin (5, 50 et 95%, respectivement) de chacun des stades de développement, il a été possible de déterminer à quelle date ce nombre de degrés-jours est atteint dans des conditions de climat actuel. En combinant les données issues de ces scénarios climatiques réalisés

par OURANOS et les modèles disponibles dans CIPRA, il a également été possible de réaliser des modèles pour les scénarios climatiques futurs.

Modélisation du développement phénologique des cultures et cartographie des dates de semis

Comme pour les ennemis des cultures, des modèles phénologiques ont été utilisés pour déterminer les stades de développement de chacune des cultures (maïs, soya, blé et canola) au cours de la saison de croissance à partir de données météorologiques et de dates estimées des semis en climat actuel et en climat futur. Les dates de semis des différentes cultures (maïs, soya, blé et canola) ont été déterminées en identifiant les dates des derniers gels printaniers survenues entre le 1er janvier et le 31 juillet. La même température seuil de 0°C a été utilisée pour toutes les cultures. Il s'agit plus d'un indice thermique qui est indépendant des cultures modélisées. Puis, pour chaque année, à partir de la médiane du dernier gel printanier, on cherche la température moyenne mobile sur 5 jours et le 5e jour serait la date du semis. Pour le maïs et le soya, la température seuil $\geq 12.8^{\circ}\text{C}$ a été utilisée alors que pour le blé et le canola la température seuil était $>5.5^{\circ}\text{C}$. L'approche utilisée est celle décrite dans le document « Formulation des indices agroclimatiques » disponible sur le site de l'Atlas agroclimatique du Québec (Section « Aide et documentation »).

Détermination des périodes de vulnérabilité en fonction de la phénologie des cultures

Parallèlement, en connaissant la phénologie des plantes et les stades de croissance auxquels les plantes sont attaquées par leurs ravageurs, il a été possible de déterminer quelles seront les périodes de vulnérabilité face à leurs ennemis. Des graphiques ont été réalisés pour superposer les stades de croissance des cultures avec les stades de développement des ennemis de ces cultures dans le but de déterminer s'il y aura un synchronisme entre l'ennemi et sa plante hôte et si une ou plusieurs générations de l'ennemi pourront engendrer plus de dommages dans le futur et à quel moment pendant la saison de croissance.

Réalisation de cartes de distribution liées au développement phénologique

Grâce à ces différents modèles, il a été possible de réaliser des modélisations spatio-temporelles et des cartes indiquant les dates d'apparition de chacun des stades phénologiques ou de développement en fonction des régions agricoles et de l'accumulation du nombre de degrés-jours.

Grâce aux modélisations spatio-temporelles effectuées, des cartes de distribution ont été produites à une résolution de 10 km (points de grille) pour chaque stade de développement des insectes, aussi bien pour le climat de référence (1981-2010) que pour le climat futur (2041-2070), selon une vingtaine de scénarios de changements climatiques. Pour chacun des indices sélectionnés pour la phénologie des différents ennemis des cultures et pour les cultures (maïs, soya, blé et canola), trois cartes ont été produites, la première illustrant la moyenne des valeurs obtenues pour le passé récent (1981-2010), la deuxième illustrant la moyenne pour le scénario de changement inférieur 2041-2070 (10e percentile des 20 scénarios du futur proche) et la troisième illustrant la moyenne pour le scénario de changement supérieur 2041-2070 (90e percentile des 20 scénarios du futur proche). Toutes les cartes ont été générées avec le logiciel ArcGIS par l'équipe de recherche en bioclimatologie et modélisation (AAC, CRD Saint-Jean-sur-Richelieu) avec la collaboration de la chargée de projet embauchée par le CÉROM. À l'occasion,

les stades de développement de certains insectes n'étaient pas atteints avant la fin de l'année pour certains ou plusieurs points de grille des régions agricoles du Québec et pour certaines années modélisées. Afin que les résultats de modélisation d'un point grille donnée soient illustrés sur les cartes de distribution, les règles suivantes ont été établies :

- En climat actuel (1981-2010) : Une valeur moyenne pour un point de grille donné pouvait être illustrée sur la carte si le stade modélisé avait été atteint pour au moins 24 sur 30 années (80%) pour ce point
- En climat futur (2041-2070) : Vu que chacun des 20 scénarios climatiques inclut aussi 30 années de données météo, la même règle qu'en climat actuel a été appliquée pour chacun des scénarios. Ensuite, à partir des résultats obtenus pour chaque scénario, une valeur moyenne pour un point de grille donné pouvait être illustrée sur la carte si le stade modélisé avait été atteint dans au moins 18 sur 20 scénarios (90%) pour ce point.

OBJECTIF 3: Identifier les mesures d'adaptation possibles pour les espèces ciblées, et plus globalement pour la protection des grandes cultures.

Identification des analogues spatiaux

En climatologie appliquée, un analogue spatial est une région ou un ensemble de régions dont certaines caractéristiques climatiques du passé récent présentent un bon niveau de similarité avec celles d'un horizon futur d'une région cible (Ramirez-Villegas, 2011; Grenier 2013).

Pour la punaise marbrée, la punaise verte et la noctuelle de la tomate, des indicateurs bioclimatiques ont été sélectionnés. Ces indicateurs sont : la longueur de la saison de croissance, le cumul des degrés-jours (la température de base dépend de l'organisme ciblé) et les précipitations moyennes journalières durant la saison de croissance (voir Tableau 1 ci-dessus). Grâce aux modélisations réalisées pour ces ennemis, il a été possible de déterminer les régions où ces espèces auraient le plus grand potentiel d'établissement à l'horizon 2041-2070 (objectif 2).

Les régions agricoles ont ensuite été délimitées, en réalisant des polygones représentant les contours des zones bioclimatiques de référence au Québec. Pour les régions agricoles visées, ces polygones ainsi que les indicateurs bioclimatiques ont permis à l'équipe d'OURANOS de rechercher des analogues spatiaux de ces zones bioclimatiques et de générer des cartes pour l'Amérique, l'Europe et l'Asie.

Pour le méligèthe des crucifères, comme nous ne disposons pas de modèle phénologique pour l'espèce, la délimitation des zones où l'insecte pourrait être présent en 2041-2070 a été basée sur les zones où le canola devrait être cultivé.

Dans un premier temps, une gamme de climats futurs plausibles au Québec a été construite, en considérant une sélection de 20 simulations climatiques issues de modèles globaux du climat ainsi qu'un produit fortement basé sur les observations (il s'agit de la réanalyse MERRA). Le produit d'observation sert à effectuer le post-traitement statistique (aussi parfois appelé correction de biais ou ajustement statistique) des simulations climatiques, qui, quant à elles, indiquent une tendance de changement à long terme. Une simulation post-traitée constitue un scénario climatique, qu'il faut distinguer du scénario d'émissions considéré dans la génération de chaque simulation. L'ensemble de simulations couvre différents scénarios d'émissions, certains souvent

dits inférieurs et d'autres supérieurs. Par la suite, des analogues spatiaux pour ces régions (dites « cibles »; voir tableau ci-dessous pour leur descriptif) ont été recherchés, à l'intérieur de la bande latitudinale 30 à 65°N (les tuiles de type océanique furent préalablement exclues).

Tableau 2 : Modèles et scénarios utilisés pour la recherche d'analogues spatiaux

Source: Patrick Grenier - OURANOS

Numéro utilisé dans le projet	Centre de modélisation	Modèle	RCP	Membre
1	BNU	BNU-ESM	8.5	r1i1p1
2	CCCMA	CanESM2	8.5	r2i1p1
3	CCCMA	CanESM2	2.6	r5i1p1
4	CSIRO-BOM	ACCESS1.0	4.5	r1i1p1
5	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0	4.5	r1i1p1
6	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0	8.5	r6i1p1
7	CSIRO-QCCCE	CSIRO-Mk3.6.0	8.5	r9i1p1
8	IPSL	IPSL-CM5A-LR	4.5	r1i1p1
9	IPSL	IPSL-CM5A-LR	4.5	r3i1p1
10	IPSL	IPSL-CM5A-MR	8.5	r1i1p1
11	MIROC	MIROC-ESM	4.5	r1i1p1
12	MIROC	MIROC-ESM-CHEM	2.6	r1i1p1
13	MIROC	MIROC-ESM-CHEM	8.5	r1i1p1
14	MIROC	MIROC5	6.0	r1i1p1
15	MIROC	MIROC5	8.5	r1i1p1
16	MPI-M	MPI-ESM-LR	4.5	r3i1p1
17	MRI	MRI-CGCM3	6.0	r1i1p1
18	NASA-GISS	GISS-E2-R	4.5	r6i1p1
19	NCAR	CCSM4	2.6	r1i1p1
20	NCAR	CCSM4	8.5	r1i1p1

La recherche des analogues se fait sur la base de certains indicateurs climatiques annuels jugés pertinents pour la problématique concernée. En résumé, la recherche des analogues implique de calculer les indicateurs annuels à partir des scénarios climatiques journaliers (autant pour le climat futur – 2041-2070 – des régions cibles que pour le climat du passé récent – 1981-2010 – des candidats analogues), et ensuite de comparer la distribution de valeurs de chaque région cible à celle de chacun des candidats analogues (une distribution correspond mathématiquement à 30 points dans un espace tridimensionnel, avec chaque année fournissant un point et chaque indicateur correspondant à une dimension). La comparaison se fait en utilisant une métrique de dissimilarité (ici la statistique de Zech-Aslan, voir Grenier et al. 2013), qui fournit un nombre correspondant au niveau de similarité. En utilisant ces nombres, les candidats sont ensuite mis en rang (du plus similaire au moins similaire), et les meilleurs candidats peuvent être adoptés comme les analogues de l'étude. Les cartes impliquent soit les meilleurs 1 % (c'est-à-dire 205 tuiles sur les 20514 du domaine de recherche), soit les meilleurs 5 % (1026 tuiles), soit les meilleurs 10 % (2051 tuiles), tel qu'indiqué sur chaque carte. Comme les 20 scénarios climatiques ont des climats futurs plausibles différents, les meilleurs 1 % (par exemple) sont bien sûr propres à chaque scénario. Ce que les cartes montrent, c'est, pour chaque tuile du produit d'observation MERRA, le nombre de scénarios qui ont cette tuile dans leur meilleur 1 % (par exemple) d'analogues spatiaux. Ce type de représentation graphique des analogues spatiaux a notamment été employé par Sanderson et al. (2016). Les cartes ont été séparées entre l'Amérique du Nord, l'Europe et l'Asie à des fins de meilleure appréciation visuelle (l'idée étant d'exclure les bandes méridionales

océaniques ou dépourvues d'analogues). Pour chaque carte, les régions les plus souvent identifiées comme analogues apparaissent en vert foncé et bleu. Il serait trop long d'expliquer tous les détails techniques impliqués dans la méthodologie de recherche des analogues, et nous référons pour cela à Grenier et al. (en préparation). Une différence avec les travaux présentés dans cet article est que le domaine de recherche des analogues était ici (dans ce rapport) plus vaste, s'étendant jusqu'en Asie. Une autre différence est qu'ici, les régions cibles ont été choisies pour être plus vastes qu'une tuile de la grille du produit d'observation MERRA, si bien que la similarité est établie entre des régions cibles et des candidats analogues (chaque tuile MERRA est un candidat) de superficies différentes.

Vérification de la présence des cultures et des ennemis dans les zones ayant été définies comme des analogues spatiaux.

Chaque carte établie par OURANOS présentait une l'échelle de couleurs, représentant le nombre de simulations climatiques (de 0 à 20) identifiant différentes régions comme analogues. Les régions sélectionnées étaient celles qui avaient le plus grand nombre de simulations convergentes (apparaissent en vert et bleu sur les cartes). De plus, pour chaque continent, nous avons sélectionné les cartes qui présentaient les meilleurs pourcentages. Ainsi, pour l'Amérique du Nord et l'Asie, nous avons sélectionné les meilleurs 1% et pour l'Europe, les meilleurs 5%, car il y avait très peu de régions analogues pour les meilleurs 1%. Les seuils choisis sont arbitraires, mais cette méthode permet d'identifier les meilleurs analogues parmi plusieurs analogues potentiels. L'étape suivante consistait à vérifier la présence des ravageurs dans les régions analogues ainsi que les superficies cultivées de chacune des cultures cibles (maïs, soya, blé et canola) pour pouvoir faire des comparaisons avec le Québec et déterminer l'importance du problème dans les régions analogues par rapport aux superficies québécoises. Pour déterminer les régions ou pays où sont présents les ennemis des cultures, nous nous sommes basés sur les données de distribution disponibles sur le site internet de CABI et sur celui de Discover Life.

Consultation d'experts locaux

Lorsque l'ennemi et la culture étaient présents dans les régions considérées comme des zones bioclimatiques analogues (régions qui présentaient le plus grand nombre de scénarios climatiques convergents), des experts ont été consultés par la réalisation d'un sondage contenant une dizaine de questions. Ces experts ont été sélectionnés en recueillant leurs coordonnées sur les sites de sociétés d'entomologie, d'universités (« extensions ») et de centres ou instituts de recherche. La recherche d'experts a également été effectuée à partir d'articles scientifiques publiés sur ces ennemis dans les régions concernées. Les sondages ont été réalisés en anglais (et aussi en français pour la noctuelle de la tomate), via la plateforme « SurveyMonkey ». Pour s'assurer de recevoir plusieurs réponses, l'invitation à participer au sondage a été envoyée par courriel à trois reprises pour chacune des espèces étudiées. Les experts étaient aussi invités à transférer le courriel à d'autres collègues.

L'objectif de cette consultation était de nous documenter sur la situation actuelle concernant l'ennemi dans les pays ou zones considérés. Parmi les questions posées aux experts, il y en avait sur la biologie de l'ennemi (prévalence, épidémiologie, expansion, nombre de générations), mais aussi sur les techniques de surveillance et détection, ainsi que les méthodes de lutte (biologique, mécanique et chimique) utilisées. Pour compléter les informations reçues lors des sondages, une recherche dans la littérature scientifique a été effectuée pour identifier d'autres techniques de lutte qui n'auraient pas été mentionnées par notre panel d'experts dans les régions analogues, afin de couvrir l'ensemble des techniques utilisées pour gérer ces ennemis, notamment dans des

zones récemment infestées par les ennemis des cultures considérés. Les données collectées lors des sondages ont permis d'identifier des mesures d'adaptation aux changements climatiques qui ont été compilées et ont fait l'objet d'une synthèse. Les informations recueillies ont également été incorporées à des fiches techniques sur les ennemis des cultures.

5. Résultats

OBJECTIF 1: Identifier les principales espèces d'insectes et maladies des grandes cultures qui seront affectées par les changements climatiques parmi celles déjà présentes au Québec ou pouvant potentiellement s'y établir.

Base de données des ennemis des cultures

La base de données contient les informations suivantes :

- Pour l'ensemble des espèces: nom commun, nom latin, classification, culture(s) affectée(s), hibernation ou non au Québec, stade d'hibernation et de diapause (pour les insectes), informations sur les données de températures de développement et croissance (minimum, optimum, maximum), le nombre de générations par année, les dommages causés, s'il y a un suivi par le Réseau d'Avertissements Phytosanitaires (RAP), aires d'origine et de distribution.
- Pour les maladies et pathogènes seulement, nous avons aussi ajouté les données sur l'humidité relative et les précipitations favorables à leur développement.

Cette base de données a permis de dresser un profil des insectes ravageurs et des maladies affectant les grandes cultures. Elle inclut 230 insectes ravageurs et 267 maladies dont 26 nématodes. Une copie du fichier Excel est disponible en adressant une demande à cerom@cerom.qc.ca.

Cotation et sélection des espèces pour la revue de littérature et choix des cinq espèces pour les études de cas.

La revue de littérature a été réalisée pour 38 espèces réparties comme suit : sept espèces d'insectes ravageurs présents au Québec, dix-sept espèces considérées comme des espèces exotiques envahissantes d'insectes ravageurs, sept espèces de maladies présentes au Québec et sept espèces de maladies potentiellement envahissantes au Québec (**Annexe 1**). Cette revue de littérature est disponible en libre accès sur le site Agri-Réseau (voir le [document](#)).

Suite à la réalisation de cette base de données, une consultation impliquant divers intervenants en phytoprotection a été organisée afin de sélectionner cinq espèces parmi les espèces ayant le potentiel de causer des dommages aux grandes cultures en lien avec les changements climatiques dans un futur proche. Il fallait que ces ennemis touchent des cultures différentes. La sélection incluait trois insectes classés parmi les EEE (la punaise marbrée *Halyomorpha halys*, la noctuelle de la tomate *Helicoverpa armigera* et la punaise verte ponctuée *Nezara viridula*), un insecte déjà présent au Québec (le méligèthe des crucifères *Meligethes viridescens*) et une maladie classée parmi les EEE (la rouille asiatique du soya *Phakopsora pachyrhizi*). Une étude de cas a été réalisée pour chacune de ces espèces.

OBJECTIF 2 : Évaluer les impacts des changements climatiques sur l'aire de distribution, le développement phénologique ou la capacité d'établissement d'espèces ciblées ainsi que sur les dommages aux cultures.

Modélisation

Parmi les cinq espèces sélectionnées, seuls trois insectes (Punaise marbrée, Noctuelle de la tomate et Punaise verte ponctuée) ont pu faire l'objet d'une modélisation bioclimatique pour des raisons évoquées ci-dessous. Ces modèles ont été implantés dans le logiciel CIPRA et ont été utilisés pour effectuer des simulations spatio-temporelles à l'aide des différents scénarios climatiques (actuels et futurs). En raison des hausses de températures, on constate que ces insectes pourraient compléter au moins un cycle de développement au Québec dans le futur, puisque la durée de chaque stade de développement serait raccourcie. Il pourrait aussi y avoir jusqu'à trois générations pour la noctuelle de la tomate.

a) Modèle bioclimatique pour la punaise marbrée :

La punaise marbrée passe l'hiver au stade adulte (Lee *et al.*, 2013; Haye *et al.*, 2014; Rice *et al.*, 2014; Nielsen *et al.*, 2016). Les adultes émergent au printemps avec un intervalle de 150 DJ (Nielsen & Hamilton, 2009a). Ces adultes immatures ont besoin de 147 DJ base 14.2 pour pouvoir débiter la ponte (période de pré-oviposition) (Nielsen *et al.*, 2008). Une fois les œufs éclos, la punaise marbrée se développe en 5 stades nymphaux. Les nymphes du stade 4 et 5 ainsi que les adultes sont sensibles à la photopériode (13.5h) à l'automne (Nielsen & Hamilton, 2009a; Nielsen *et al.*, 2016). Ce signal permet à la punaise marbrée de se trouver un abri et entrer en diapause hivernale. Au moment où la photopériode a atteint ce seuil critique, il y a seulement les punaises au stade adulte qui passent l'hiver. La punaise marbrée est capable de faire entre 1-2 à 5-6 générations par année dépendamment des régions (Nielsen & Hamilton, 2009a; Leskey *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2013; Haye *et al.*, 2014).

Les calculs des différents stades de la punaise marbrée se sont basés sur les articles de Nielsen *et al.* (2008) et Nielsen *et al.* (2016).

Le tableau suivant présente la moyenne des degrés-jours obtenue pour une température de base de 14°C, basée sur les données de jours de développement selon différentes températures de laboratoire (Nielsen *et al.*, 2008).

Tableau 3 : Moyennes des degrés-jours selon la température de base sélectionnée (page 20 à 30°C: survie optimale)

Pré-ovi.	Œuf	1 ^{re} nymphe	2 ^e nymphe	3 ^e nymphe	4 ^e nymphe	5 ^e nymphe	Total
147	61,3	55,9	105,5	81,3	85,0	119,1	498,5

Le tableau ci-après représente les détails de calculs pour le cumul de degrés-jours (en base 14°C) nécessaire pour compléter les stades (1-50-99 %) de développement de la punaise marbrée.

Tableau 4 : Seuils DJ pour le modèle de la punaise marbrée

Démarrage	01-mars	Notes : photopériode = 13.5h, date dernier gel printanier
G1 Début ponte	147	Durée oviposition
G1 Pic ponte	222	
G1 Fin ponte	297	Intervalle de 150 DJ selon figure 1 de Nielsen (2009)
G1 Début Nymphes (1-3)	208	Début ponte + 61 DJ
G1 Pic Nymphes (1-3)	374	À mi-chemin entre début et fin
G1 Fin Nymphes (1-3)	540	Fin ponte + 243 DJ (55.9+105.5+81.3)
G1 Début Nymphes (4-5)	451	Début nymphes 1-3 + 243 DJ (55.9+105.5+81.3)
G1 Pic Nymphes (4-5)	598	À mi-chemin entre début et fin
G1 Fin Nymphes (4-5)	744	Fin nymphes 1-3 + 204 DJ (85.0+119.1)
G1 Début Adultes	655	Début nymphes 4-5 + 204 DJ (85.0+119.1)
G1 Pic Adultes	773	À mi-chemin entre début et fin
G1 Fin Adultes	891	Fin nymphes 4-5 + 147 DJ (Ovip.)
G2 Début ponte	802	Début adultes + 147 DJ (Ovip.)
G2 Pic ponte	877	À mi-chemin entre début et fin
G2 Fin ponte	952	Fin adultes + 61 DJ
G2 Début Nymphes (1-3)	864	Début ponte + 61 DJ
G2 Pic Nymphes (1-3)	1029	À mi-chemin entre début et fin
G2 Fin Nymphes (1-3)	1195	Fin ponte + 243 DJ (55.9+105.5+81.3)
G2 Début Nymphes (4-5)	1107	Début nymphes 1-3 + 243 DJ (55.9+105.5+81.3)
G2 Pic Nymphes (4-5)	1253	À mi-chemin entre début et fin
G2 Fin Nymphes (4-5)	1399	Fin nymphes 1-3 + 204 DJ (85.0+119.1)
G2 Début Adultes	1311	Début nymphes 4-5 + 204 DJ (85.0+119.1)
G2 Pic Adultes	1428	À mi-chemin entre début et fin
G2 Fin Adultes	1546	Fin nymphes 4-5 + 147 DJ (Ovip.)

Une fois toutes ces données obtenues, le modèle a été généré dans CIPRA sous la méthode de calcul de sinus simple avec la température de base de 14°C et la température optimale de 30°C.

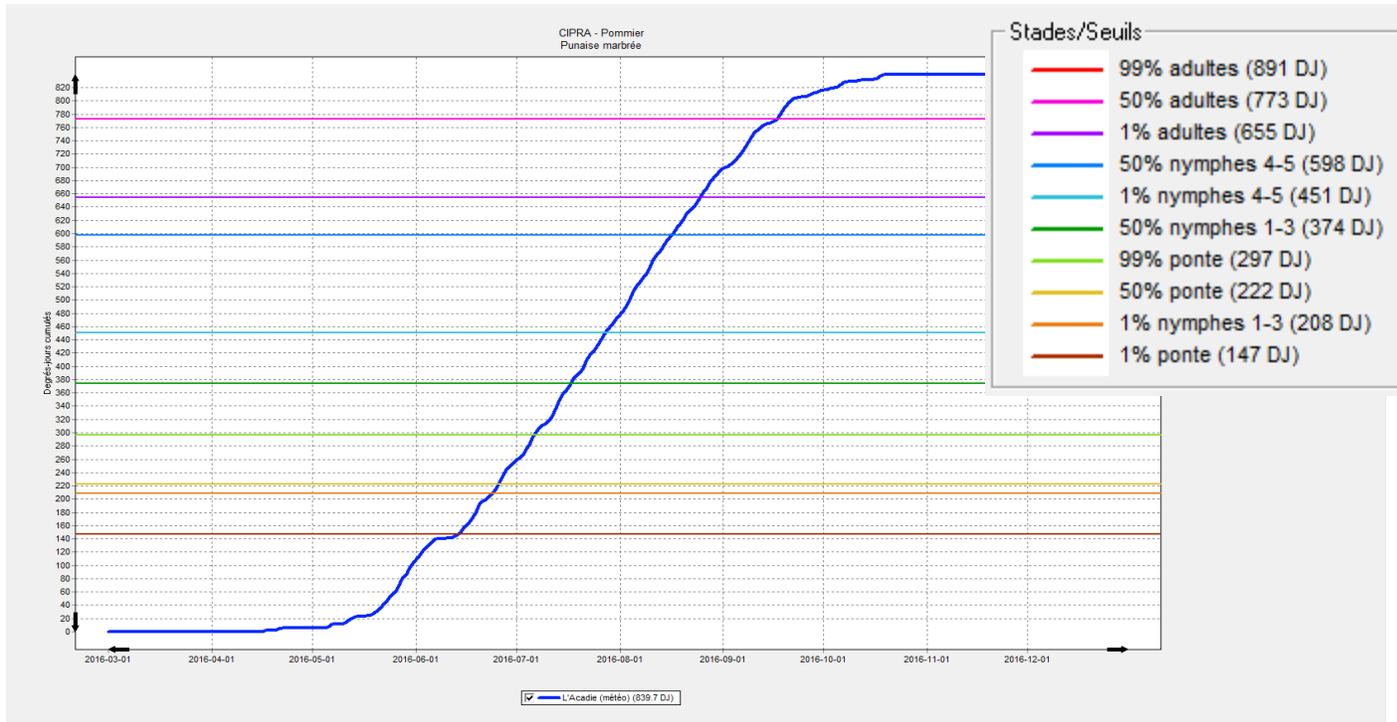
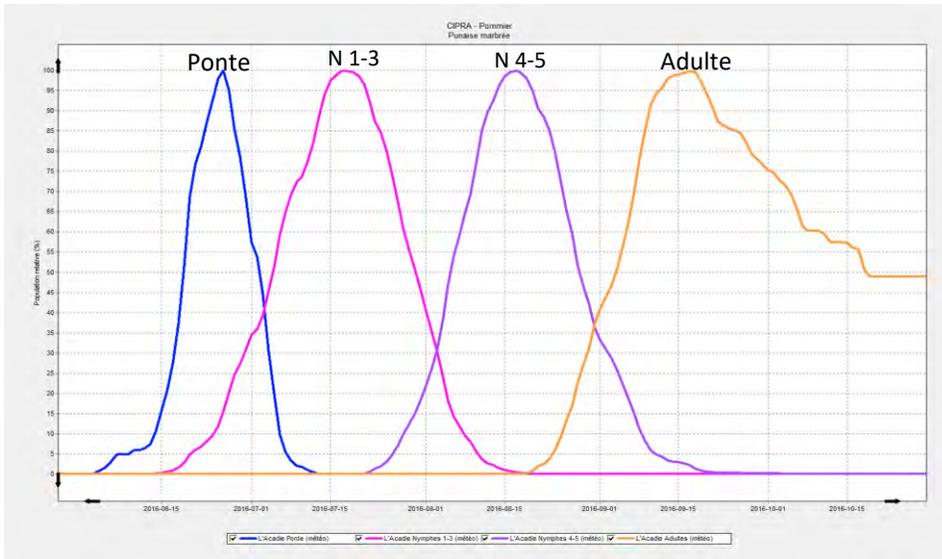


Figure 1 : Exemples de sortie des modèles de la punaise marbrée dans CIPRA. En haut, pics d'apparition des différents stades. En bas, pourcentage d'atteinte des différents stades.

b) Modèle bioclimatique pour la punaise verte ponctuée :

La punaise verte passe l'hiver au stade adulte. Dans les régions où l'adulte ne survit pas à l'hiver, Musolin and Numata (2003b) supposent que l'insecte pourrait migrer annuellement à partir des régions situées plus au sud. Les adultes émergent au printemps. Étant donné que le comportement de la punaise verte ressemble à celui de la punaise marbrée, nous nous sommes basés sur le modèle établi pour la punaise marbrée (Nielsen & Hamilton, 2009a). Les adultes immatures ont besoin de 192 DJ (base 15) pour pouvoir débiter la ponte (période de pré-oviposition) (Cividanes & Parra, 1994). Une fois les œufs éclos, la punaise verte se développe en 5 stades nymphaux puis en adulte.

L'induction de la diapause dans les populations tempérées est contrôlée par la photopériode (Musolin & Numata, 2003a), un arrêt de nutrition et d'accouplement (Todd, 1989) et est associé à un polymorphisme saisonnier lié à la couleur (Musolin & Numata, 2003b). La terminaison de la diapause, quant à elle, se fait lorsque les conditions environnementales sont favorables (Reay-Jones, 2010).

La punaise verte est capable de faire entre 3 à 6 générations par année (Musolin & Numata, 2003a; Musolin & Numata, 2003b; Herbert & Toews, 2012).

Les calculs des différents stades de la punaise verte ce sont basés sur les articles de (Harris & Todd, 1980; Cividanes & Parra, 1994).

Le tableau suivant présente la moyenne des degrés-jours obtenue pour une température de base de 15°C. Les données de la période de pré-oviposition ont été prises dans l'article de (Cividanes & Parra, 1994). Pour les autres stades de développement, les données ont été prises dans l'article de (Harris & Todd, 1980).

Tableau 5 : Moyennes des degrés-jours selon la température de base sélectionnée (température moyenne 26.5°C)

Pré-ovi.	Œuf	1 ^{er} nymphe	2 ^e nymphe	3 ^e nymphe	4 ^e nymphe	5 ^e nymphe	Total
192	55.2	43.7	59.8	51.8	73.6	136.9	422.1

Le tableau ci-après représente les détails de calculs pour le cumul de degrés-jours (en base 15°C) nécessaire pour compléter les stades (1-50-99 %) de développement de la punaise verte ponctuée.

Tableau 6 : Seuils DJ pour le modèle de la punaise verte ponctuée

Démarrage	01-mars	Notes
		ou: photopériode = 13.5h, date dernier gel printanier
G1 Début ponte	192	Durée pré-oviposition
G1 Pic ponte	267	Moyenne entre le début de ponte et la fin de ponte
G1 Fin ponte	342	Intervalle de 150 DJ en comparaison avec la punaise marbrée (selon la figure 1 de Nielsen (2009))
G1 Début Nymphes (1-3)	247	Début de ponte + Stade œuf (55.2 DJ)
G1 Pic Nymphes (1-3)	372	Moyenne entre le début de nymphes 1-3 et la fin de nymphes 1-3
G1 Fin Nymphes (1-3)	497	Fin de ponte + Stade nymphes 1-2-3 (43.7+59.8+51.8 = 155.3 DJ)
G1 Début Nymphes (4-5)	402	Début de nymphes 1-3 + Stade nymphes 1-2-3 (43.7+59.8+51.8 = 155.3 DJ)
G1 Pic Nymphes (4-5)	555	Moyenne entre le début de nymphes 4-5 et la fin de nymphes 4-5
G1 Fin Nymphes (4-5)	708	Fin nymphes 1-3 + stade nymphes 4-5 (73.6+136.9 = 210.5 DJ)
G1 Début Adultes	613	Début nymphes 4-5 + stade nymphes 4-5 (73.6+136.9 = 210.5 DJ)
G1 Pic Adultes	756	Moyenne entre le début d'adultes et la fin d'adultes
G1 Fin Adultes	899	Fin nymphes 4-5 + pré-oviposition (191.9DJ)
G2 Début ponte	805	Début adultes + pré-oviposition (191.9DJ)
G2 Pic ponte	880	Moyenne entre le début de ponte et la fin de ponte
G2 Fin ponte	955	Fin adultes + Stade œuf (55.2 DJ)
G2 Début Nymphes (1-3)	860	Début de ponte + Stade œuf (55.2 DJ)
G2 Pic Nymphes (1-3)	985	Moyenne entre le début de nymphes 1-3 et la fin de nymphes 1-3
G2 Fin Nymphes (1-3)	1110	Fin de ponte + Stade nymphes 1-2-3 (43.7+59.8+51.8 = 155.3 DJ)
G2 Début Nymphes (4-5)	1015	Début de nymphes 1-3 + Stade nymphes 1-2-3 (43.7+59.8+51.8 = 155.3 DJ)
G2 Pic Nymphes (4-5)	1168	Moyenne entre le début de nymphes 4-5 et la fin de nymphes 4-5
G2 Fin Nymphes (4-5)	1320	Fin nymphes 1-3 + stade nymphes 4-5 (73.6+136.9 = 210.5 DJ)
G2 Début Adultes	1226	Début nymphes 4-5 + stade nymphes 4-5 (73.6+136.9 = 210.5 DJ)
G2 Pic Adultes	1369	Moyenne entre le début d'adultes et la fin d'adultes
G2 Fin Adultes	1512	Fin nymphes 4-5 + pré-oviposition (191.9DJ)

Une fois toutes ces données obtenues, le modèle a été généré dans CIPRA sous la méthode de calcul de sinus simple, avec la température de base de 15°C et la température optimale de 25°C.

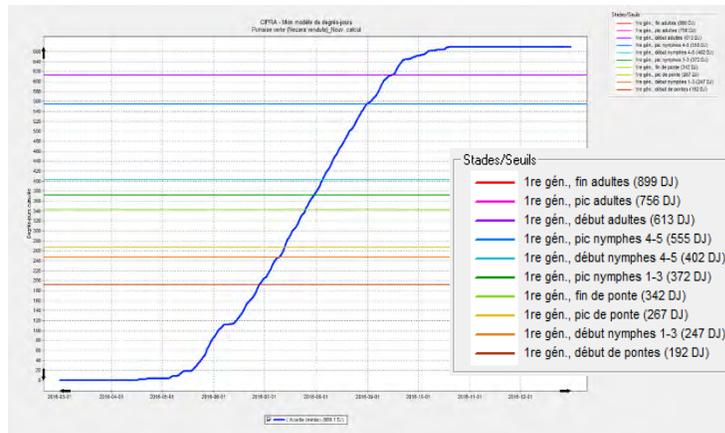


Figure 2 : Exemple de sortie du modèle de la punaise verte dans CIPRA

c) *Modèle bioclimatique pour la noctuelle de la tomate :*

La noctuelle de la tomate est un papillon migrateur (Bartekova *et al.*, 2006). Cet insecte peut parcourir plusieurs centaines de kilomètres (Zalucki & Furlong, 2005).

La noctuelle de la tomate passe l'hiver au stade de chrysalide (Mironidis & Savopoulou-Soultani, 2012b; Chen *et al.*, 2014b) et lorsque les conditions sont favorables, l'adulte émerge au printemps avec un intervalle de 82 DJ base 10 (1%) (Mironidis *et al.*, 2010). Ces adultes immatures ont besoin de 118 (82+35.5) DJ base 10 pour pouvoir débiter la ponte. Une fois les œufs éclos, la noctuelle se développe en 5 stades larvaires. Lors du dernier stade larvaire, la noctuelle forme une chrysalide et puis l'adulte en émerge.

L'induction de la diapause hivernale est contrôlée par une courte photopériode (11.5 - 12.5h) et une faible température ou une baisse de température (Mironidis & Savopoulou-Soultani, 2012a; Chen *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2014a; Huang, 2015). La terminaison de la diapause, quant à elle, se fait lorsque la température atteint 16°C ou plus (Mironidis *et al.*, 2010).

La noctuelle de la tomate est une espèce multivoltine et capable de faire entre 3 à 6 générations par année (Fitt *et al.*, 1995; Ge *et al.*, 2005; Feng *et al.*, 2010; Chen *et al.*, 2013).

Les calculs des différents stades de la noctuelle de la tomate se sont basés sur les articles de Mironidis and Savopoulou-Soultani (2008) et de Mironidis *et al.* (2010).

Le tableau suivant présente la moyenne des degrés-jours obtenue pour une température de base de 10°C. Pour les différents stades de développement, les données ont été calculées à partir des tableaux 2 et 5 de l'article de Mironidis and Savopoulou-Soultani (2008).

Tableau 7 : Moyennes des degrés-jours selon la température de base sélectionnée (plage 15 à 35°C: survie optimale) pour la noctuelle de la tomate

Pré-ovi.	Œuf	1 ^{er} larve	2 ^e larve	3 ^e larve	4 ^e larve	5 ^e larve	Pupe	Total
35.5	49.8	44.3	30.0	32.9	51.0	87.6	249.8	194.1

Le calcul de degrés-jours du début, pic et fin (1, 50, 99%) de chaque stade a été fait à partir de l'article de Mironidis *et al.* (2010). Les paramètres ont été utilisés dans le modèle de calculs Weibull pour obtenir des données de degrés-jours pour le stade adulte.

Tableau 8 : Calcul de degrés-jours du début, pic et fin (1, 50, 99%) du stade de ponte pour la noctuelle de la tomate

Stades	1%	50%	99%	Informations
Adulte immature	82	252	417	Données prises à partir des calculs du modèle Weibull
Adulte ponte	118	288	453	Données d'adulte immature + période d'oviposition

Le tableau ci-après représente les détails de calculs pour le cumul de degrés-jours (en base 10°C) nécessaire pour compléter les stades (1-50-99 %) de développement de la noctuelle de la tomate.

Tableau 9 : Seuils DJ pour le modèle de la noctuelle de la tomate

Démarrage	Lorsque la température $\geq 16^{\circ}\text{C}$	
G1 Début ponte	118	Début d'émergence des adultes + période de préoviposition
G1 Pic ponte	288	Pic d'émergence des adultes + période de préoviposition
G1 Fin ponte	453	Fin d'émergence des adultes + période de préoviposition
G1 Début Larves (1-3)	167	Début de ponte + Stade œuf (49.8 DJ)
G1 Pic Larves (1-3)	364	Moyenne entre le début de larve 1-3 et la fin de larve 1-3
G1 Fin Larves (1-3)	560	Fin de ponte + Stade larvaire 1-2-3 (44.3+30.0+32.9 = 107.2 DJ)
G1 Début Larves (4-5)	275	Début de larve 1-3 + Stade larvaire 1-2-3 (44.3+30.0+32.9 = 107.2 DJ)
G1 Pic Larves (4-5)	486	Moyenne entre le début de larve 4-5 et la fin de larve 4-5
G1 Fin Larves (4-5)	698	Fin de larve 1-3 + Stade larvaire 4-5 (51.0+87.6 = 138.5 DJ)
G1 Début Pupes	413	Début de larve 4-5 + Stade larvaire 4-5 (51.0+87.6 = 138.5 DJ)
G1 Pic Pupes	653	Moyenne entre le début de pupes et la fin de pupes
G1 Fin Pupes	892	Fin larve 4-5 + stade pupes (194.1 DJ)
G1 Début Adultes	607	Début pupes + stade pupes (194.1 DJ)
G1 Pic Adultes	768	Moyenne entre le début d'adultes et la fin d'adultes
G1 Fin Adultes	928	Fin pupes + pré-oviposition (35.5 DJ)
G2 Début ponte	643	Début adultes + pré-oviposition (35.5 DJ)
G2 Pic ponte	810	Moyenne entre le début de ponte et la fin de ponte
G2 Fin ponte	978	Fin adultes + Stade œuf (49.8 DJ)
G2 Début Larves (1-3)	693	Début de ponte + Stade œuf (49.8 DJ)
G2 Pic Larves (1-3)	889	Moyenne entre le début de larve 1-3 et la fin de larve 1-3
G2 Fin Larves (1-3)	1085	Fin de ponte + Stade larvaire 1-2-3 (44.3+30.0+32.9 = 107.2 DJ)
G2 Début Larves (4-5)	800	Début de larve 1-3 + Stade larvaire 1-2-3 (44.3+30.0+32.9 = 107.2 DJ)
G2 Pic Larves (4-5)	1012	Moyenne entre le début de larve 4-5 et la fin de larve 4-5
G2 Fin Larves (4-5)	1223	Fin de larve 1-3 + Stade larvaire 4-5 (51.0+87.6 = 138.5 DJ)
G2 Début Pupes	938	Début de larves 4-5 G2 + Stade larvaire 4-5 (51.0+87.6 = 138.5 DJ)
G2 Pic Pupes	1178	Moyenne entre le début de pupes et la fin de pupes G2
G2 Fin Pupes	1418	Fin larves 4-5 G2 + stade pupes G2 (194.1 DJ)
G2 Début Adultes	1132	Début pupes G2 + stade pupes GD (194.1 DJ)
G2 Pic Adultes	1293	Moyenne entre le début d'adultes et la fin d'adultes G2
G2 Fin Adultes	1453	Fin pupes G2+ pré-oviposition (35.5 DJ)
G3 Début ponte	1169	Début adultes G2 + pré-oviposition (35.5 DJ)
G3 Pic ponte	1336	Moyenne entre le début de ponte et la fin de ponte G3
G3 Fin ponte	1503	Fin adultes + Stade œuf G3 (49.8 DJ)
G3 Début Larves (1-3)	1219	Début de ponte + Stade œuf G3 (49.8 DJ)
G3 Pic Larves (1-3)	1415	Moyenne entre le début de larve 1-3 G3 et la fin de larve 1-3 (G3)
G3 Fin Larves (1-3)	1611	Fin de ponte G3 + Stades larvaires 1-2-3 G3 (44.3+30.0+32.9 = 107.2 DJ)
G3 Début Larves (4-5)	1326	Début de larve 1-3 G3 + Stades larvaires 1-2-3 G3 (44.3+30.0+32.9 = 107.2 DJ)
G3 Pic Larves (4-5)	1538	Moyenne entre le début de larves 4-5 G3 et la fin de larves 4-5 G3
G3 Fin Larves (4-5)	1750	Fin de larve 1-3 G3 + Stades larvaires 4-5 G3 (51.0+87.6 = 138.5 DJ)
G3 Début Pupes	1465	Début de larve 4-5 G3 + Stades larvaires 4-5 G3 (51.0+87.6 = 138.5 DJ)
G3 Pic Pupes	1705	Moyenne entre le début de pupes et la fin de pupes G3
G3 Fin Pupes	1944	Fin larve 4-5 G3 + stade pupes G3 (194.1 DJ)
G3 Début Adultes	1659	Début pupes G3 + stade pupes G3 (194.1 DJ)
G3 Pic Adultes	1820	Moyenne entre le début d'adultes et la fin d'adultes G3
G3 Fin Adultes	1980	Fin pupes G3 + pré-oviposition (35.5 DJ)

Après avoir obtenu toutes ces données, le modèle a été généré dans CIPRA sous la méthode de calcul de sinus simple avec la température de base de 10°C et la température optimale de 34.6°C pour la 1re et la 2e génération.

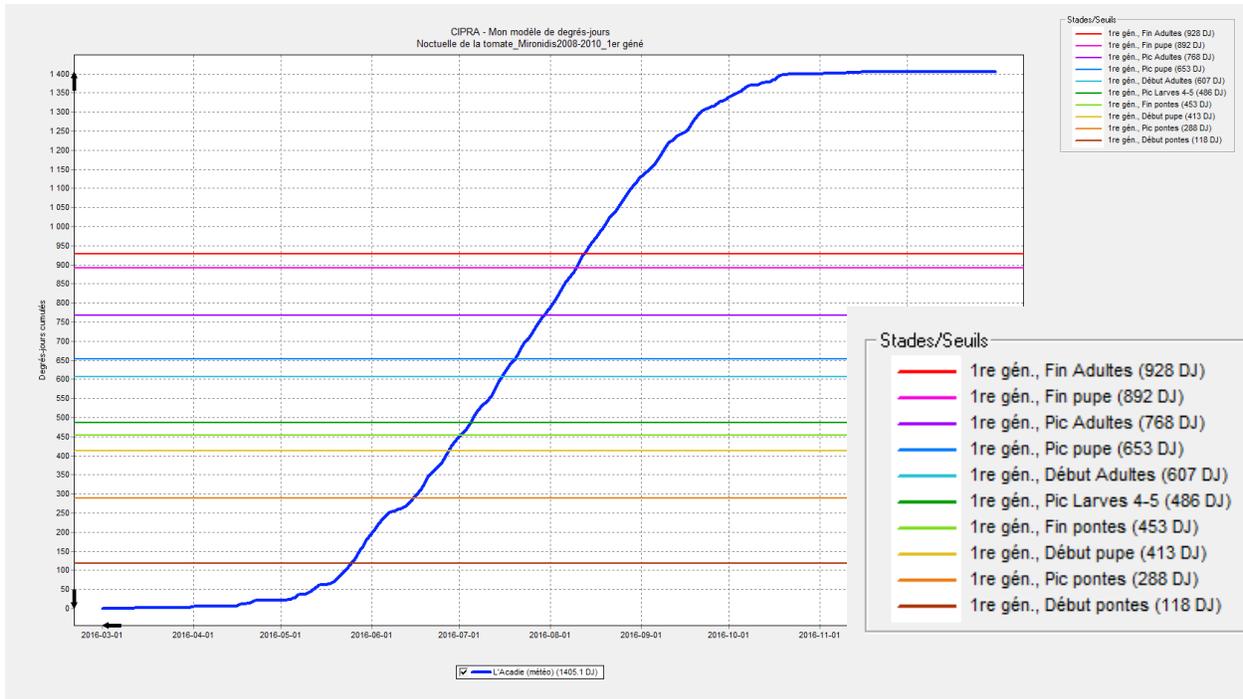


Figure 3 : Exemple de sortie du modèle de la première génération de la noctuelle de la tomate dans CIPRA

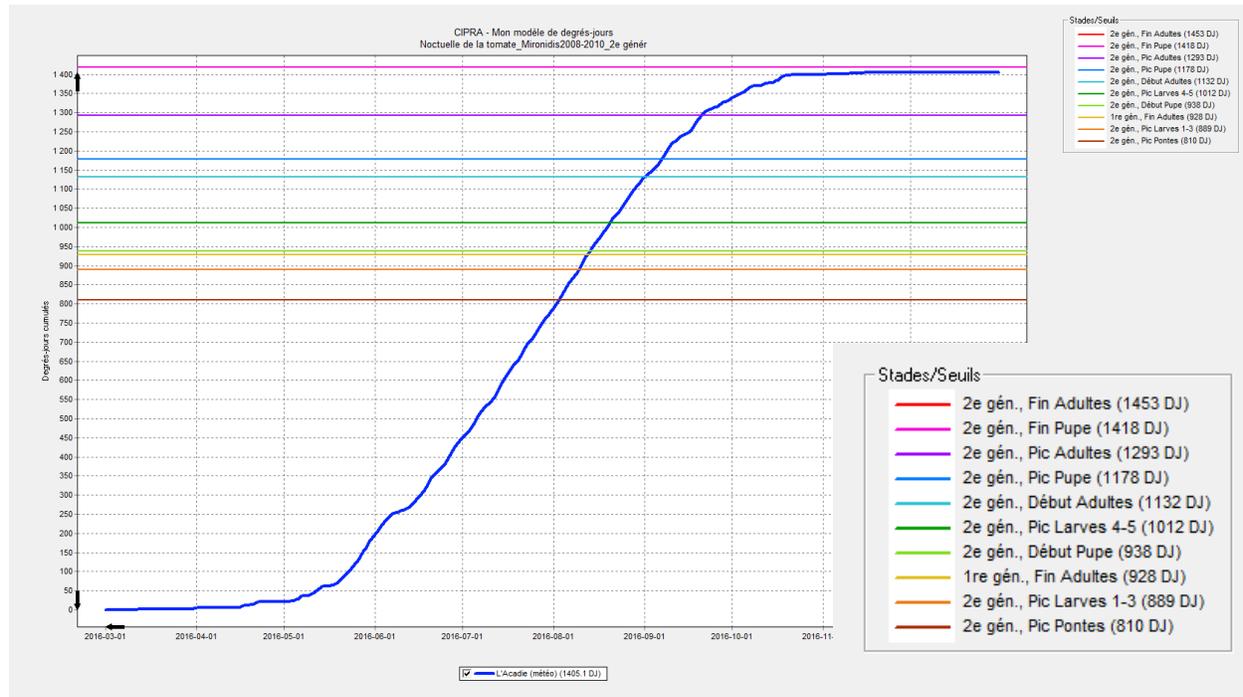


Figure 4 : Exemple de sortie du modèle de la deuxième génération de la noctuelle de la tomate dans CIPRA

d) Modèle bioclimatique pour le méligèthe des crucifères :

En ce qui concerne le méligèthe des crucifères, au moment où l'étude a été réalisée, il y avait trop peu d'informations disponibles sur la biologie de cet insecte au Québec et dans la littérature. Parmi les informations manquantes, il y a le nombre de degrés-jours pour atteindre les différents stades et les dates d'émergence et de premières captures au Québec. Ce manque de données est notamment dû au fait qu'au Québec, on ne dépiste cet insecte que pendant la période où la plante hôte est vulnérable. Par conséquent, les données existantes sont issues des dépistages effectués entre le stade élongation et le stade 30% de floraison du canola. Nous ne disposons pas des dates d'émergence ni de la durée des stades de développement. De plus, il existe très peu de données sur la biologie et le développement de cet insecte ailleurs dans le monde. Toutefois, des cartes indiquant le nombre de jours où la température minimale atteint 7°C et moins et le nombre de jours où la température maximale atteint 33°C et plus ont été réalisées. Ces températures correspondent aux températures minimales et maximales entre lesquelles le méligèthe peut se développer. Cela a permis de définir des zones où le canola peut pousser et le méligèthe pourrait s'établir dans le futur (voir Annexe 2).

e) Modèle bioclimatique pour la rouille asiatique du soya :

Concernant la rouille du soya, des informations pertinentes ont été retrouvées pour créer une ébauche de modèle permettant de prédire les risques d'infections par cette maladie en fonction de la température de l'air et de la mouillure du feuillage. Toutefois, aucun modèle bioclimatique n'a pu nous être fourni pour cette culture, car il serait nécessaire de tenir compte de plusieurs autres facteurs tels que le comportement sur les cultures hôtes primaires, secondaires et/ou accessoires, les moyens de propagation et d'infection, les formes d'hivernation, le cycle de vie des champignons pathogènes, la durée des différentes phases de développement des champignons pathogènes (germination, infection, latence) et le synchronisme avec la culture.

a) Modèle bioclimatique pour la fusariose du blé :

En 2016, lors de la première réunion du comité de suivi au cours de laquelle a été fait le choix des espèces pour l'étude de cas, il avait été convenu que s'il n'était pas possible de réaliser des modèles pour la rouille du soya, il conviendrait alors de réévaluer les modèles déjà existants pour la fusariose du blé. Ce qui a finalement été réalisé dans le cadre d'un projet Prime-Vert (CERO-1-16-1761) réalisé en 2018, par Yves Dion (CÉROM), Gaétan Bourgeois (AAC) et Sylvie Rioux (CÉROM). Dans ce projet, les auteurs ont mis à l'essai treize modèles prévisionnels différents et en intégrant les variables de températures minimales, maximales ou des intervalles sur un certain nombre d'heures, les données de précipitations (seuils, cumuls) ainsi que l'humidité relative (seuil et périodes). Les auteurs ont également introduit une nouvelle approche pour optimiser l'estimation du risque, en s'appuyant sur le concept que l'ensemble de la période de sensibilité, c'est-à-dire la floraison, permettant une meilleure estimation du risque plutôt que le calcul ponctuel d'un risque à un stade phénologique précis. Suite aux différentes analyses, le modèle CAM 2018 a été sélectionné pour être implanté dans CIPRA et Agrométéo Québec. L'ensemble des résultats est présenté dans un [rapport détaillé](#) et une [fiche de synthèse](#).

Par conséquent, dans le cadre de notre projet, nous n'avons donc pas effectué de nouvelles modélisations pour cette maladie. De plus, une étude sur les analogues spatiaux pour la fusariose du blé avait déjà été réalisée (Gagnon et al. 2013) et n'a donc pas été effectuée de nouveau dans le cadre du présent projet.

Cartes des dates des semis pour les différentes cultures

Les calculs de dates de semis sont les mêmes pour chaque groupe de cultures : cultures froides (blé et canola) et cultures chaudes (maïs et soya). Ces cartes sont réalisées à partir de l'estimation des dernières dates de gel. Globalement, dans le cadre d'un scénario de réchauffement inférieur, les semis seraient devancés d'en moyenne 10 jours alors que dans le cadre d'un scénario de réchauffement supérieur, les semis pourraient être devancés d'environ un mois.

a) Dates de semis du blé de printemps et du canola

Concernant le blé de printemps et le canola, on constate, les dates des semis s'étalent du 11 mai au 23 juin selon les régions, basées sur les conditions de référence (1981-2010).

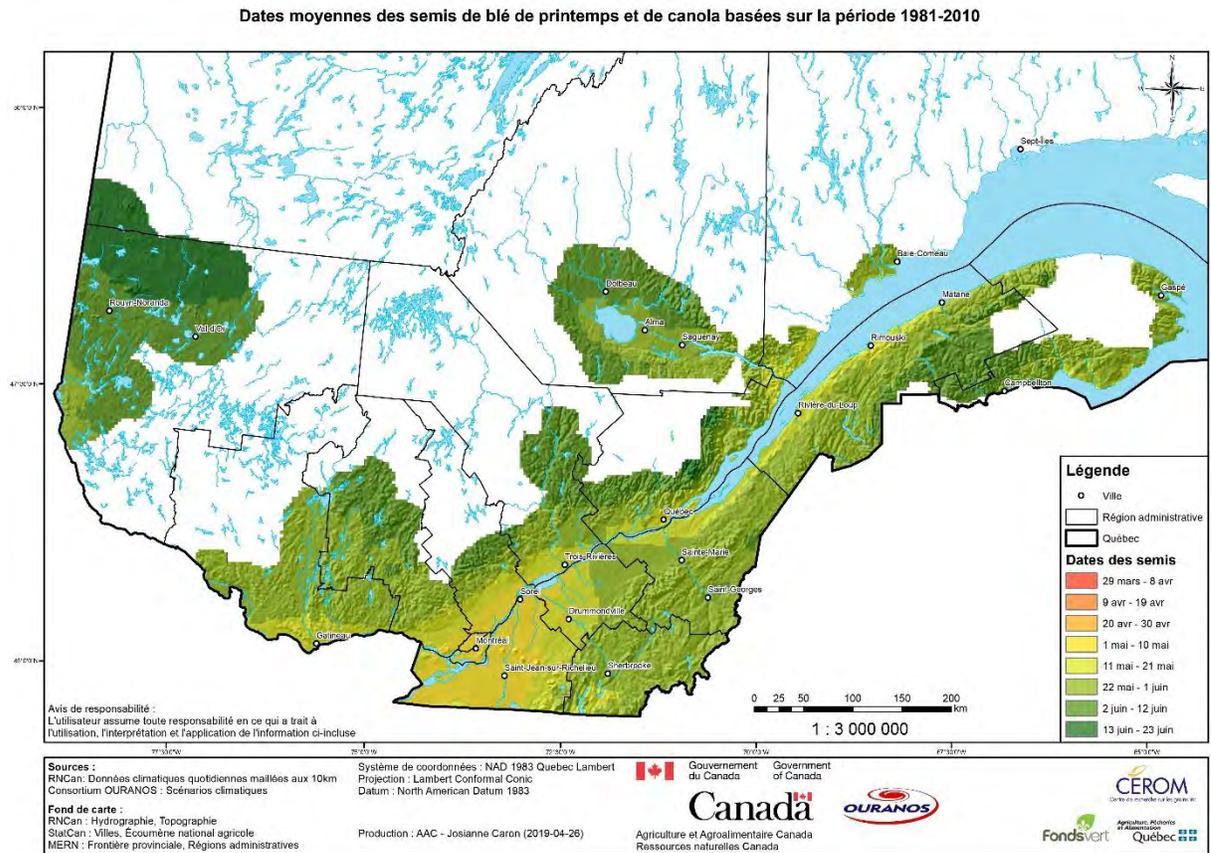


Figure 5 : Dates moyennes des semis de blé de printemps et de canola basées sur la période 1981-2010.

À l'horizon 2041-2070, les dates de semis du blé et du canola s'étaleront du 20 Avril au 23 juin au dans le cas d'un scénario de changement inférieur. On observe un devancement d'une dizaine de jours dans la plupart des régions à l'exception des régions situées au nord de l'Abitibi-Témiscamingue et sur Saguenay-Lac-Saint-Jean. C'est dans la région au sud de Montréal que les semis seraient les plus hâtifs.

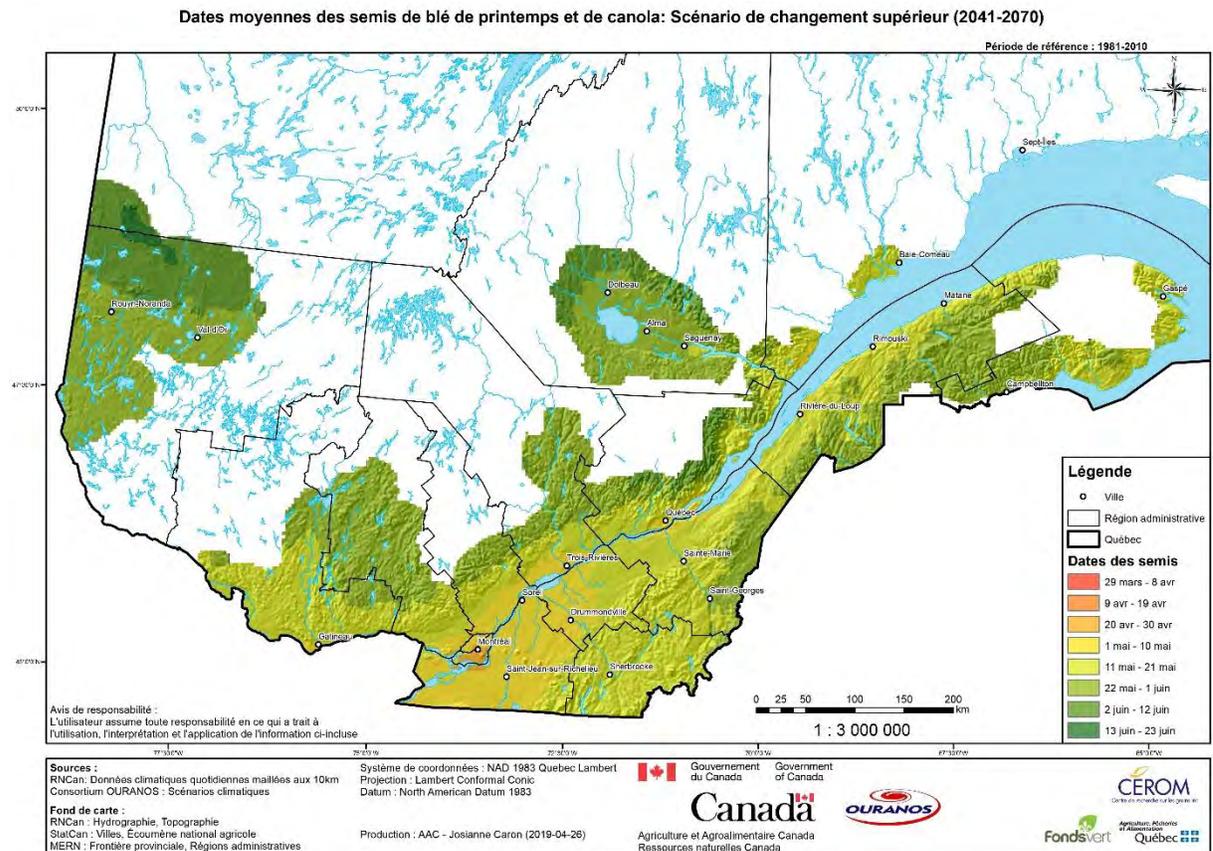


Figure 6 : Dates moyennes des semis de blé de printemps et de canola : Scénario de changement inférieur (2041-2070).

À l'horizon 2041-2070, dans le cas d'un scénario de changement supérieur, les dates de semis du blé et du canola seraient nettement devancées puisque les dates moyennes des semis dans le Sud de la province seraient devancées à fin mars début avril et auraient lieu vers la mi-mai au plus tard dans les régions plus nordiques. Globalement à travers la province, les semis auraient lieu pendant le mois d'avril. On gagnerait donc environ 1 mois par rapport à la période de référence.

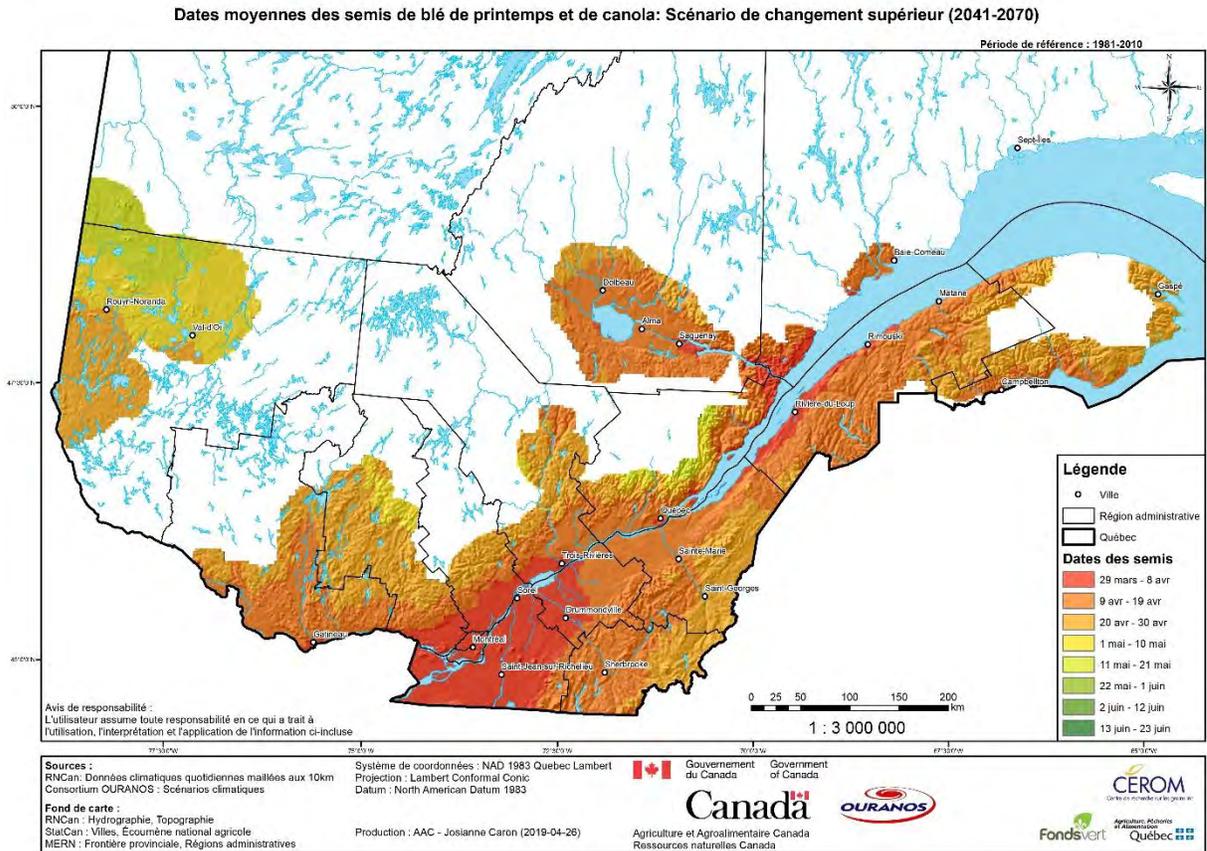


Figure 7 : Dates moyennes des semis de blé de printemps et de canola : Scénario de changement supérieur (2041-2070).

b) *Dates de semis du maïs et du soya*

Selon les conditions de référence (1981-2010), les dates de semis du maïs et du soya s'étalent de début mai au 24 juin, selon les régions, avec des semis plus tôt dans la saison dans le sud de la province (Montérégie) et autour du fleuve St Laurent. Plus on s'éloigne de ces régions, plus les dates moyennes des semis sont tardives, notamment dans les régions plus au nord ou avec une plus forte élévation du sol.

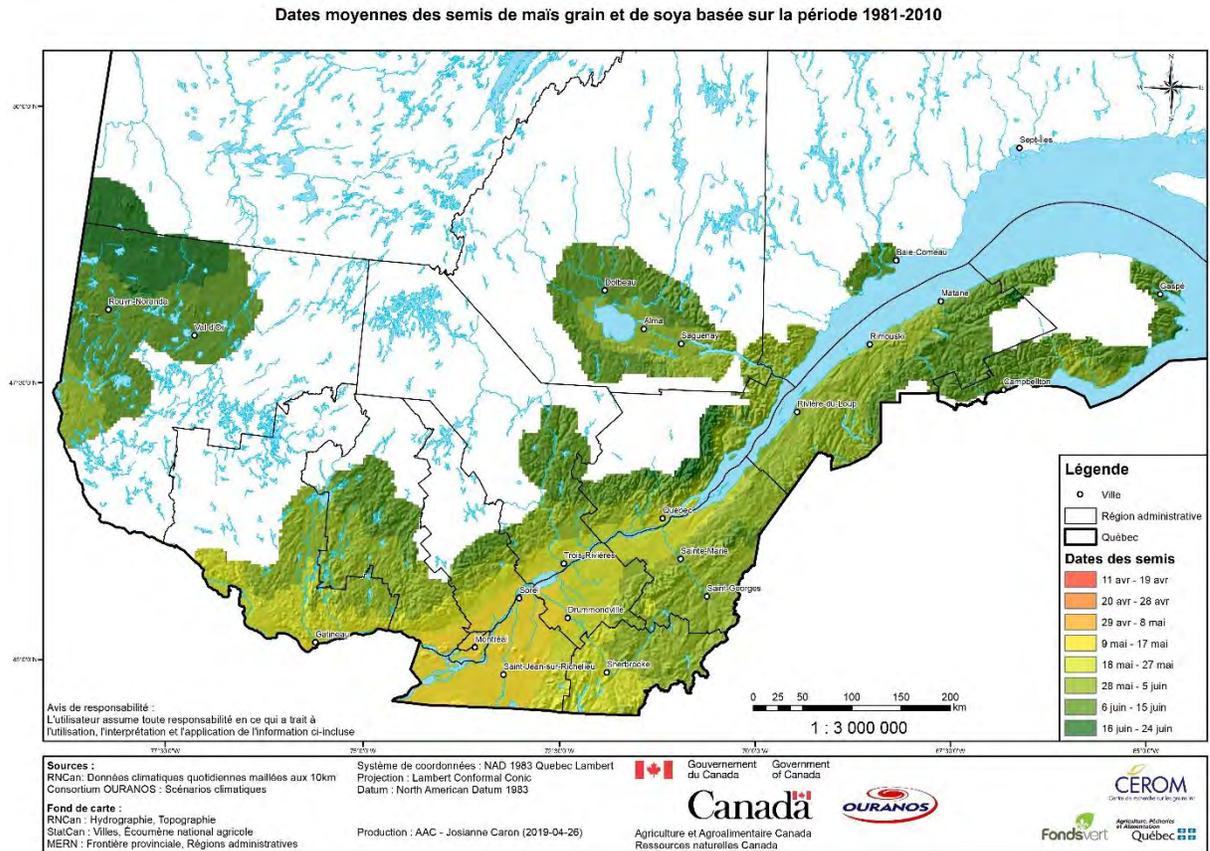


Figure 8 : Dates moyennes des semis de maïs grain et de soya basée sur la période 1981-2010.

À l'horizon 2041-2070 et dans le cas d'un scénario de changement inférieur, les dates de semis du maïs et du soya pourraient être devancées au 29 Avril et s'étaler jusqu'au 15 juin, avec un devancement d'une dizaine de jours dans la plupart des régions. C'est dans la région de Montréal et dans le Nord-Ouest et le Sud-Ouest de la Montérégie que les semis seraient les plus hâtifs.

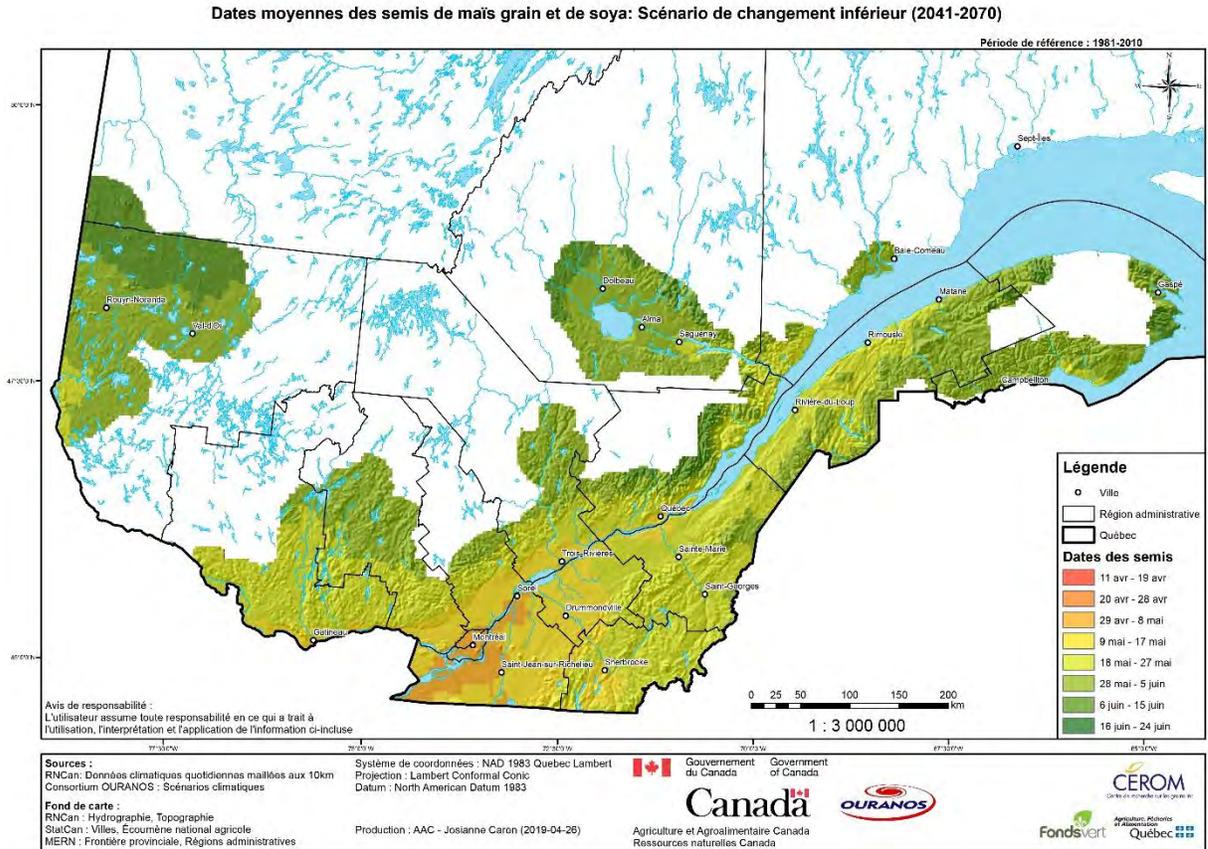


Figure 9 : Dates moyennes des semis de maïs grain et de soya : Scénario de changement inférieur (2041-2070).

À l'horizon 2041-2070, dans le cas d'un scénario de changement supérieur, les dates de semis de maïs et de soya seraient nettement devancées puisque les dates moyennes des semis dans le Sud de la province seraient devancées à la mi-avril et auraient lieu vers la fin-mai au plus tard dans les régions plus nordiques. Globalement à travers la province, les semis auraient principalement lieu pendant le mois d'avril. On gagnerait donc environ 1 mois par rapport à la période de référence.

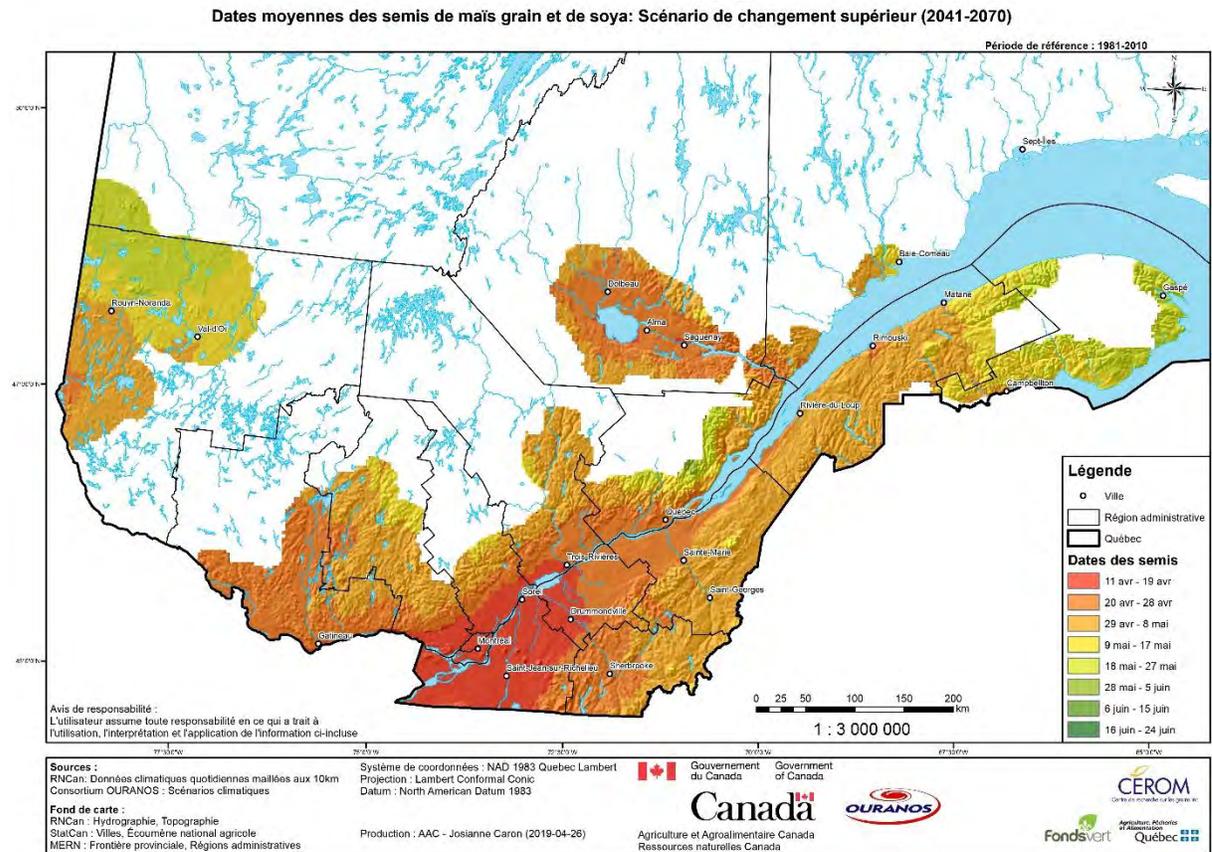


Figure 10 : Dates moyennes des semis de maïs grain et de soya : Scénario de changement supérieur (2041-2070).

Cartes de distribution des espèces en fonction du stade de développement

Pour chaque espèce d'insecte modélisée (punaise marbrée, punaise verte ponctuée et noctuelle de la tomate), des cartes indiquant les dates d'apparition des différents stades de développement ont été réalisées selon différents scénarios climatiques (actuel et futurs). On constate sur ces cartes que la Montérégie serait favorable au développement d'une ou plusieurs générations de ces espèces. Ces cartes indiquent que les différentes espèces modélisées ont le potentiel de s'établir au Québec et d'arriver plus tôt dans plusieurs régions agricoles selon les différents scénarios climatiques.

Les cartes ci-après présentent le potentiel d'établissement actuel (basé sur la période de référence 1981-2010) et futur selon différents scénarios de réchauffement climatique inférieur et supérieur pour la période 2041-2070.

a) Punaise marbrée

Les nymphes et les adultes de la punaise marbrée peuvent causer des dommages sur les grandes cultures. Pour que l'espèce s'établisse au Québec, il faudrait qu'elle soit capable d'atteindre son stade adulte. Selon les données climatiques de la période de référence (1981-2010), il n'y aurait pas d'adultes qui pourraient survivre au Québec dans les conditions actuelles.

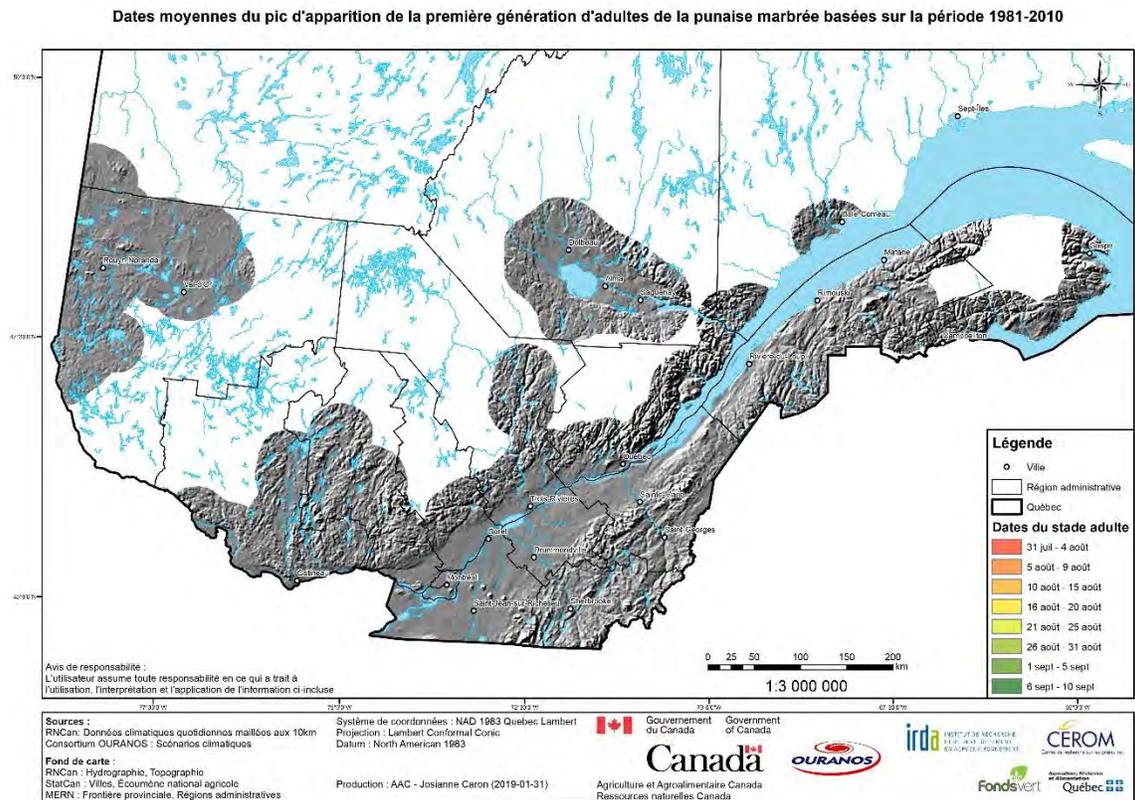


Figure 11 : Dates moyennes du pic d'apparition de la première génération d'adultes de la punaise marbrée basées sur la période 1981-2010.

Selon le modèle prévisionnel utilisé, quel que soit le scénario de réchauffement pour la période 2041-2070, la punaise marbrée sera capable de s'établir dans les zones agricoles du sud de la province, autour de l'île de Montréal où elle déjà capturée (Chouinard et al. 2018).

Dans le cadre d'un scénario de changement inférieur, le pic d'apparition de punaises marbrées adultes serait entre le 21 août (à Montréal) et le 10 septembre.

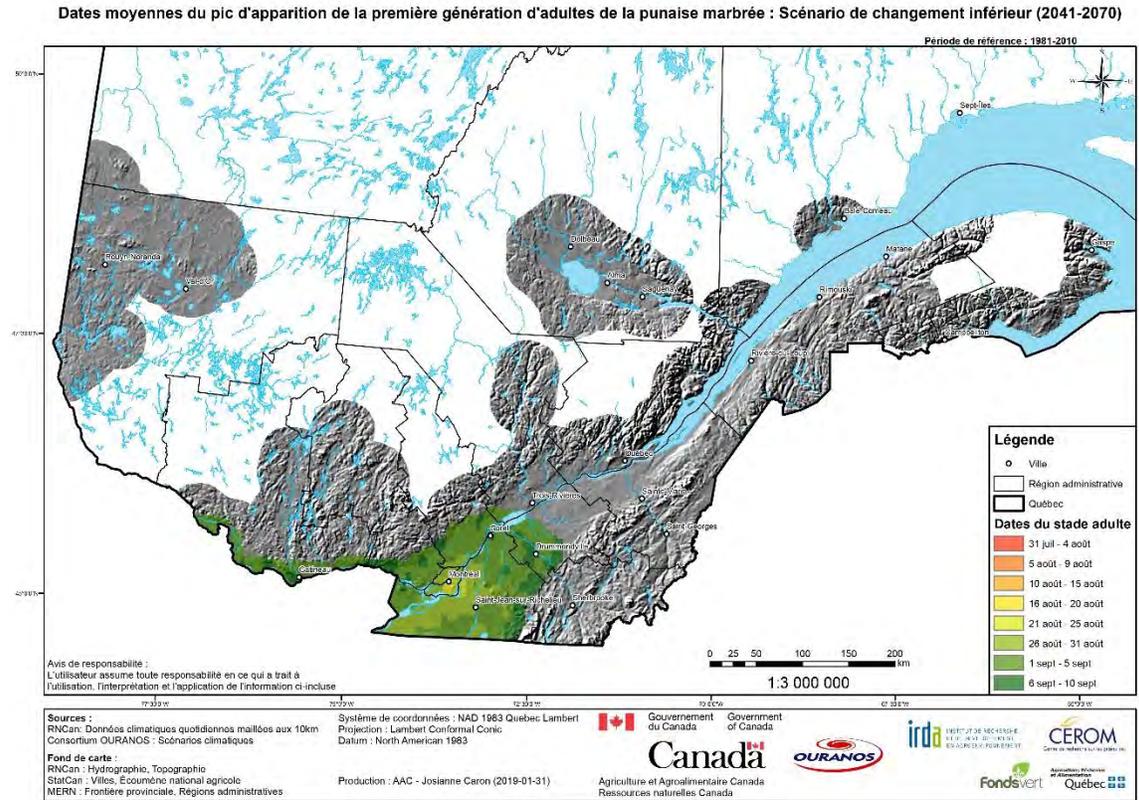


Figure 12 : Dates moyennes du pic d'apparition de la première génération d'adultes de la punaise marbrée : Scénario de changement inférieur (2041-2070).

Dans le cadre d'un scénario de changement supérieur, l'aire de distribution serait identique à celle observée dans le cadre d'un changement inférieur, mais la date moyenne du pic d'apparition de punaises marbrées adultes serait devancée d'environ trois semaines, soit à partir du 31 juillet dans la région de Montréal et en Montérégie.

Par conséquent, dans le futur, les adultes auraient le temps de trouver un site d'hibernation pour passer l'hiver.

Dates moyennes du pic d'apparition de la première génération d'adultes de la punaise marbrée : Scénario de changement supérieur (2041-2070)

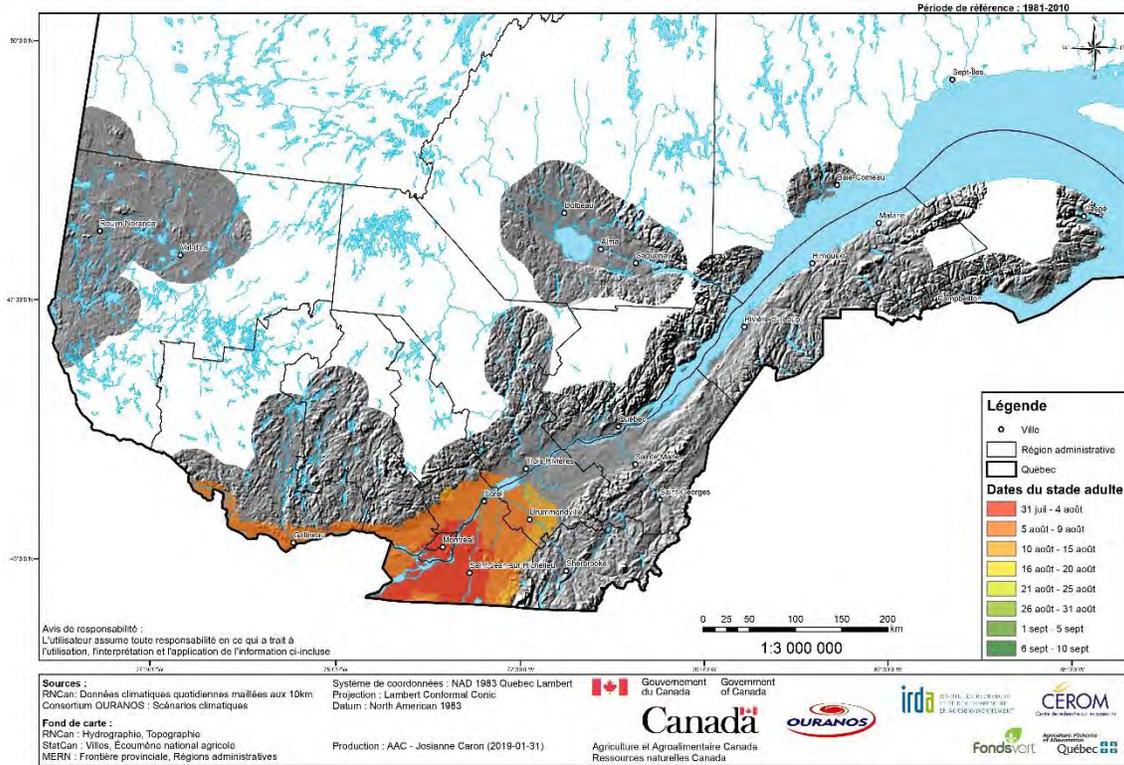


Figure 13 : Dates moyennes du pic d'apparition de la première génération d'adultes de la punaise marbrée : Scénario de changement inférieur (2041-2070).

Les scénarios montrent également que les nymphes auront aussi la capacité de se développer au Québec. Si les adultes n'auront la capacité que de se développer dans le sud de la Province, en revanche, l'aire de répartition des nymphes sera plus étendue. Nous prendrons ici l'exemple des nymphes N4 et N5 qui peuvent attaquer le soya et le maïs.

Selon les données climatiques de la période de référence (1981-2010), les nymphes atteindraient les stades N4-N5 uniquement dans le sud de la province et dans les conditions actuelles, avec un pic d'apparition situé fin août, début septembre.

Dates moyennes du pic d'apparition de la première génération des nymphes de stades 4 et 5 de la punaise marbrée basées sur la période 1981-2010

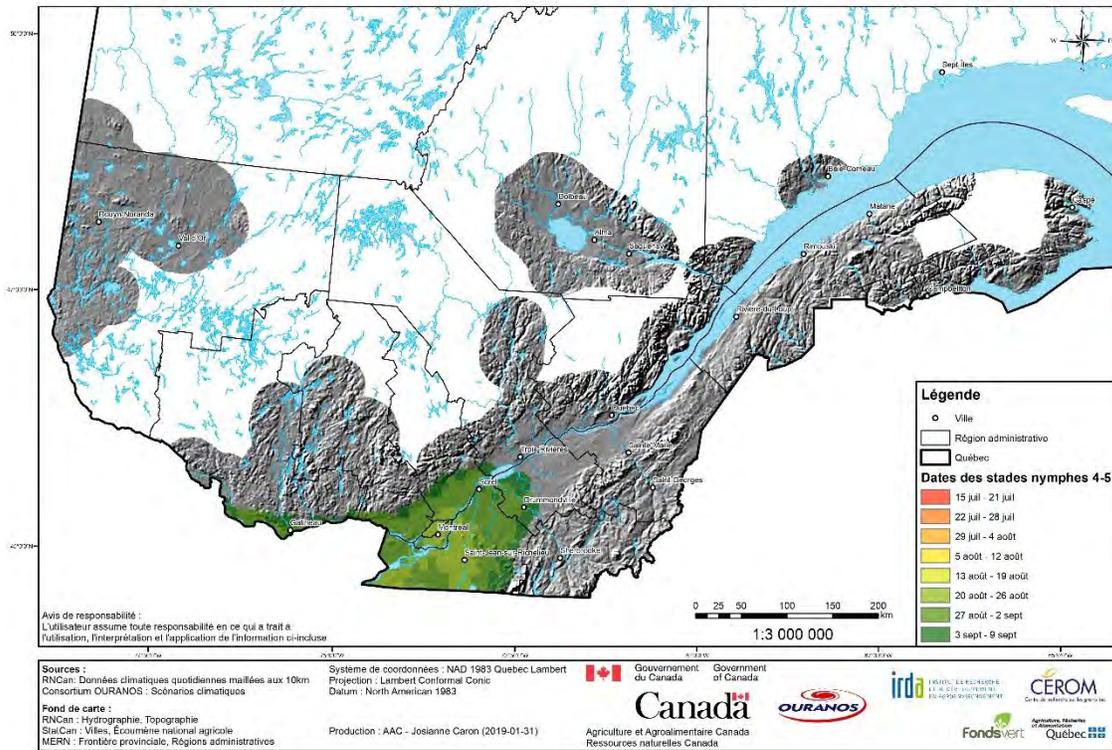


Figure 14 : Dates moyennes du pic d'apparition de la première génération des nymphes de stades 4 et 5 de la punaise marbrée basées sur la période 1981-2010.

En revanche, quel que soit le scénario de réchauffement pour la période 2041-2070, les nymphes N4 et N5 de punaise marbrée seront capables d'atteindre ces stades dans plusieurs zones agricoles. Seules les régions du Bas-Saint-Laurent, de la Gaspésie et du Saguenay-Lac-Saint-Jean seront épargnées. L'aire de distribution sera la même en cas de changements inférieur et supérieur, mais les dates d'apparition des pics seront différentes et devancées d'environ 15 jours à un mois par rapport à la période de référence (voir les cartes ci-après).

Dates moyennes du pic d'apparition de la première génération des nymphes de stades 4 et 5 de la punaise marbrée :
Scénario de changement inférieur (2041-2070)

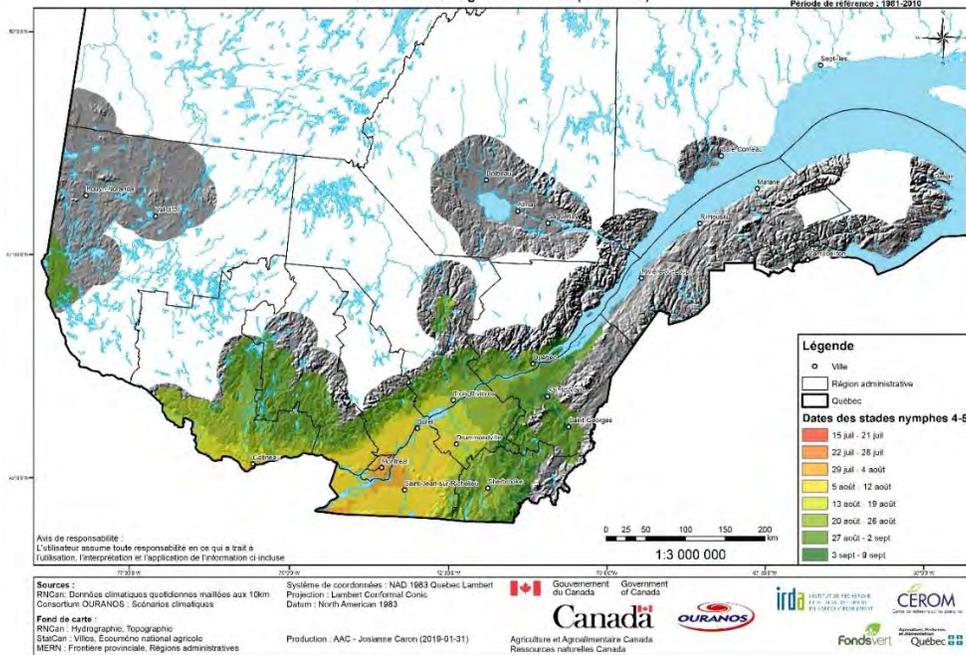


Figure 15 : Dates moyennes du pic d'apparition de la première génération des nymphes de stades 4 et 5 de la punaise marbrée : Scénario de changement inférieur (2041-2070).

Dates moyennes du pic d'apparition de la première génération des nymphes de stades 4 et 5 de la punaise marbrée :
Scénario de changement supérieur (2041-2070)

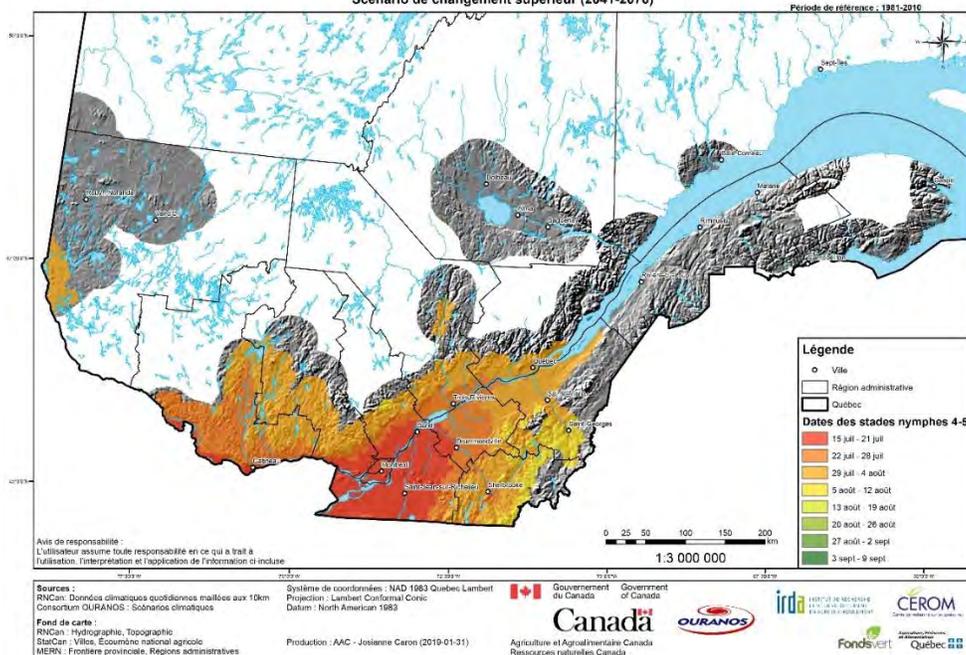


Figure 16 : Dates moyennes du pic d'apparition de la première génération des nymphes de stades 4 et 5 de la punaise marbrée : Scénario de changement supérieur (2041-2070).

b) *Punaise verte ponctuée*

Pour la punaise verte ponctuée, les modèles ont indiqué que cet insecte arriverait très tardivement et aucun pic d'adulte n'a été établi. Toutefois quelques adultes pourraient atteindre la maturité dans le sud du Québec. Par conséquent nous nous intéresserons au pic d'abondance des nymphes N4-N5 de la punaise verte ponctuée.

Selon les données climatiques de la période de référence (1981-2010), les nymphes atteindraient les stades N4-N5 uniquement dans la région de Montréal, avec un pic d'apparition situé fin août, début septembre.

Dates moyennes du pic d'apparition de la première génération des nymphes de stades 4 et 5 de la punaise verte basées sur la période 1981-2010

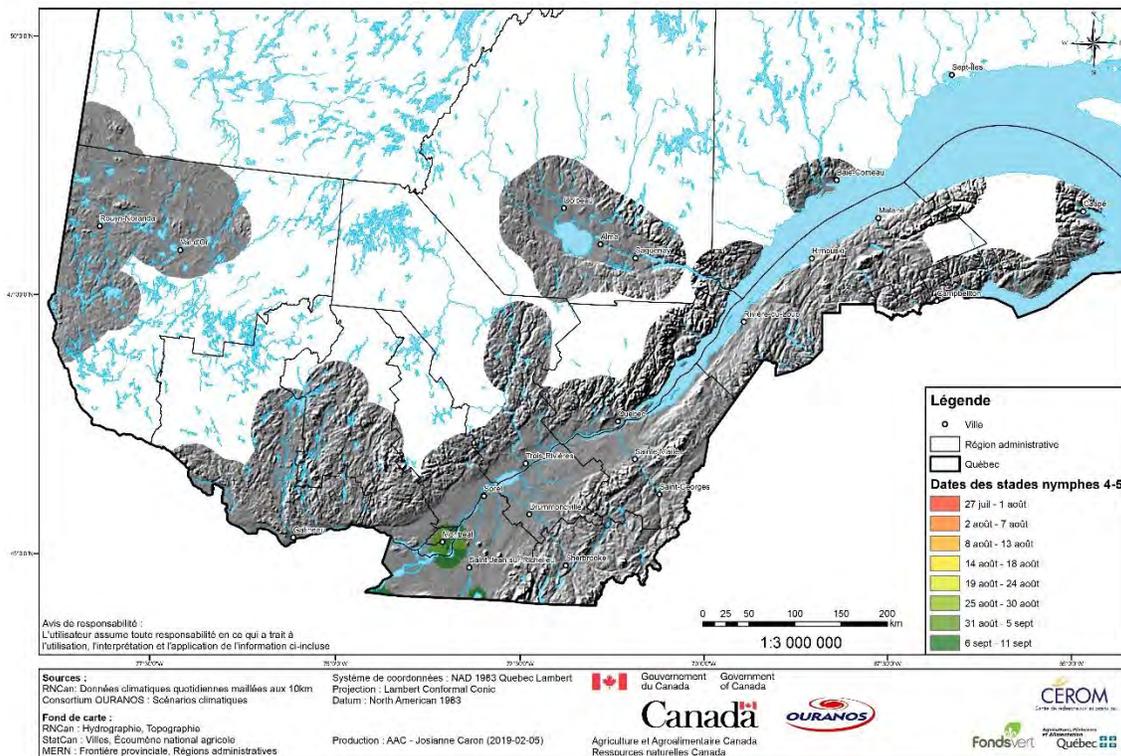


Figure 17 : Dates moyennes du pic d'apparition de la première génération des nymphes de stades 4 et 5 de la punaise verte ponctuée basées sur la période 1981-2010.

Quel que soit le scénario de réchauffement pour la période 2041-2070, les nymphes N4 et N5 de punaise marbrée seront capables d'atteindre ces stades dans plusieurs zones agricoles, s'étendant au plus loin dans la région de Trois-Rivières. L'aire de répartition serait la même dans tous les cas de changement inférieur ou supérieur. Le pic d'apparition dans le sud du Québec serait situé dans la semaine du 19 au 25 août dans le cas d'un scénario de réchauffement inférieur, alors que dans le cas d'un changement supérieur, le pic aurait lieu fin juillet début août (voir les deux cartes ci-après).

c) *Noctuelle de la tomate*

À l'horizon 2041-2070, la noctuelle de la tomate pourrait avoir jusqu'à trois générations dans le sud du Québec. Toutefois, la troisième génération serait moins problématique, car elle arriverait tardivement et n'affecterait que le maïs.

En guise d'exemple, nous nous intéresserons donc ici à la date du pic de ponte des œufs de la deuxième génération et aux larves de cette même génération. Nous choisissons les œufs, car on peut lutter contre ce stade pour éviter le développement de larves. Les larves sont aussi un stade important puisque ce sont elles qui font des dommages.

Sur la carte ci-dessous, on constate qu'actuellement, le pic de ponte aurait lieu entre le 4 août et le 19 septembre, selon les régions agronomiques.

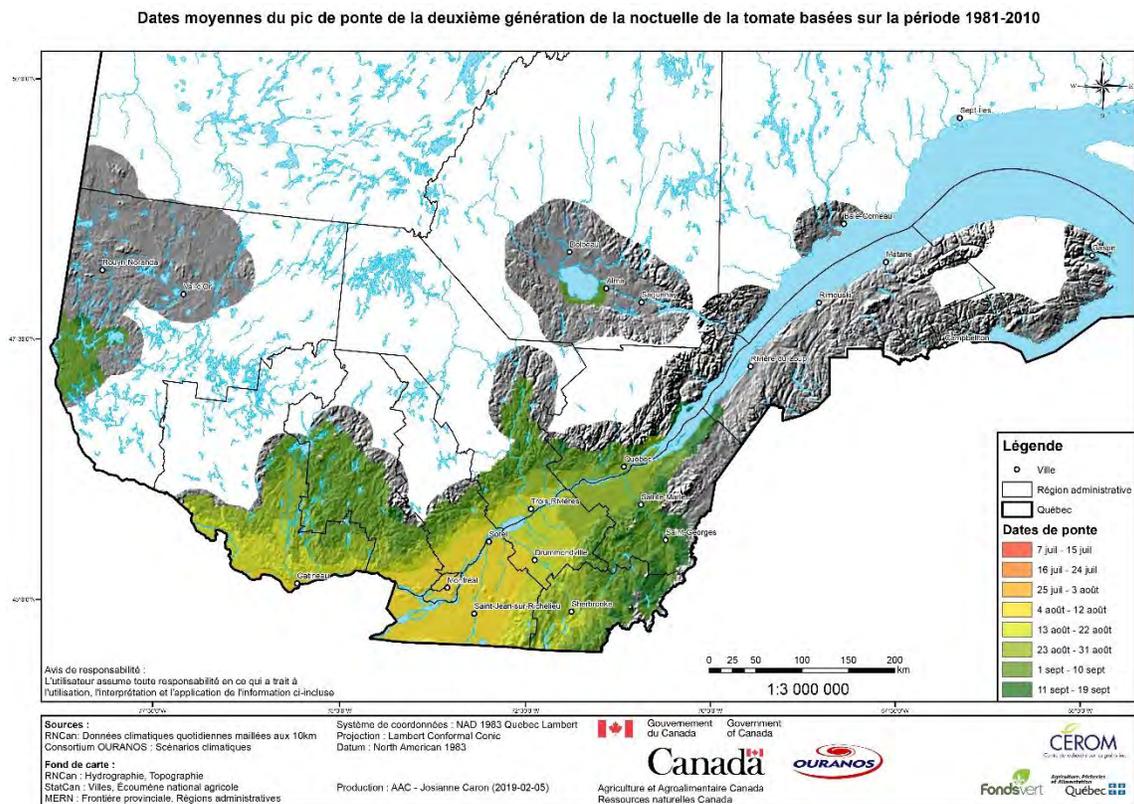


Figure 20 : Dates moyennes du pic de ponte de la deuxième génération de la noctuelle de la tomate basées sur la période 1981-2010.

Dans le futur, qu'il s'agisse d'un changement inférieur et supérieur, on constate que des œufs de cette espèce pourront être pondus sur une plus grande surface de la province.

De plus les pontes seront devancées de plusieurs semaines puisqu'elles pourraient débuter le 16 juillet autour de Montréal et s'étaler jusque début septembre, dans le cas d'un changement inférieur et les pontes pourraient même débuter début juillet dans le cas d'un changement supérieur. Le cycle de développement pourrait donc être considérablement raccourci selon le cas.

Dates moyennes du pic de ponte de la deuxième génération de la noctuelle de la tomate : Scénario de changement inférieur (2041-2070)

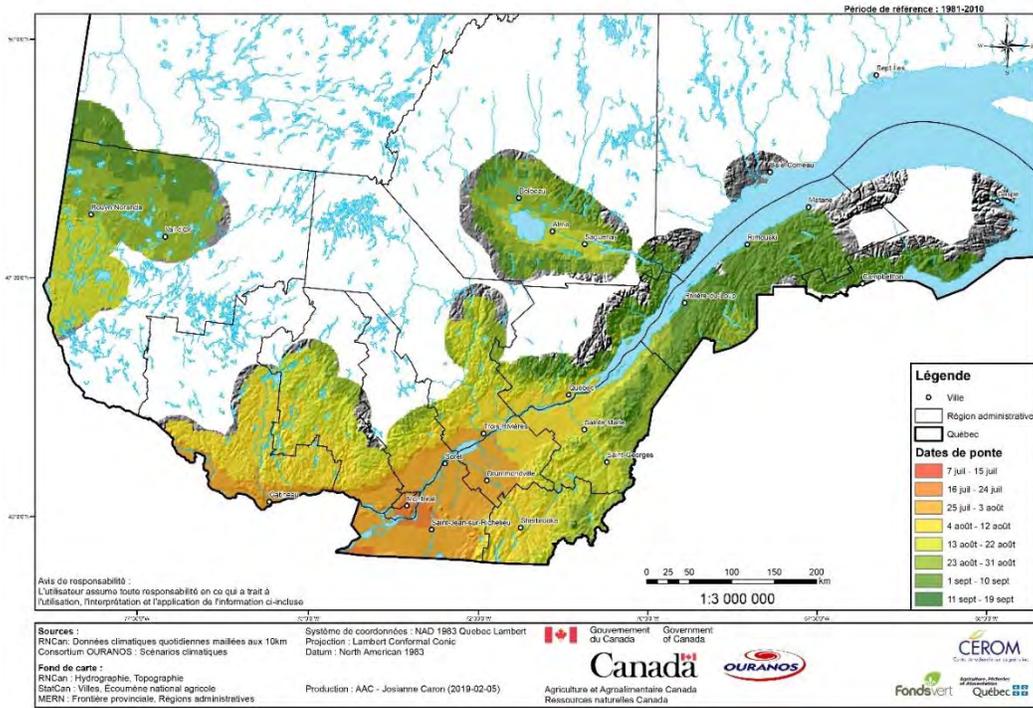


Figure 20 : Dates moyennes du pic de ponte de la deuxième génération de la noctuelle de la tomate : Scénario de changement inférieur (2041-2070).

Dates moyennes du pic de ponte de la deuxième génération de la noctuelle de la tomate : Scénario de changement supérieur (2041-2070)

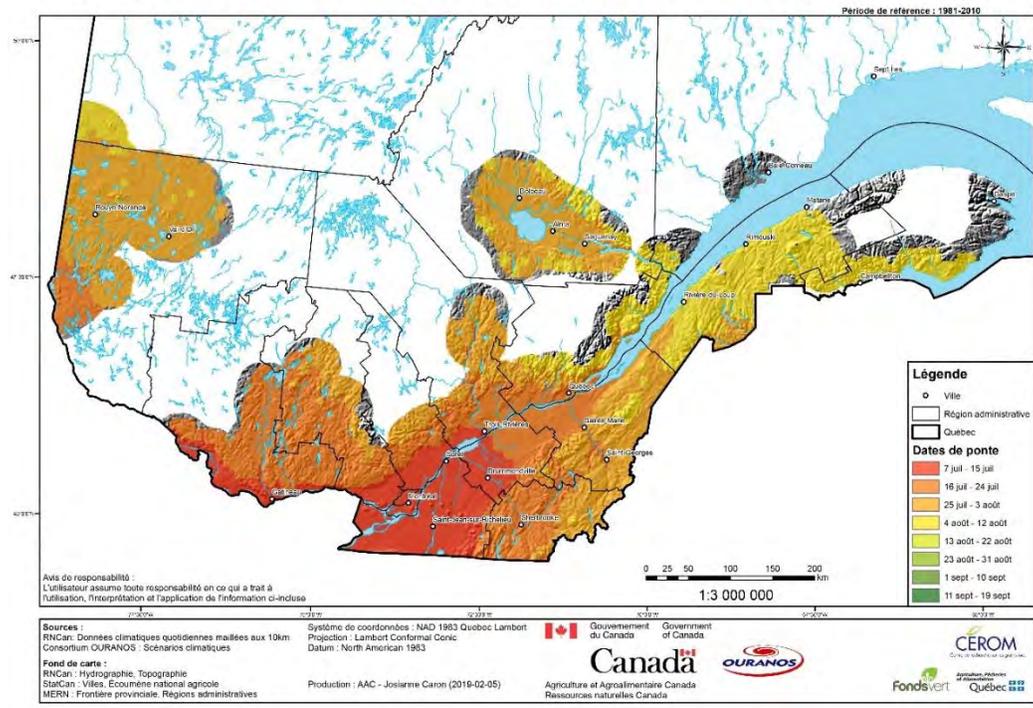


Figure 22 : Dates moyennes du pic de ponte de la deuxième génération de la noctuelle de la tomate : Scénario de changement supérieur (2041-2070).

Concernant les larves L1 à L3 de la deuxième génération, leur aire de répartition serait identique à celle des œufs et les pics d'abondance des larves suivent le même profil que ceux des œufs, avec un décalage d'environ une semaine.

Ainsi, dans le scénario actuel, le pic d'apparition des larves L1 à L3 de deuxième génération aurait lieu à partir de la deuxième moitié d'août alors que dans le cas d'un changement inférieur, le pic aurait lieu à partir du 21 juillet et dans le cadre d'un changement supérieur, à partir du 12 juillet. Tout cela aurait bien évidemment un impact majeur sur la phytoprotection puisque l'insecte sera présent pendant les périodes de vulnérabilité des cultures.

Dates moyennes du pic d'apparition de la deuxième génération de larves de stades 1 à 3 de la noctuelle de la tomate basées sur la période 1981-2010

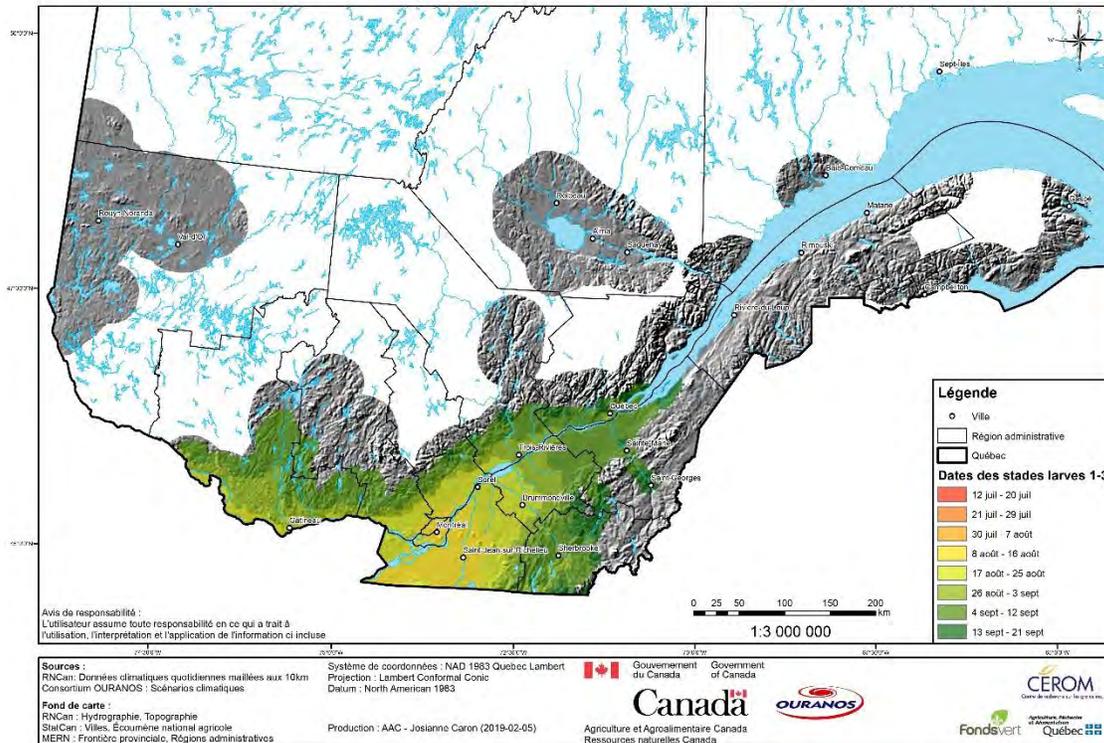


Figure 23 : Dates moyennes du pic d'apparition de la deuxième génération de larves de stades 1 à 3 de la noctuelle de la tomate basées sur la période 1981-2010.

Dates moyennes du pic d'apparition de la deuxième génération de larves de stades 1 à 3 de la noctuelle de la tomate :
Scénario de changement inférieur (2041-2070)

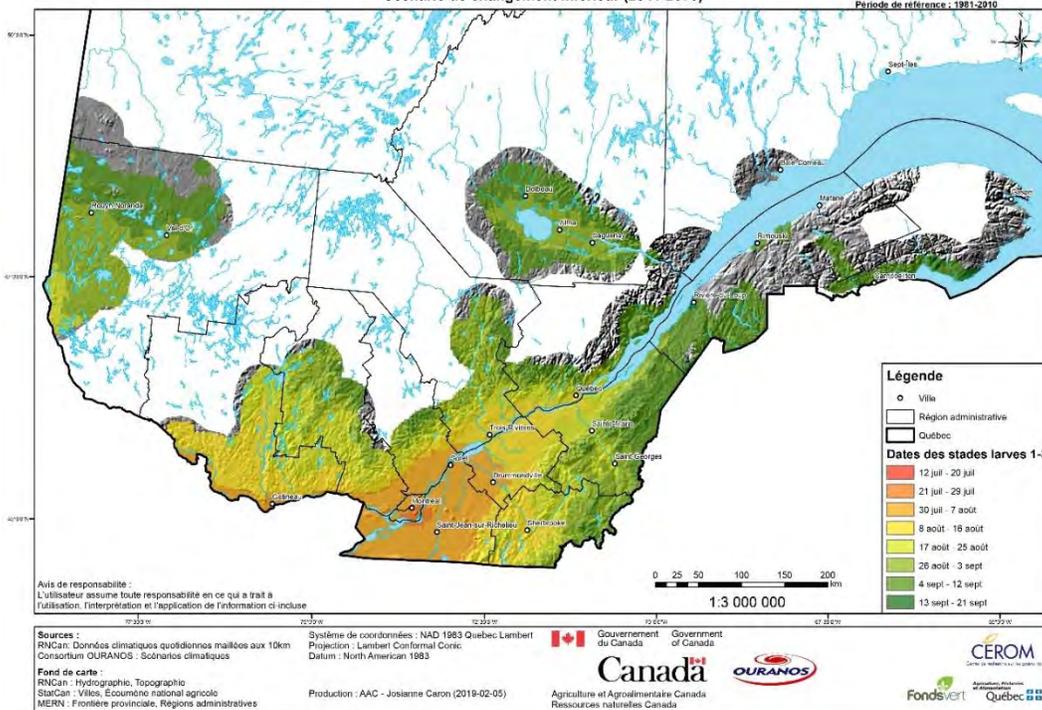


Figure 24 : Dates moyennes du pic d'apparition de la deuxième génération de larves de stades 1 à 3 de la noctuelle de la tomate : Scénario de changement inférieur (2041-2070).

Dates moyennes du pic d'apparition de la deuxième génération de larves de stades 1 à 3 de la noctuelle de la tomate :
Scénario de changement supérieur (2041-2070)

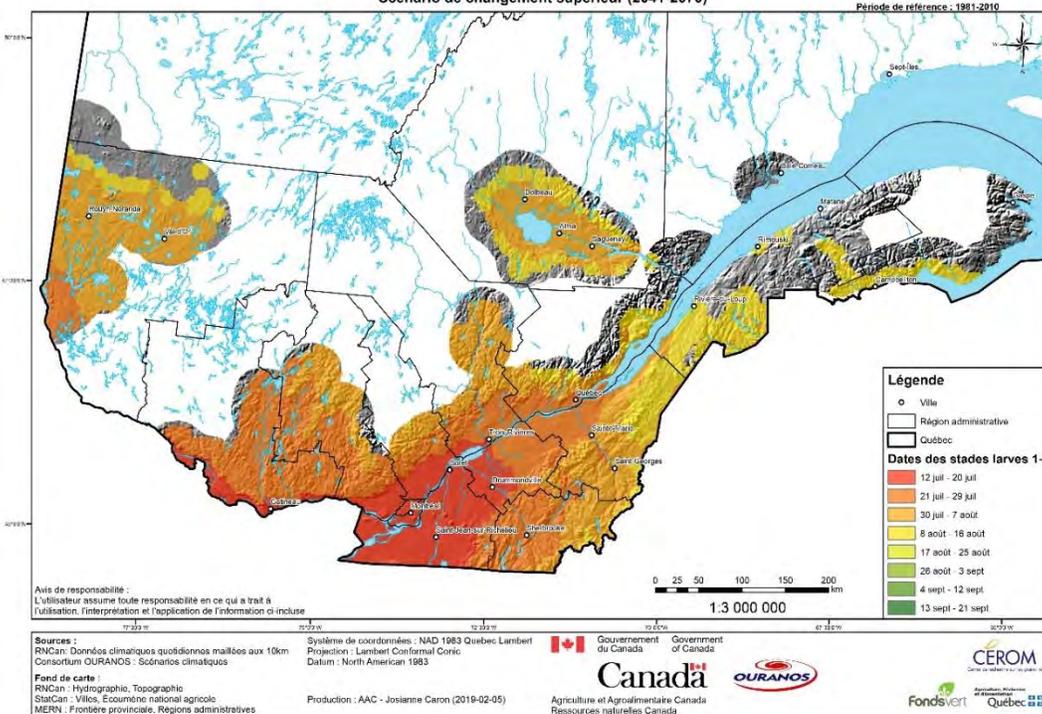


Figure 25 : Dates moyennes du pic d'apparition de la deuxième génération de larves de stades 1 à 3 de la noctuelle de la tomate : Scénario de changement supérieur (2041-2070).

Détermination des périodes de vulnérabilité

Les cultures sont sensibles à différents stades de leur développement en fonction des insectes et des maladies qui les attaquent.

Dans les grandes cultures, la punaise marbrée pourrait attaquer le soya et le maïs-grain.

Dans le soya, la punaise marbrée préfère se nourrir sur les structures reproductives du soya. Elle commence à coloniser le soya au stade R3-R4 avec un pic de population au stade R5-R6 et avec une abondante population au stade R6 (Nielsen, Anne L et al., 2011; Rice et al., 2014; Venugopal et al., 2015). Le soya est donc vulnérable aux dommages causés par la punaise marbrée aux stades R3 jusqu'à R6 (Nielsen, Anne L et al., 2011), c'est-à-dire entre les stades 68-75 BBCH (voir correspondance Mimee et al. (2014)).

Dans le maïs-grain, la punaise marbrée affecte les plants durant la formation de l'épi plus spécifiquement durant la phase laiteuse (R3) et pâteuse (R4) (Rice et al., 2014). Les stades R3 et R4 correspondent aux stades 71-83 BBCH.

La punaise verte ponctuée pourrait attaquer le maïs grain, le soya et le blé.

Dans le maïs-grain, les nymphes se nourrissent des parties végétatives et reproductives des plants de maïs (Tillman, 2011). De façon générale, la présence de la punaise est plus problématique durant la formation de l'épi soit entre 51 et 59 BBCH (Tillman, 2010).

Dans le soya, le nombre de punaises augmente lorsque les plants sont au stade de remplissage des gousses (R4) et atteint son pic d'abondance lorsque le plant est au stade de remplissage des graines (R6) (López et al., 2014). La punaise verte commence à coloniser le soya au stade R3 jusqu'au stade R6 (Schumann & Todd, 1982). Le soya est donc vulnérable aux dommages causés par la punaise verte pendant ces stades, c'est-à-dire entre les stades 68-75 BBCH (voir correspondance Mimee et al. (2014)).

Dans le blé, l'abondance de *N. viridula* augmente à l'épiaison et au stade laiteux du blé. Au fur et à mesure que l'épi du blé mature, il y a une augmentation des populations de nymphes (Reay-Jones, 2010). Le blé est donc vulnérable de l'émergence de la tête d'épi jusqu'au stade laiteux 51-77 BBCH (Reay-Jones, 2010).

Pour le développement de la noctuelle de la tomate, les épis de maïs et de blé, et les siliques de canola sont les meilleures sources de nourriture (Suzana et al., 2015). Ce ravageur peut également se nourrir de soya, mais aucune information n'a été trouvée concernant la période vulnérable.

Dans le maïs grains, les larves de noctuelles de la tomate sont surtout présentes lors de la floraison et de l'apparition de soie (stade R1 ou stade 61 BBCH) (Dömötör et al., 2009), ce qui peut affecter la reproduction et le remplissage des grains par la suite. Pour la fin de la présence de la noctuelle de la tomate, on l'a déterminé selon le comportement de la plupart des noctuelles soit au stade BBCH 85 (stade pâteux).

Dans le canola, les larves de noctuelles de la tomate se nourrissent lors de la formation du stade siliques (Suzana et al., 2015). Le canola est donc vulnérable aux dommages causés par la noctuelle aux stades 70 à 79 BBCH.

Dans le blé, la noctuelle de la tomate se nourrit de blé lors de l'épiaison au stade pâteux (Reddy et al., 2015; Ouyang et al., 2016). Le blé est donc vulnérable aux dommages causés par la noctuelle aux stades 51 à 85 BBCH.

Grâce aux modélisations, il est possible de montrer que les périodes de croissance pour les grandes cultures devraient être devancées et raccourcies dans le futur, notamment en raison du devancement de la date des derniers gels et des dates de semis, mais aussi de la hausse des températures. Comme la phénologie des cultures sera modifiée par les changements climatiques, la durée des périodes de vulnérabilité elle aussi modifiée. De plus, le développement des insectes pourrait être plus rapide en raison des changements climatiques.

En superposant sur un même graphique les données de modélisation pour les grandes cultures avec les données de modélisation pour les ravageurs, on constate que les cultures pourraient être attaquées par plusieurs stades de développement des ennemis. Cela a pu être réalisé pour les trois espèces d'insectes modélisées (punaise marbrée, punaise verte ponctuée et noctuelle de la tomate). Il est important de noter que les résultats présentés ci-après sont pour la Montérégie, région où les trois espèces ont le plus de chances de s'établir dans le futur.

a) *Punaise marbrée*

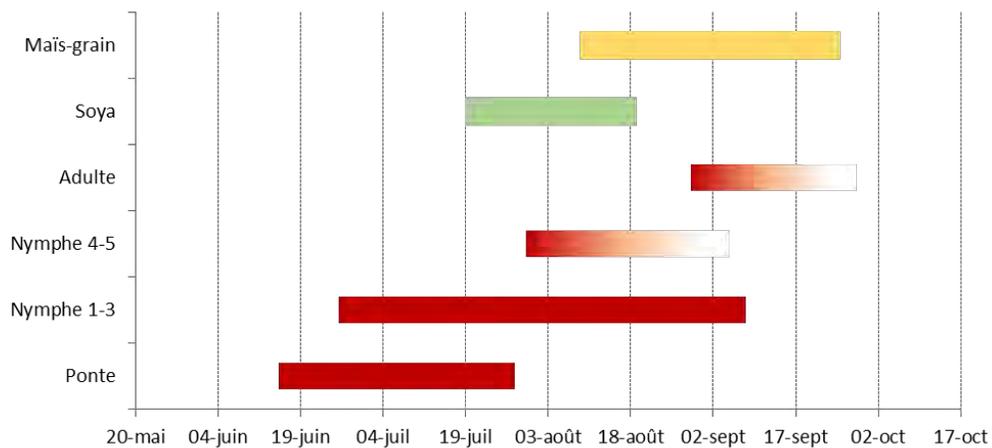


Figure 26 : Dates de la période vulnérable dans le maïs-grain et le soya, selon les différents stades de la punaise marbrée basées sur la période 1981-2010 en Montérégie.

Selon le scénario de référence, la période de vulnérabilité du soya face à la punaise marbrée se situerait entre la mi-juillet et la mi-août et celle du maïs, du 10 août à la troisième semaine de septembre. Selon les données concernant la période de référence, la punaise marbrée ne pourrait pas compléter son cycle (voir plus haut). Par conséquent, seules les larves L1 à L3 seraient en mesure de faire des dommages à la culture.

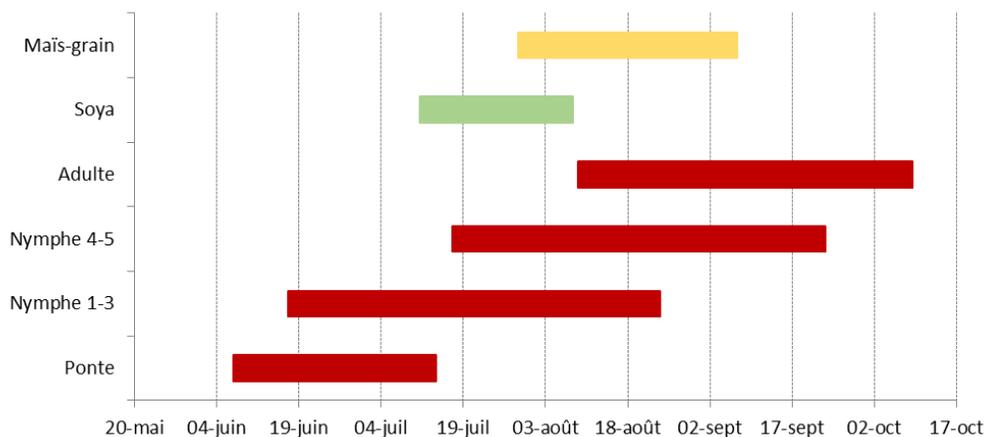


Figure 27 : Dates de la période vulnérable dans le maïs-grain et le soya, selon les différents stades de la punaise marbrée : Scénario de changement inférieur (2041-2070) en Montérégie.

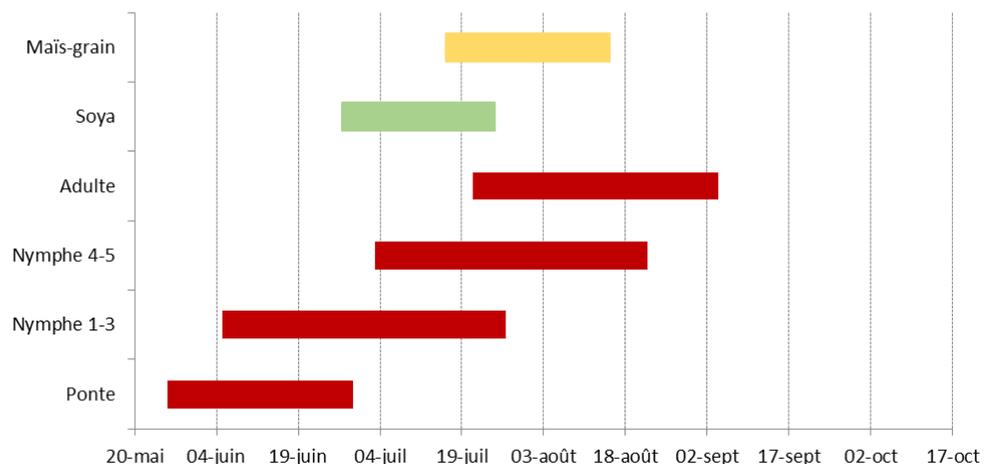


Figure 28 : Dates de la période vulnérable dans le maïs-grain et le soya, selon les différents stades de la punaise marbrée : Scénario de changement supérieur (2041-2070) en Montérégie.

À l’horizon 2041-2070, la période de vulnérabilité du soya sera devancée au 21 juillet dans le cadre d’un scénario de réchauffement inférieur et au 15 juillet dans le cadre d’un scénario de réchauffement supérieur soit environ trois semaines plus tôt. La période de vulnérabilité du soya sera d’environ 1 mois dans tous les cas. En revanche dans le cas du maïs, la période de vulnérabilité sera devancée au 10 juillet dans le cadre d’un scénario de réchauffement inférieur et au 26 juin dans le cadre d’un scénario de réchauffement supérieur soit presque trois semaines plus tôt. La période de vulnérabilité sera plus courte d’environ 15 jours en raison d’une croissance plus rapide du maïs. Comme la punaise pourra compléter son cycle de développement en Montérégie, tous les stades de développement pourront affecter le maïs et les stades nymphaux pourront affecter le soya. La durée de la période de vulnérabilité du soya ne varie pas contrairement à celle du maïs, car il s’agit d’une différence dans la réponse à la température pendant la phase reproductive de ces deux cultures. Les températures optimales pendant cette phase pour le maïs et le soya sont respectivement de 30°C et 25°C. En conséquence, le maïs devrait donc bénéficier beaucoup plus des températures plus élevées pendant cette phase que le

soya. De plus, des réponses non-linéaires à la température ont été utilisées pour modéliser la phénologie. Pour le soya, des températures supérieures à la température optimale devrait même réduire la vitesse du développement de la culture. À titre d'exemple, une température de 28°C réduira la vitesse de développement du soya par rapport à 25°C.

b) *Punaise verte ponctuée*

Selon le scénario de référence (1981-2010), les pontes de punaise verte ponctuée pourraient avoir lieu sur toutes les cultures (blé, maïs et soya) pendant la saison de croissance. Toutefois, seuls le maïs et le soya seraient exposés aux nymphes N1-N3 (voir figure ci-dessous). Les nymphes de stade N4 et N5 arriveraient trop tard pour affecter les cultures et aucun adulte ne se développerait (voir plus haut).

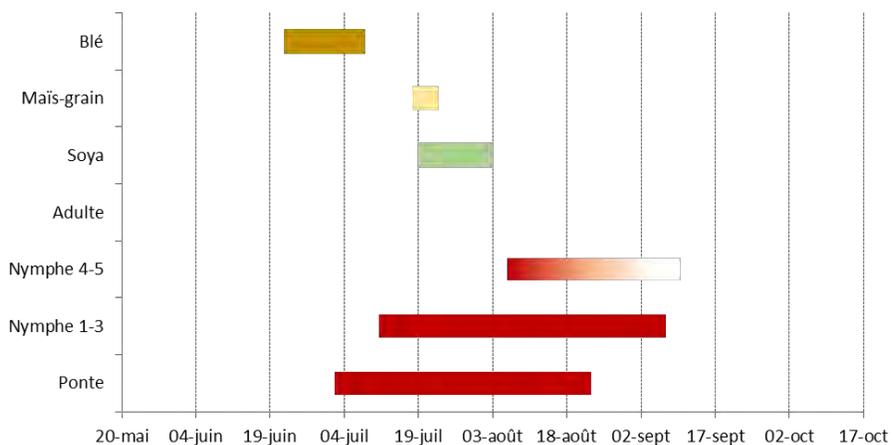


Figure 29 : Dates de la période vulnérable dans le maïs-grain et le soya, selon les différents stades de la punaise verte ponctuée basées sur la période 1981-2010 en Montérégie.

À l’horizon 2041-2070, les périodes de vulnérabilité du blé, du maïs et du soya seront devancées de plusieurs jours, quel que soit le scénario de réchauffement (inférieur ou supérieur). La durée des périodes de vulnérabilité serait identique dans tous les cas. Les pontes pourraient également avoir lieu sur toutes les cultures. Les nymphes de stades 1 à 3 pourraient affecter le blé, le maïs et le soya pendant leur période de vulnérabilité. Les nymphes de stades 4 et 5 quant à elle n’affecteraient que le soya et tardivement pendant la période de vulnérabilité. Les adultes, même s’ils arrivent à se développer au Québec, ne devraient pas affecter les cultures puisque ce stade de développement serait atteint après la fin des périodes de vulnérabilité des cultures ciblées (voir les deux figures ci-après).

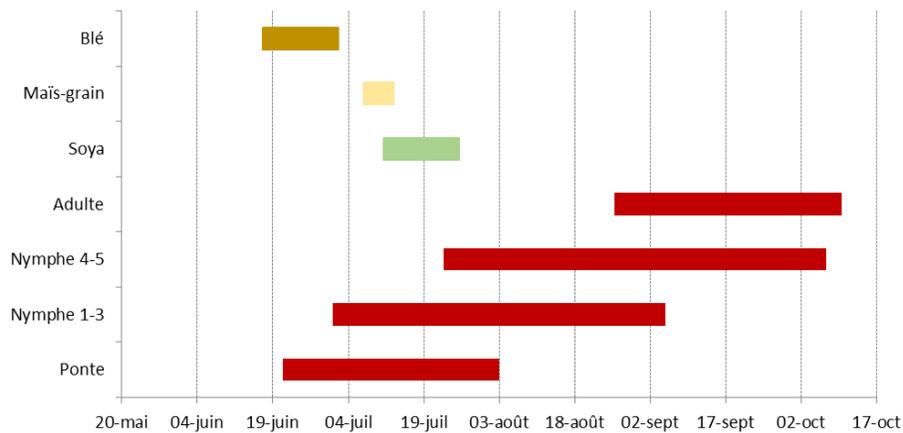


Figure 30 : Dates de la période vulnérable dans le maïs-grain et le soya, selon les différents stades de la punaise verte ponctuée : Scénario de changement inférieur (2041-2070) en Montérégie.

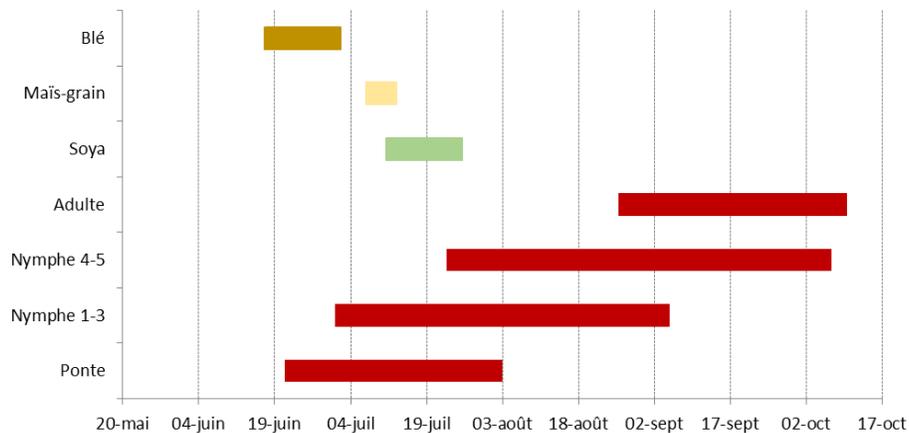


Figure 31 : Dates de la période vulnérable dans le maïs-grain et le soya, selon les différents stades de la punaise verte ponctuée : Scénario de changement supérieur (2041-2070) en Montérégie.

c) *Noctuelle de la tomate*

Selon le scénario de référence (1981-2010), deux générations de noctuelles de la tomate pourraient affecter le blé, le canola et le maïs si cette espèce était introduite en ce moment. Toutes les larves de première génération affecteraient les trois cultures dès début de leur période de vulnérabilité. La deuxième génération, même si elle arrive plus tardivement affecterait elle aussi les trois cultures. Les cultures pourraient même être affectées en même temps par des larves de première et deuxième générations.

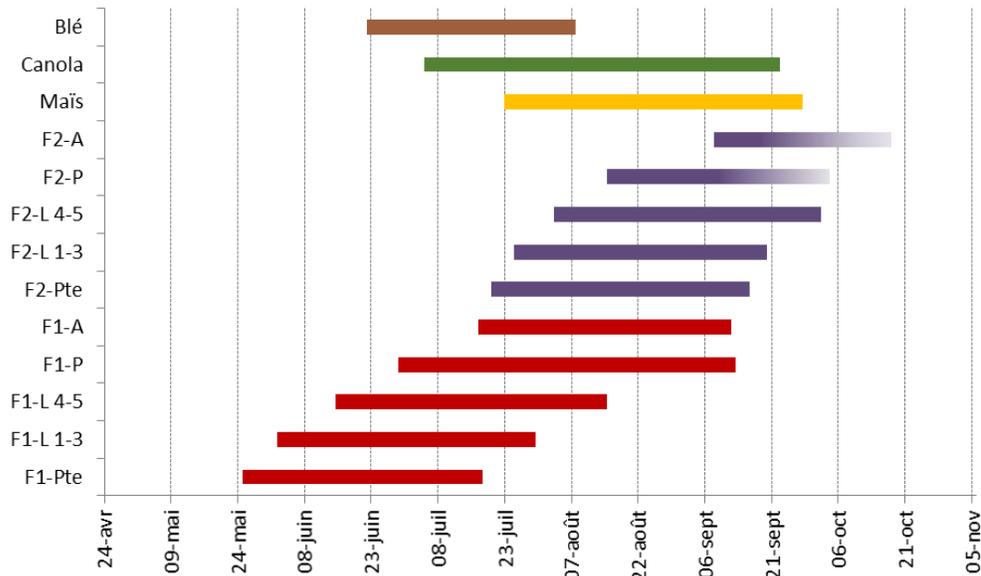


Figure 32 : Dates de la période vulnérable dans le blé, le canola et le maïs-grain, selon les différents stades de la noctuelle de la tomate basées sur la période 1981-2010 en Montérégie.

À l’horizon 2041-2070, les périodes de vulnérabilité du blé, du maïs et du canola devraient être devancées de plusieurs jours (une à deux semaines) quel que soit le scénario de réchauffement (inférieur ou supérieur). Encore une fois, les trois cultures pourraient être affectées par la première et la seconde génération qui se développeront plus vite.

Une troisième génération de noctuelle de la tomate se développera. Les jeunes larves (L1 à L3) de cette génération pourraient affecter le maïs à la fin de sa période de vulnérabilité, notamment dans le cas d’un scénario de réchauffement supérieur (voir figures ci-après).

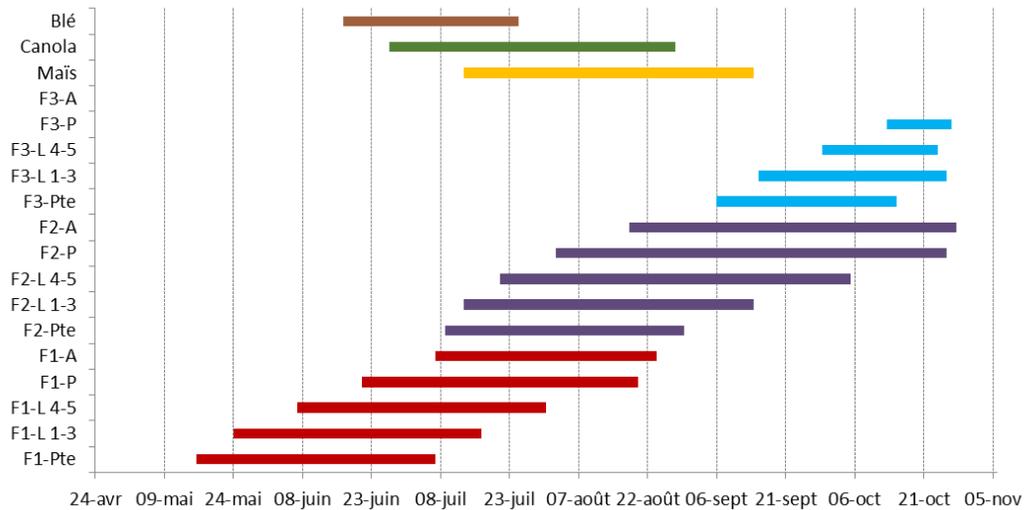


Figure 33 : Dates de la période vulnérable dans le blé, le canola et le maïs-grain, selon les différents stades de la noctuelle de la tomate : Scénario de changement inférieur (2041-2070) en Montérégie.

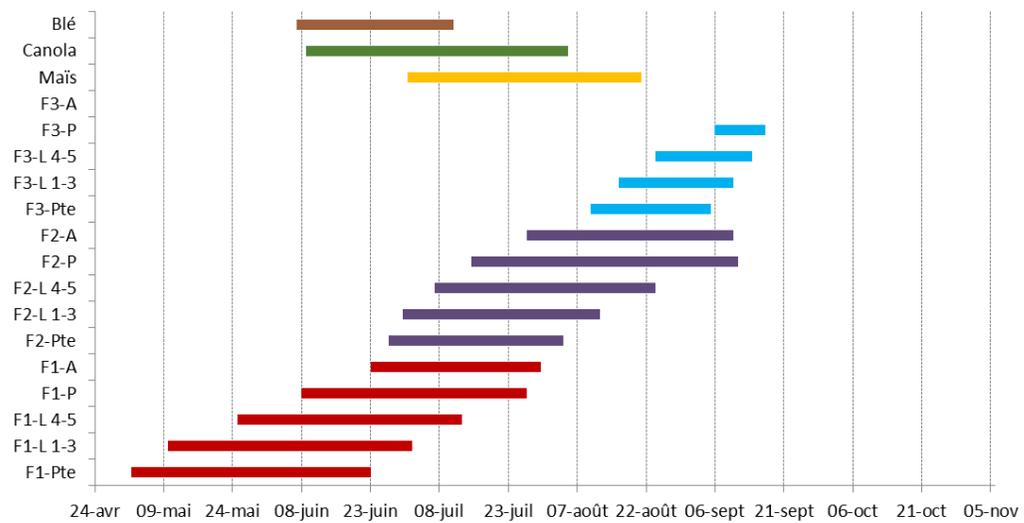


Figure 34 : Dates de la période vulnérable dans le blé, le canola et le maïs-grain, selon les différents stades de la noctuelle de la tomate : Scénario de changement supérieur (2041-2070) en Montérégie.

OBJECTIF 3 : Identifier les mesures d'adaptation possibles pour les espèces ciblées, et plus globalement pour la protection des grandes cultures.

Identification des analogues spatiaux

a) Détermination des polygones régionaux

À partir des modélisations et des indicateurs bioclimatiques, il a été estimé que dans un futur proche (horizon 2041-2070), pour la punaise marbrée, la punaise verte ponctuée et la noctuelle de la tomate, il y aurait un plus grand potentiel de développement et de dispersion de ces insectes en Montérégie, même s'ils pouvaient potentiellement être présents dans d'autres régions. Pour le méligèthe des crucifères, compte tenu des cartes réalisées pour la phénologie du canola, il a été estimé que cette espèce pourrait être présente en Abitibi-Témiscamingue et au Saguenay-Lac-St-Jean dans le futur alors qu'elle est actuellement présente principalement dans le Bas-St-Laurent (voir Annexe 2). Il a donc été estimé que la niche écologique du méligèthe se situerait principalement en Abitibi-Témiscamingue et au Saguenay-Lac-St-Jean. Par conséquent, il a donc été décidé de rechercher des analogues spatiaux de ces deux régions. Aucune aire de distribution future n'a pu être établie pour la rouille du soya au Québec, compte tenu de l'absence de modélisation pour cette maladie et du fait de l'actualisation du modèle de la fusariose du blé. Comme cette maladie est déjà présente au Québec, que les modèles ont très peu changé et qu'une précédente étude avait déjà été réalisée sur les analogues spatiaux de la fusariose du blé (Gagnon et al. 2013), nous n'avons pas recherché de nouveaux analogues spatiaux pour cette maladie.

Des polygones ont donc été créés pour délimiter les contours des régions agricoles de la Montérégie, de l'Abitibi et du Saguenay-Lac-Saint-Jean où les espèces pourraient s'établir dans le futur.

Les points GPS ci-dessous ont servi à délimiter la zone agricole de la Montérégie et à créer le polygone correspondant

- 46.098745, -72.973474
- 45.596992, -72.314479
- 45.01448, -72.485885
- 45.003881, -74.626015
- 45.560664, -74.380145
- 45.402648, -73.570114
- 45.704553, -73.434564

Les points GPS ayant servi à délimiter la zone agricole du Saguenay-Lac-Saint-Jean sont les suivants :

- 48.546875, -72.909415
- 49.195801, -72.233555
- 48.439110, -69.336395
- 47.656974, -70.115054

Et ceux pour la zone agricole de l'Abitibi-Témiscamingue sont les suivants :

- 48.379289, -77.203972
- 49.380619, -79.516305
- 47.007148, -79.336157

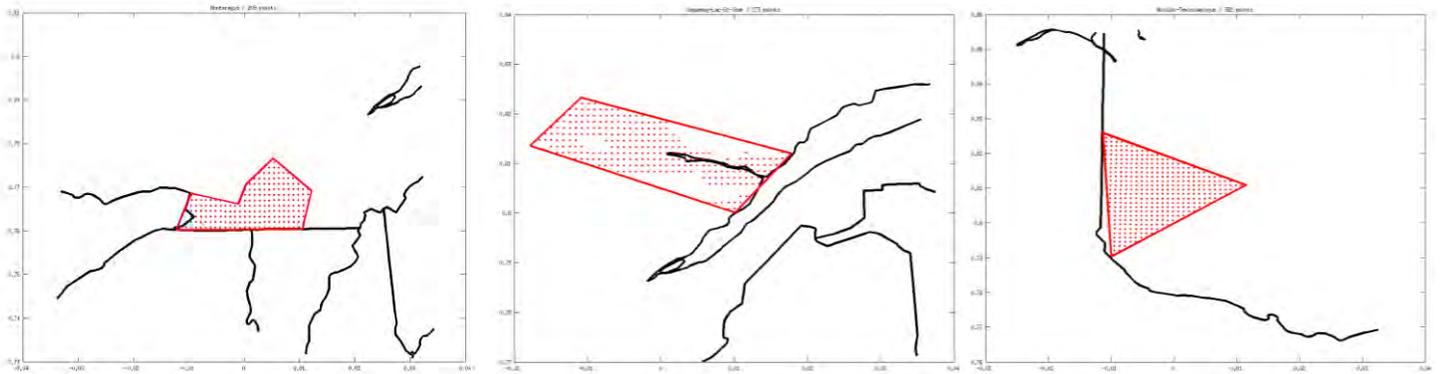


Figure 35 : Polygones représentant les zones agricoles de la Montérégie (à gauche), du Saguenay-Lac-Saint-Jean (au centre) et de l'Abitibi-Témiscaminque (à droite).

Ces polygones ont permis de réaliser des cartes pour faciliter la recherche de régions bioclimatiques analogues à travers le monde. Les cartes produites par OURANOS présentent des échelles de couleurs en fonction du nombre de scénarios climatiques les plus probables (vert à bleu sur les cartes). Une liste des régions/pays analogues a été dressée pour les quatre espèces d'insectes. Le choix final des zones bioclimatiques analogues tenait compte également de la présence significative dans cette région de la ou des cultures associées à l'ennemi. Quelle que soit l'espèce d'insecte étudiée, les conditions futures du Québec devraient ressembler à celles du Nord Est des États-Unis pour l'Amérique du Nord, de l'Europe de l'Est pour le continent européen et du Nord de la Chine, au Japon et à la Corée pour l'Asie.

Analogues spatiaux et superficies cultivées pour chaque région

a) Punaise marbrée

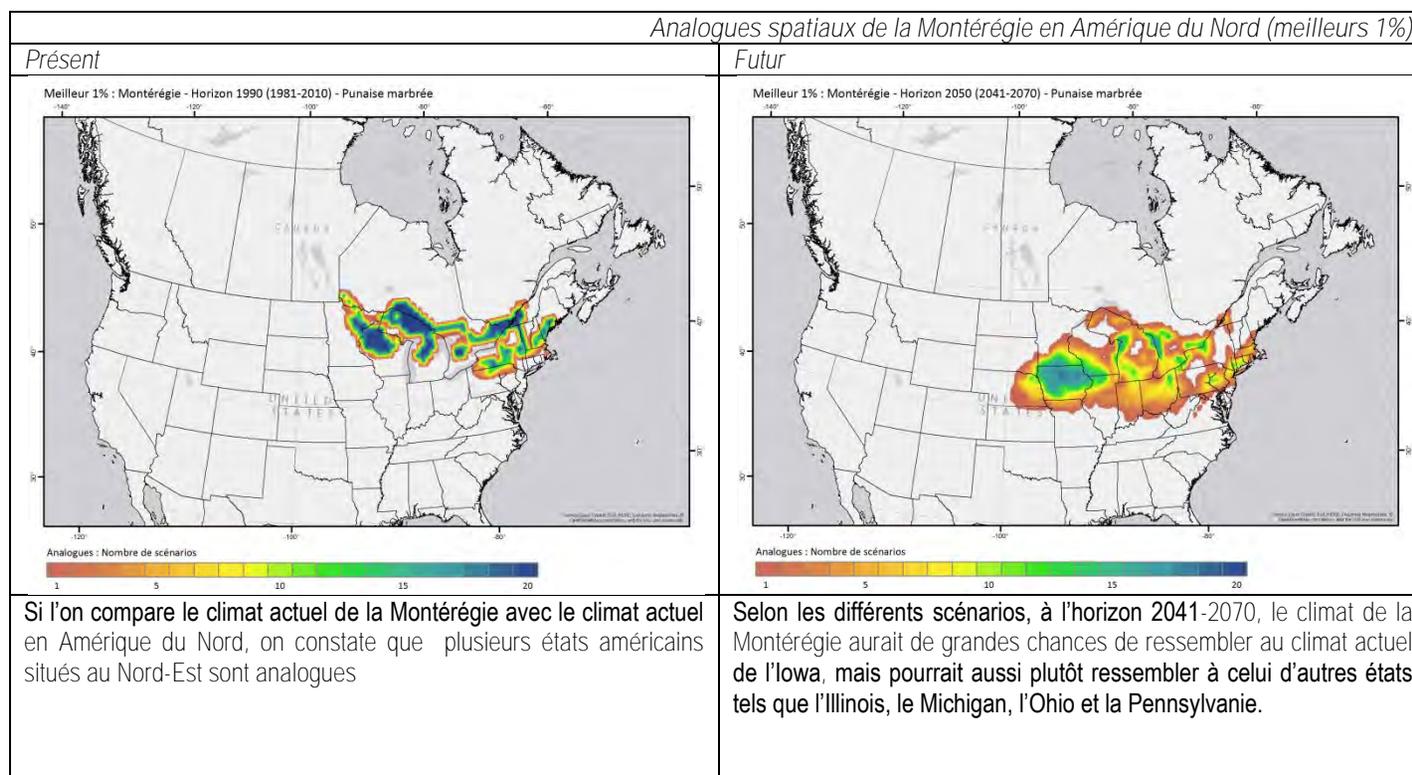


Figure 36 : Analogues spatiaux de la Montérégie pour la punaise marbrée en Amérique du Nord (meilleurs 1%).

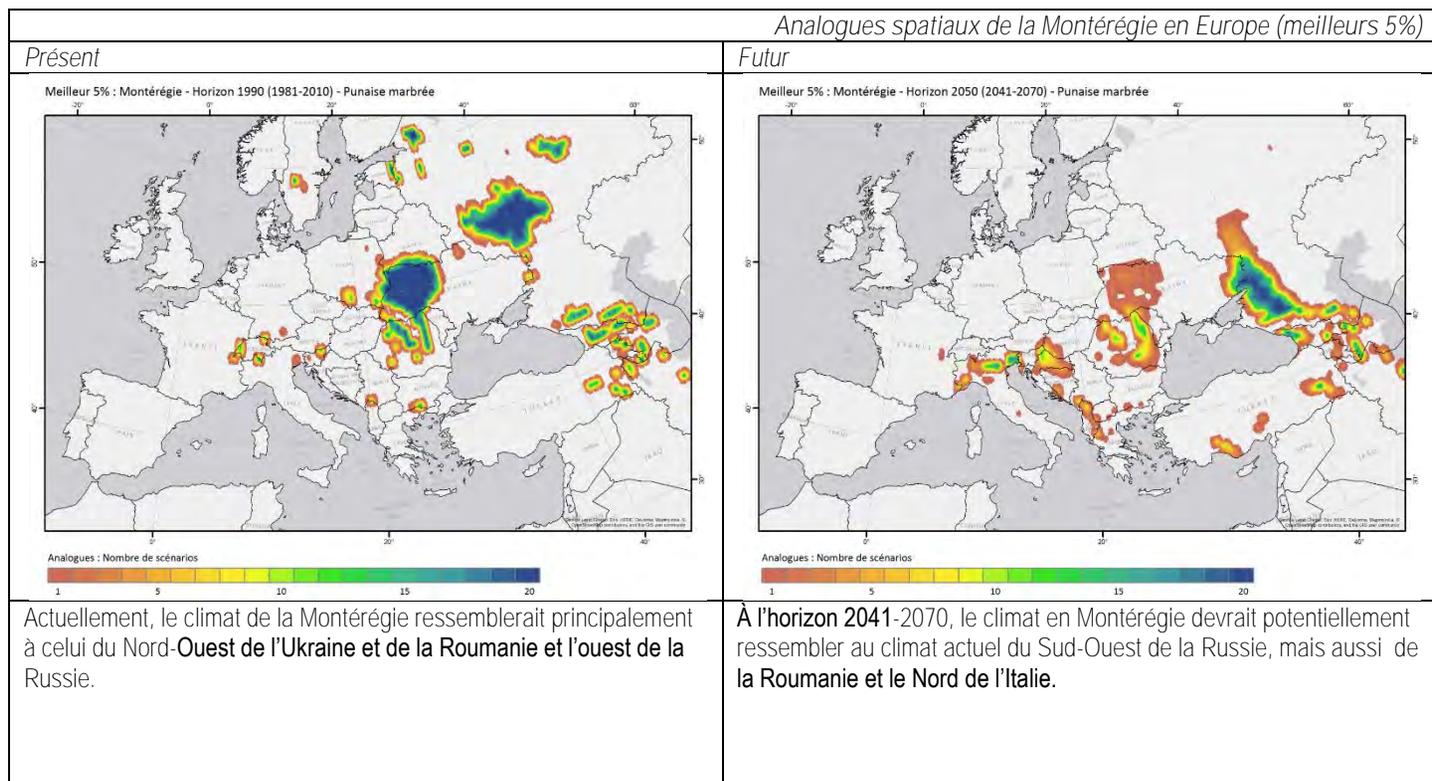


Figure 37 : Analogues spatiaux de la Montérégie pour la punaise marbrée en Europe (meilleurs 5%).

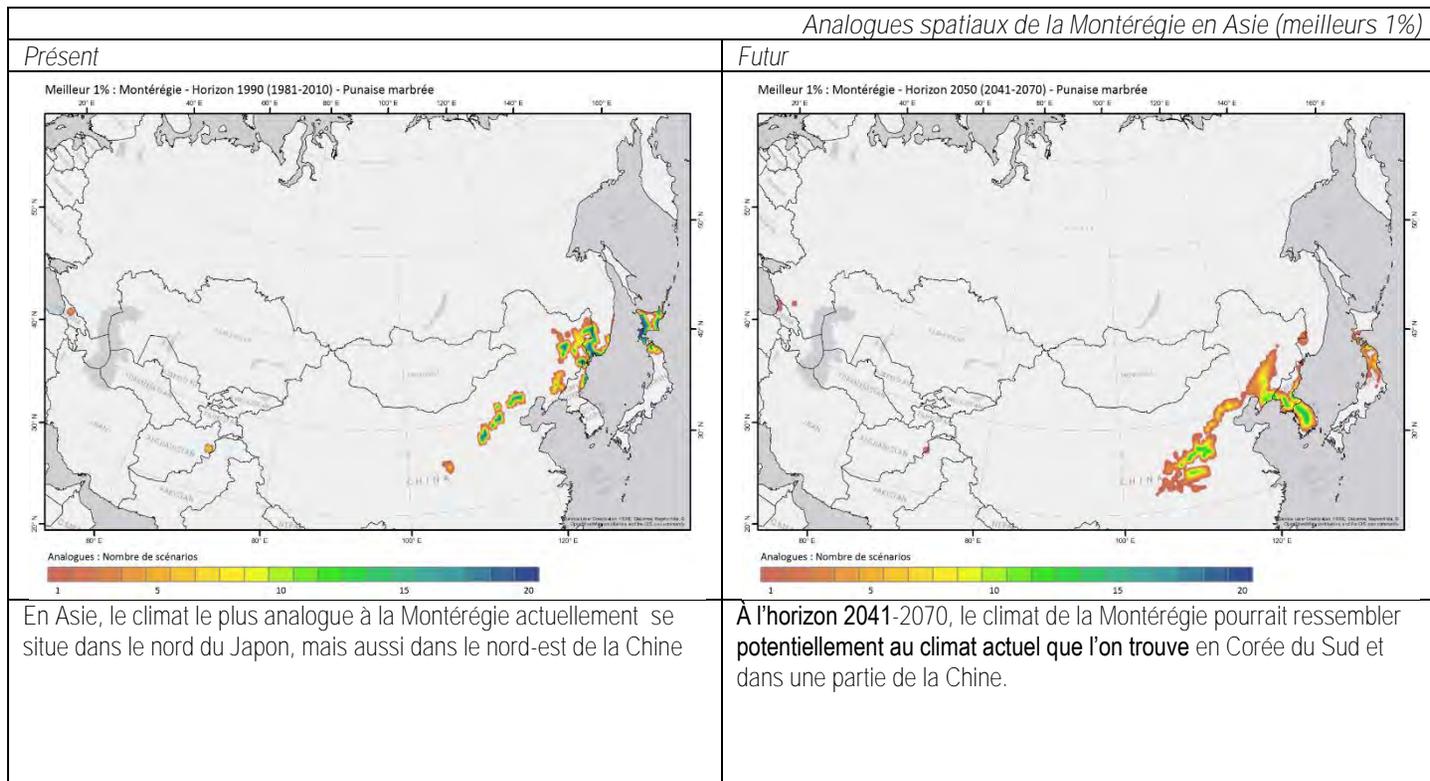


Figure 38 : Analogues spatiaux de la Montérégie pour la punaise verte marbrée en Asie (meilleurs 1%).

Superficies moyennes ensemencées par type de grande culture et par région analogue

	Pays – États analogues	Superficie en maïs (ha)
États-Unis	Ohio	1 331 417
	Illinois	4 653 889
	Michigan	874 122
	Pennsylvanie	404 686
Asie	Chine	37 123 000
	Corée du Nord	496 390
	Corée du Sud	559 800
Europe	Roumanie	2 438 000
	Italie	990 000
Québec		360 000
	Pays – États analogues	Superficie en soya (ha)
États-Unis	Ohio	1 942 493
	Illinois	4 006 391
	Michigan	870 075
Asie	Chine	9 179 000
Québec		325 000
	Pays – États analogues	Superficie en blé (ha)
États-Unis	Ohio	238 765
	Illinois	226 624
	Michigan	424 812
	Pennsylvanie	93 078
Asie	Japon	213 000
	Chine	24 069 000
Europe	Roumanie	2 071 000
	Italie	1 870 000
Québec*		88 000

* plus précisément la Montérégie

b) Punaise verte ponctuée

En Amérique du Nord, les analogues spatiaux de la Montérégie pour la punaise verte ponctuée sont quasiment identiques à ceux de la punaise marbrée. On retrouve donc les mêmes aires de répartition que pour cet autre insecte.

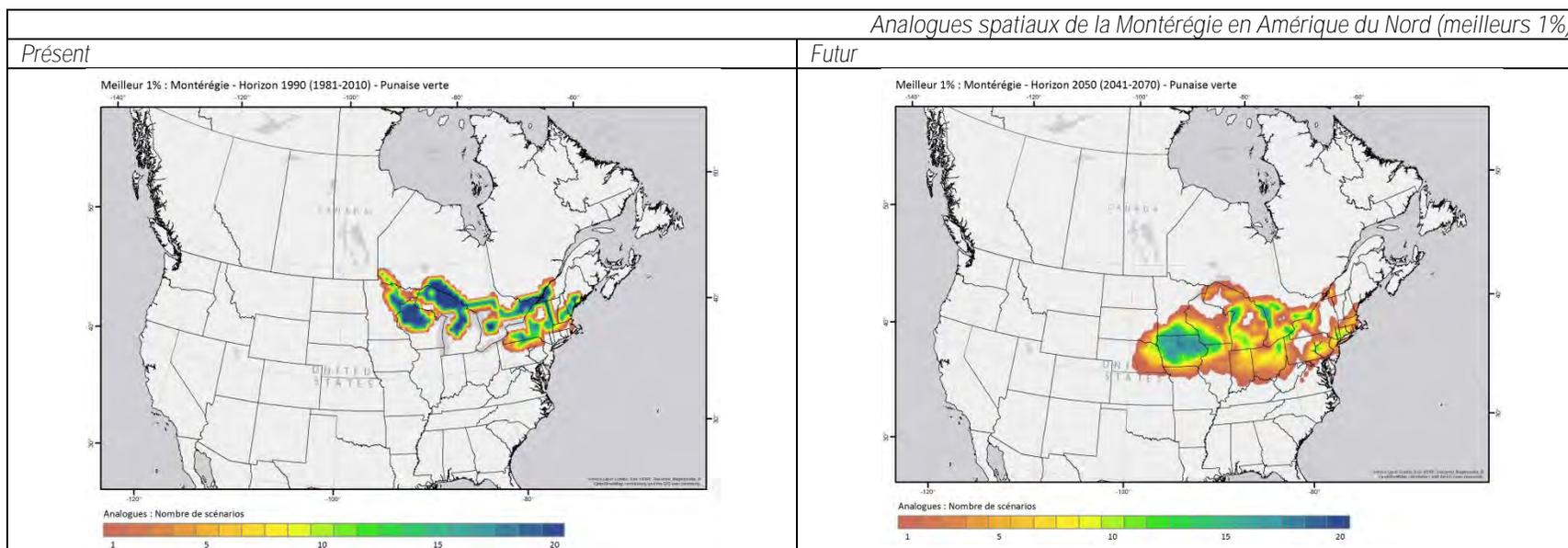


Figure 39 : Analogues spatiaux de la Montérégie pour la punaise verte ponctuée en Amérique du Nord (meilleurs 1%).

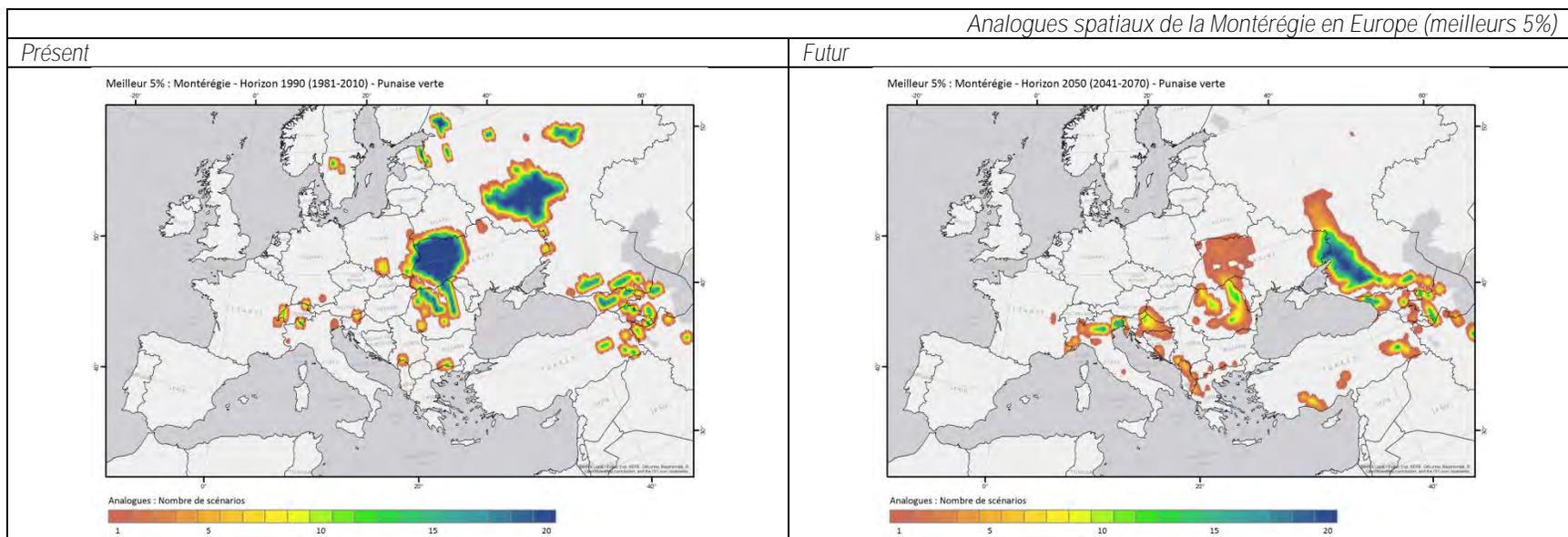


Figure 40 : Analogues spatiaux de la Montérégie pour la punaise verte ponctuée en Europe (meilleurs 5%).

On retrouve également les mêmes analogues spatiaux de la Montérégie pour la punaise verte ponctuée et la punaise marbrée en Europe.

En Asie également, les analogues spatiaux de la Montérégie pour la punaise verte ponctuée sont très semblables à ceux de la punaise marbrée.

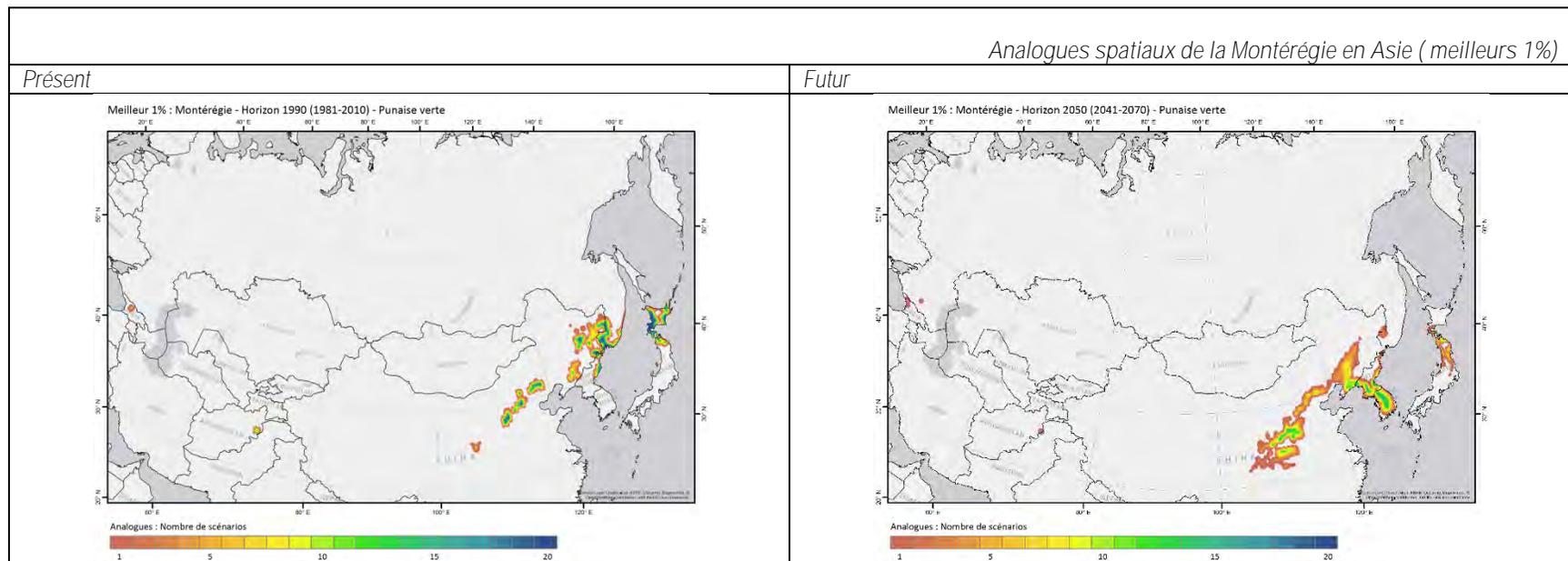


Figure 41 : Analogues spatiaux de la Montérégie pour la punaise verte ponctuée en Asie (meilleurs 1%).

Superficies moyennes ensemencées par type de grande culture et par région analogue

	Pays – États analogues	Superficie en maïs (ha)
États-Unis	Ohio	1 331 417
	Illinois	4 653 889
	Michigan	874 122
	Pennsylvanie	404 686
Asie	Chine	37 123 000
	Corée du Nord	496 390
	Corée du Sud	559 800
Europe	Roumanie	2 438 000
	Italie	990 000
Québec		360 000
	Pays – États analogues	Superficie en soya (ha)
États-Unis	Ohio	1 942 493
	Illinois	4 006 391
	Michigan	870 075
Asie	Chine	9 179 000
Québec		325 000
	Pays – États analogues	Superficie en blé (ha)
États-Unis	Ohio	238 765
	Illinois	226 624
	Michigan	424 812
	Pennsylvanie	93 078
Asie	Japon	213 000
	Chine	24 069 000
Europe	Roumanie	2 071 000
	Italie	1 870 000
Québec*		88 000

* plus précisément la Montérégie

c) *Noctuelle de la tomate*

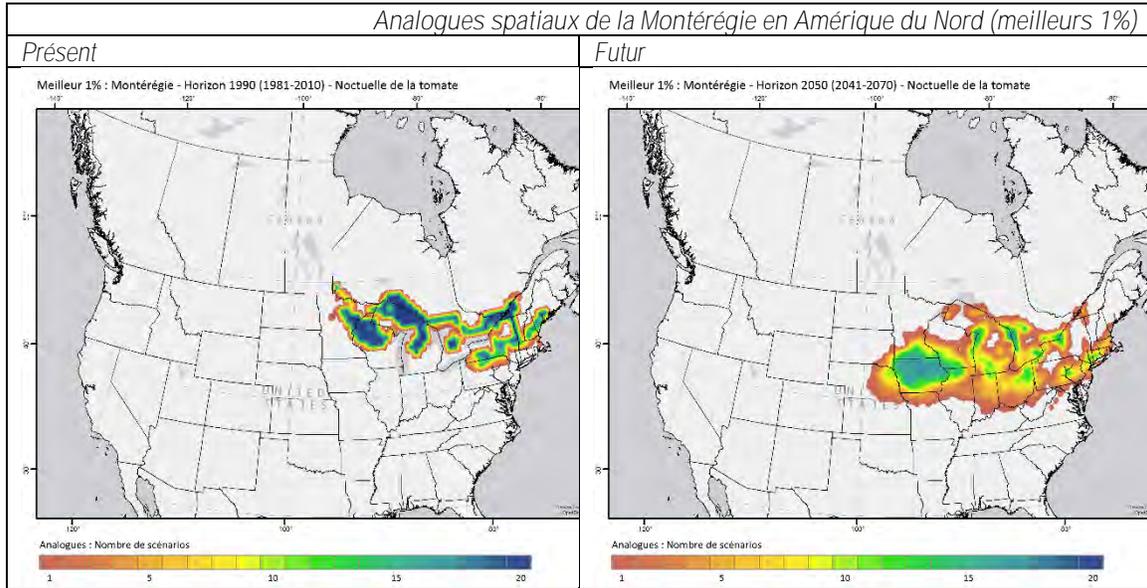


Figure 42 : Analogues spatiaux de la Montérégie pour la noctuelle de la tomate en Amérique du Nord (meilleurs 1%).

Comme pour la punaise marbrée et la punaise verte ponctuée, les analogues spatiaux de la Montérégie en Amérique du Nord pour la noctuelle de la tomate sont quasiment identiques à ceux des deux espèces précédentes.

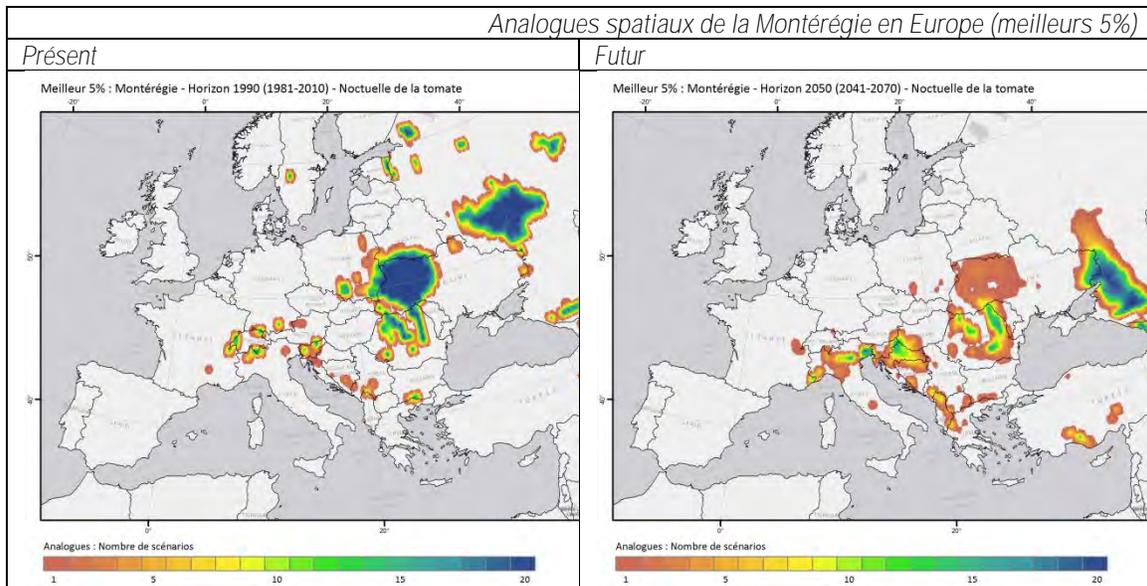


Figure 43 : Analogues spatiaux de la Montérégie pour la noctuelle de la tomate en Europe (meilleurs 5%).

En Europe également, les analogues spatiaux de la Montérégie sont quasiment identiques à ceux de la punaise marbrée et de la punaise verte ponctuée. On pourrait donc retrouver la noctuelle de la tomate dans les mêmes aires de répartition.

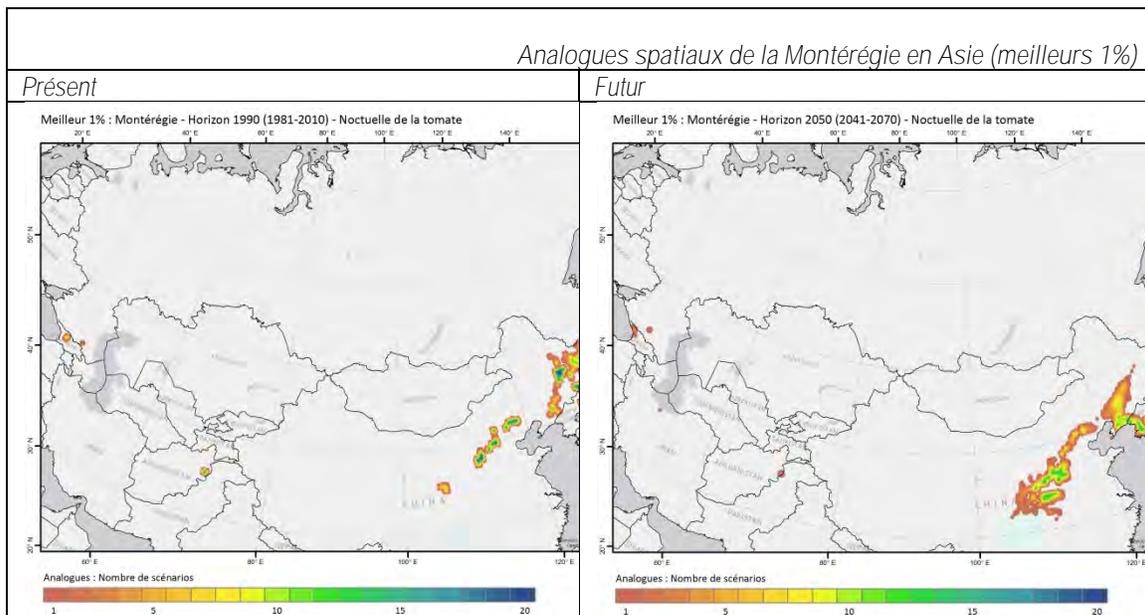


Figure 44 : Analogues spatiaux de la Montérégie pour la noctuelle de la tomate en Asie (meilleurs 1%).

Pour l'Asie, encore une fois, les analogues spatiaux sont quasiment identiques avec ceux des deux espèces de punaises.

Superficies moyennes ensemencées par type de grande culture et par région analogue

	Pays – États analogues	Superficie en maïs (ha)
Asie	Chine	37 123 000
	Corée du Nord	496 390
	Corée du Sud	559 800
Europe	Roumanie	2 438 000
	Italie	990 000
	Ukraine	4 090 000
	France	1 630 000
Québec		360 000
	Pays – États analogues	Superficie en soya (ha)
Asie	Japon	142 000
	Chine	9 179 000
Europe	Ukraine	2 140 000
	France	92 000
Québec		325 000
	Pays – États analogues	Superficie en blé (ha)
Asie	Japon	213 000
	Chine	24 069 000
Europe	Roumanie	2 071 000
	Italie	1 870 000
	Ukraine	7 120 000
	France	5 176 000
*Québec		88 000

* plus précisément la Montérégie

d) *Méligèthe des crucifères*

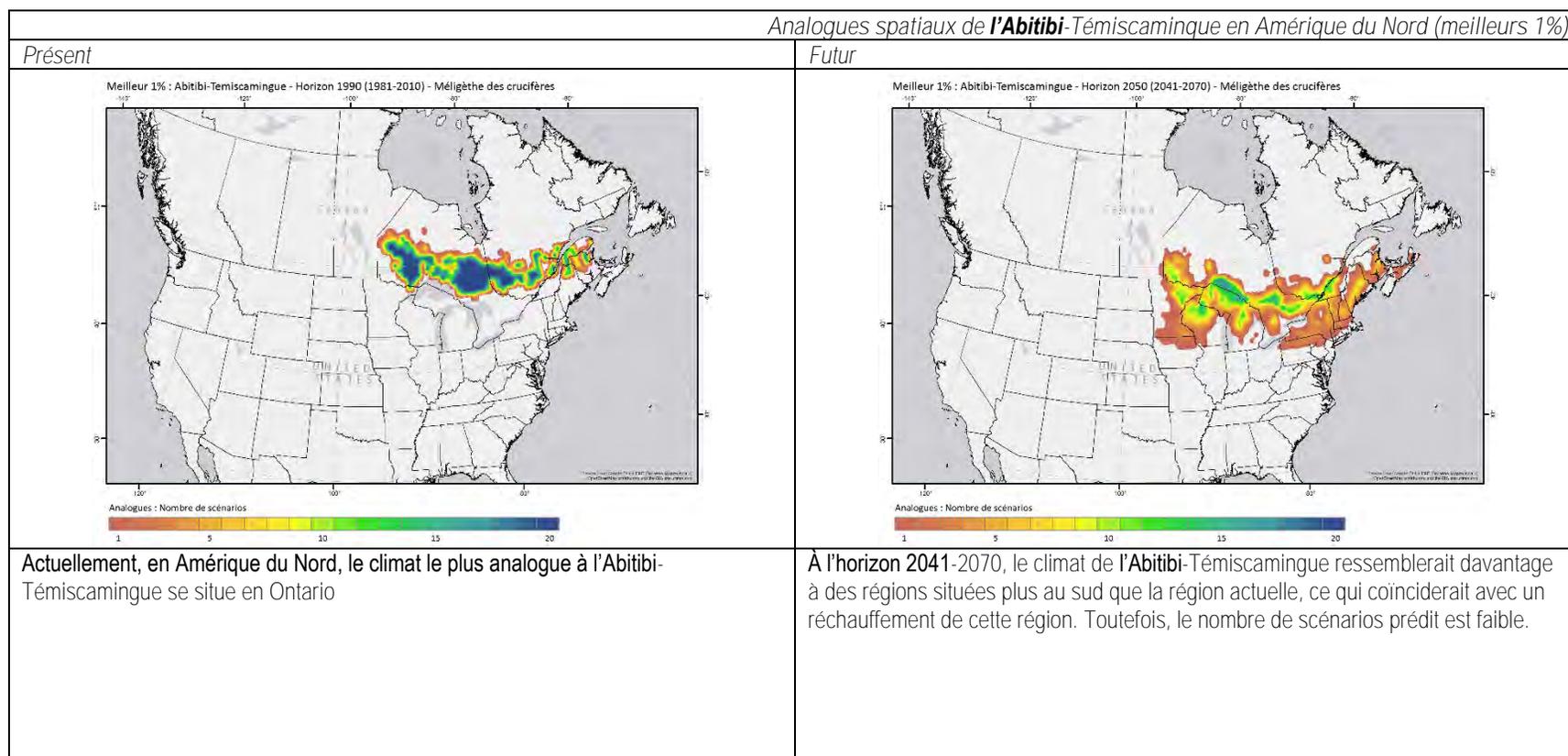


Figure 45 : Analogues spatiaux de l'Abitibi-Témiscamingue pour le méligèthe des crucifères en Amérique du Nord (meilleurs 1%).

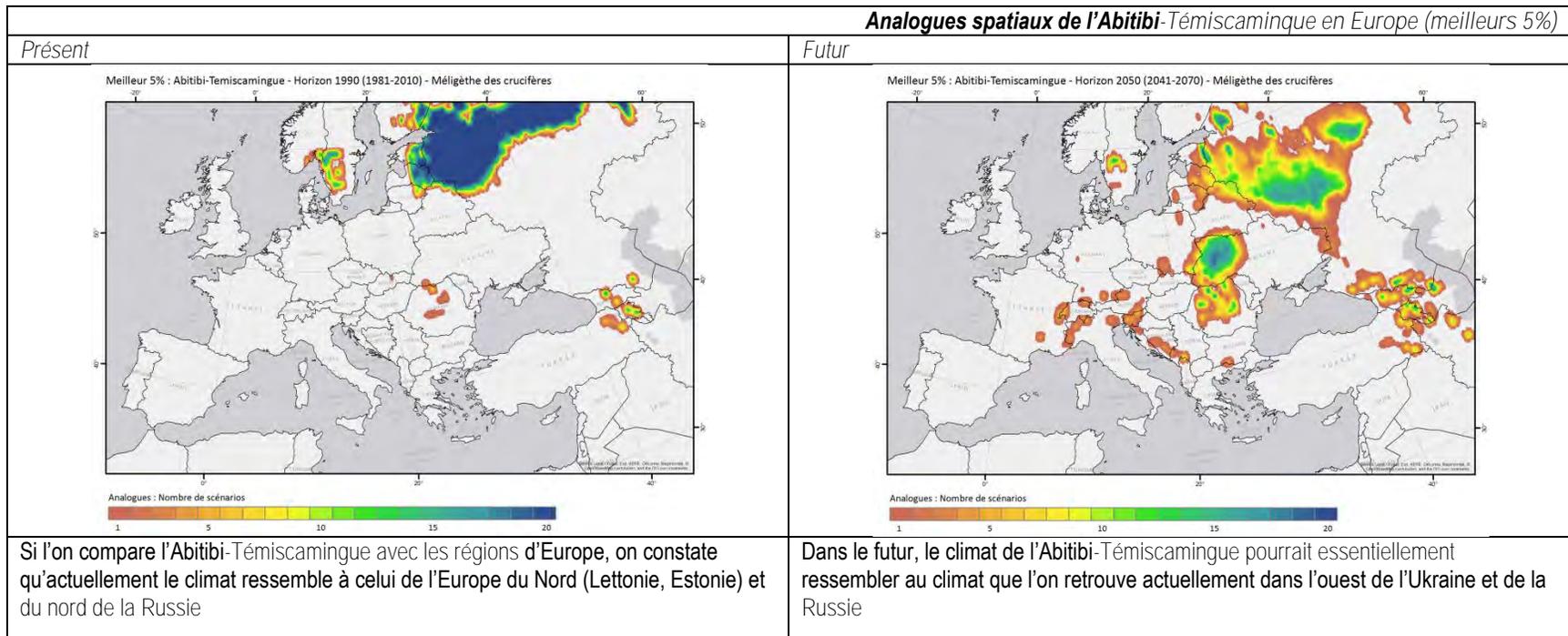
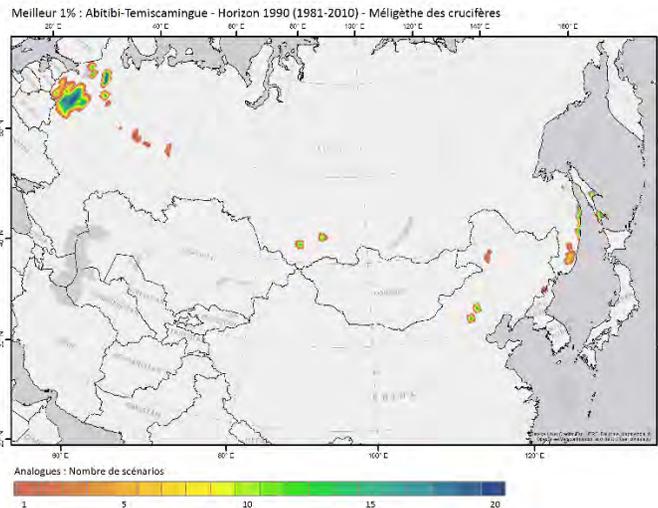


Figure 46 : Analogues spatiaux de l'Abitibi-Témiscamingue pour le mélégièthe des crucifères en Europe (meilleurs 5%).

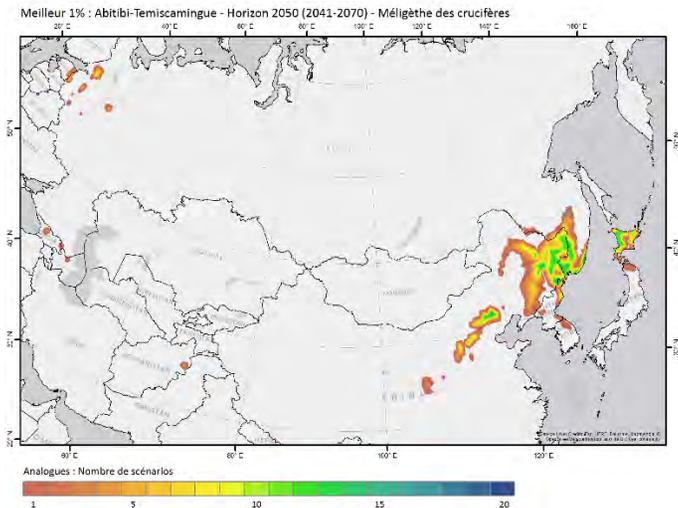
Analogues spatiaux de l'Abitibi-Témiscamingue en Asie (meilleurs 1%)

Présent



Actuellement, on ne retrouve pas ou peu de région en Asie qui ressemble à celui de l'Abitibi-Témiscamingue

Futur

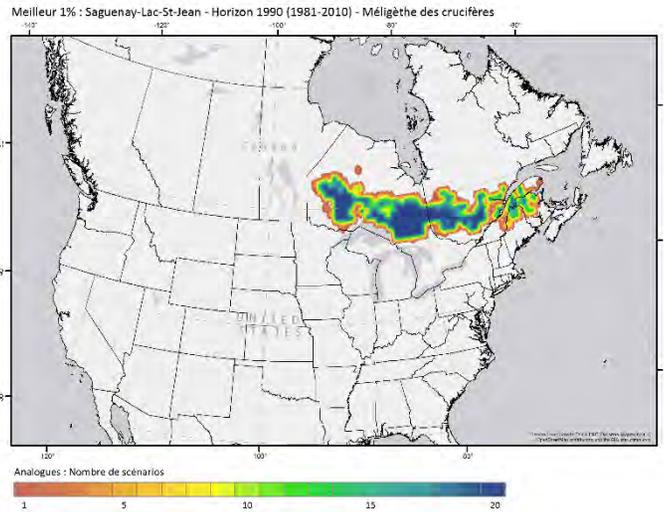


Dans le futur, le climat de l'Abitibi-Témiscamingue pourrait s'apparenter au climat du nord-est de la Chine et de la Corée du Nord.

Figure 47 : Analogues spatiaux de l'Abitibi-Témiscamingue pour le mélégaète des crucifères en Asie (meilleurs 1%).

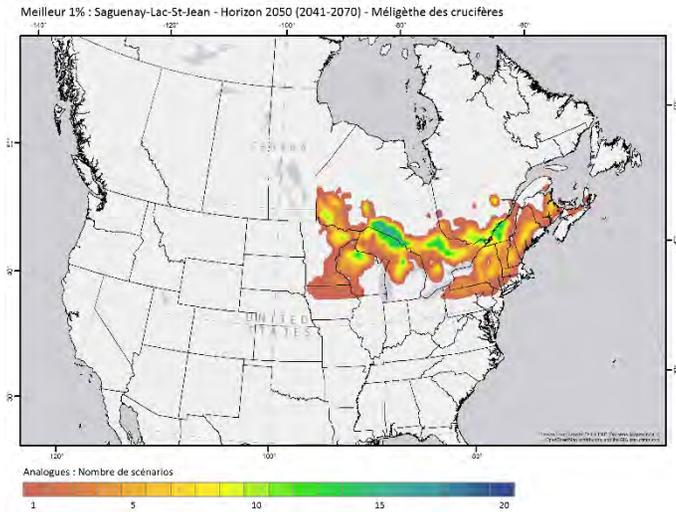
Analogues spatiaux du Saguenay-Lac-St-Jean en Amérique du Nord (meilleurs 1%)

Présent



Comme pour l'Abitibi-Témiscamingue, actuellement en Amérique du Nord, le climat le plus analogue au Saguenay-Lac-St-Jean se situe en Ontario.

Futur

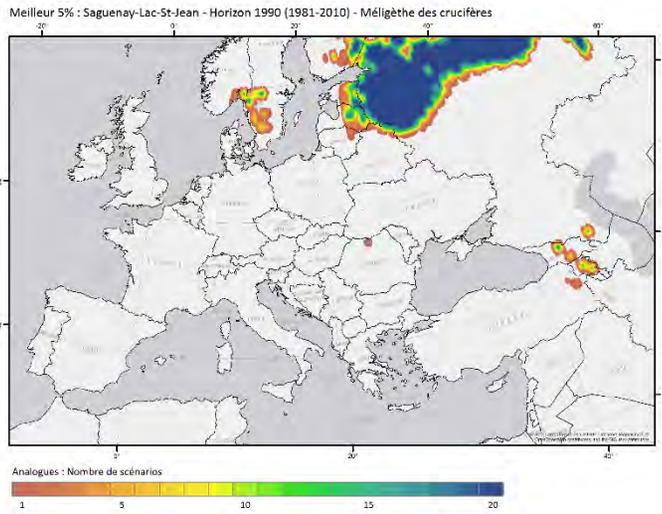


Comme pour l'Abitibi-Témiscamingue, à l'horizon 2041-2070, le climat du Saguenay-Lac-St-Jean ressemblerait davantage à des régions situées plus au sud que la région actuelle. Encore une fois, le nombre de scénarios prédit est faible.

Figure 48 : Analogues spatiaux du Saguenay-Lac-St-Jean pour le mégèthe des crucifères en Amérique du Nord (meilleurs 1%).

Analogues spatiaux du Saguenay-Lac-St-Jean en Europe (meilleurs 5%)

Présent



Futur

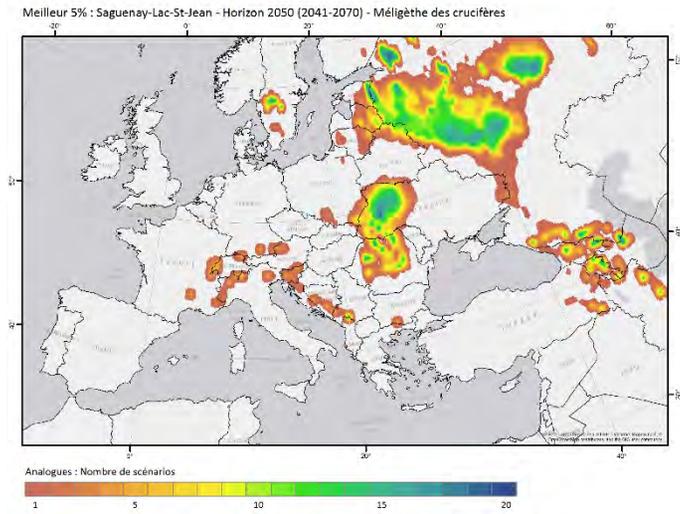
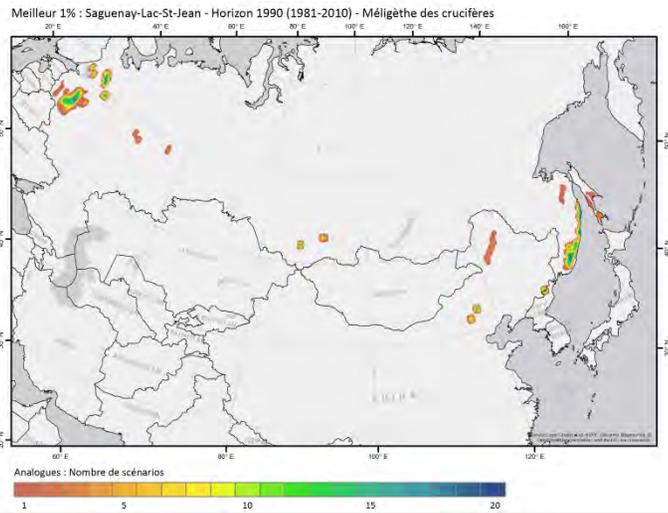


Figure 49 : Analogues spatiaux du Saguenay-Lac-St-Jean pour le mélégithe des crucifères en Europe (meilleurs 5%).

En ce qui concerne l'Europe, aussi bien pour le climat actuel que le climat futur, les analogues spatiaux du Saguenay-Lac-St-Jean sont quasiment identiques à ceux de l'Abitibi-Témiscamingue.

Analogues spatiaux du Saguenay-Lac-St-Jean en Asie (meilleurs 1%)

Présent



Futur

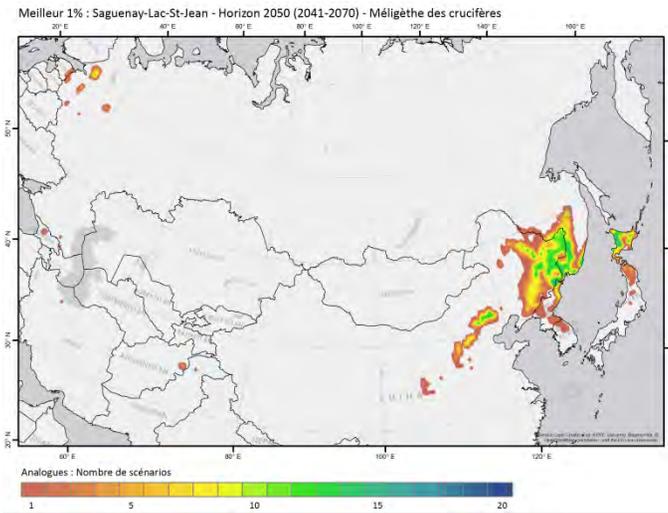


Figure 50 : Analogues spatiaux du Saguenay-Lac-St-Jean pour le mélégièthe des crucifères en Asie (meilleurs 1%).

Il en est de même pour les analogues spatiaux du Saguenay-Lac-St-Jean en Asie. Par conséquent, on peut considérer que les analogues spatiaux actuels et futurs pour l'Abitibi-Témiscamingue et le Saguenay-Lac-Saint-Jean sont identiques.

Superficies moyennes ensemencées par type de grande culture et par région analogue

Le méligèthe des crucifères étant un ravageur du canola, nous n'avons recherché que les superficies de cette culture dans les régions analogues

	Pays – États analogues	Superficie en Colza / canola (ha)
Asie	Chine	7 500 000
Europe	Russie	1 100 000
	Roumanie	410 000
	Ukraine	494 000
	Estonie	80 000
Québec*		12 000

*plus précisément l'Abitibi-Témiscaminque et le Saguenay-Lac-Saint-Jean

Consultation des experts pour identifier des mesures d'adaptation

Les consultations ont été effectuées auprès de plusieurs spécialistes régionaux (30 à 60 par espèce) selon les espèces pour lesquelles des analogues avaient été identifiés. Nous avons reçu un nombre variable de réponses aux sondages réalisés via Survey Monkey (environ 10% des personnes contactées). Malgré le nombre restreint de réponses, les informations ont permis de dresser un portrait des différents ravageurs dans les régions analogues. Pour la rouille asiatique du soya, bien que nous n'ayons pas réalisé les modèles bioclimatiques et que nous n'ayons pas recherché les analogues spatiaux, nous avons tout de même cherché les méthodes de lutte qui existent pour cette culture, en nous focalisant sur les régions où la maladie est actuellement présente. Ces données ont été compilées sous la forme d'un rapport présenté au comité de suivi du projet. Il a ainsi été possible d'acquérir des informations sur la biologie des espèces. Les personnes contactées constatent généralement une hausse des problèmes liés aux ennemis des cultures que nous avons sélectionnés. Ils constatent également des hausses de populations et s'attendent à ce que les changements climatiques entraînent l'élargissement des aires de répartition des différentes espèces ciblées pour les études de cas. Les différents sondages réalisés ont également permis d'identifier différentes techniques de lutte biologiques, mécaniques et chimiques pour lutter contre les cinq ennemis des cultures étudiés. Le contrôle des ennemis des cultures est principalement réalisé via des pesticides chimiques. Toutefois de nombreuses études se tournent vers des méthodes de luttés alternatives basées sur l'utilisation de cultivars plus résistants et le recours à des insectes bénéfiques (parasitoïdes et prédateurs). L'utilisation de filets protecteurs (filets d'exclusion) est l'une des techniques mécaniques qui est souvent mentionnée.

a) Punaise marbrée

Mesures d'adaptation qui pourraient être envisagées

D'après les résultats du sondage effectué dans les régions analogues, la punaise marbrée est considérée comme problématique, voire très problématique. Aux États-Unis, ce sont les arbres fruitiers (pêches-pommes, ...) et les grandes cultures comme le soya et le maïs qui sont affectées par le ravageur. Lorsqu'on se tourne vers l'Europe (Italie) et l'Asie, les dommages sont observés sur les arbres fruitiers comme les pommiers et les cerisiers ainsi que d'autres cultures secondaires. La punaise marbrée attaque énormément de cultures dans ces deux dernières régions et est considérée comme l'ennemi numéro un en Italie. Pour ce qui est de la transmission de maladies par le ravageur aux États-Unis, la question reste encore floue : Kelly Tilmon, professeur en Ohio, explique que des recherches très embryonnaires étudient si la punaise ne pourrait pas transmettre un champignon à la plante lorsqu'elle se nourrit. Cela reste une piste à considérer. En Chine et en Italie, les Paulownias subiraient des dommages importants dus à la punaise marbrée. Le cycle de vie de la punaise est de 1 à 2 générations en Ohio, au nord de l'Italie et au nord de la Chine. Xiao Haijun a indiqué que dans les régions du sud de la Chine il y a de 5 à 6 générations par année. Tous les experts interrogés confirment que l'abondance de la punaise marbrée a récemment augmenté dans leur région.

Il y a plusieurs stratégies de contrôle qui sont mises en place dans les différentes régions. Aux États-Unis, Andrew Michel (Ohio) privilégie le dépistage et lorsqu'un seuil de 4 punaises par 10 coups de filet dans la culture est atteint, un traitement insecticide est recommandé. En Italie, Lara Maistrello préconise l'utilisation d'un filet d'exclusion dans l'arboriculture fruitière puisque les traitements insecticides, par exemple les pyréthrinoïdes, sont peu efficaces dans ce milieu de culture. En Chine, la

gestion de ce ravageur est faite par l'application de traitements insecticides, mais une approche biologique en lien avec des parasitoïdes (*Trissolcus halyomorpha* ou *Trissolcus mitsukurii*) des œufs de la punaise semble prometteuse puisque le taux de parasitisme peut être de 50%.

Les experts consultés s'entendent tous pour dire que les changements climatiques peuvent avoir un impact sur ce ravageur. Ils font le lien entre l'augmentation de la température et celle des populations de punaise marbrée (notamment due à une meilleure survie hivernale), ainsi qu'une dispersion plus au nord si les conditions sont favorables à sa dispersion et son implantation. Également, il est souvent observé, comme chez les coccinelles, la possibilité d'hiverner dans les maisons, ce qui cause des nuisances aux humains et peut favoriser la dispersion de l'espèce.

Surveillance

Pour connaître l'étendue de l'aire de répartition de la punaise marbrée et ses dommages potentiels, et afin de bien prévoir les traitements ou les approches biologiques, il faut tout d'abord surveiller la présence de la punaise marbrée dans différents environnements. Comme leur couleur est similaire à celle des troncs d'arbres et qu'elles se déplacent facilement entre plusieurs habitats; il est important d'avoir une grande distribution de pièges dans le champ. Il est recommandé de poser 6 pièges par 10 acres (Wilson et al. 2017). Il est par exemple recommandé d'avoir 2 pièges dans la culture et 4 dans le périmètre de cette dernière. Il faut effectuer un relevé une fois par semaine (Wilson et al. 2017). Il existe plusieurs types de pièges qui doivent être appariés avec un leurre comme des phéromones d'agrégation et/ou des molécules attractives pour être efficaces. Les pièges peuvent être installés au sol (exemple : les pièges pyramidaux) ou être attachés aux arbres (Wilson et al. 2017). Il est aussi possible d'effectuer de la surveillance active en effectuant des observations visuelles, du battage ou en utilisant un filet-fauchoir pour évaluer la population (Bariselli, 2015). Au Québec, l'insecte est déjà sous surveillance depuis plusieurs années. Le MAPAQ, Agriculture et Agroalimentaire Canada, l'IRDA et la Ville de Montréal ont constitué un réseau qui suit la propagation de la punaise marbrée, en utilisant des pièges à phéromones (type pyramidaux) installés dans différentes cultures et environnements. Le CÉROM est notamment impliqué dans le réseau de surveillance du MAPAQ pour le dépistage dans les grandes cultures, à proximité des champs de maïs sucré et des grands axes routiers. La Ville de Montréal suit également l'évolution de cet insecte qui a été piégé à plusieurs reprises au cours des dernières années. Agriculture et Agroalimentaire Canada (St-Jean-sur-Richelieu) a également mis en place des pièges et a réalisé quelques captures sporadiques en zone forestière et pomicole.

Lutte biologique et mécanique

Lorsque l'hiver arrive, la punaise marbrée se comporte comme la coccinelle asiatique et cherche à entrer dans les maisons et les constructions de bois pour hiverner. Le meilleur moyen de lutter contre cette invasion n'est pas d'appliquer un insecticide puisque c'est inefficace et qu'il n'est pas recommandé d'appliquer ce type de produit dans une maison. Il faut simplement trouver leur point d'entrée et calfeutrer la maison. Il est aussi suggéré d'utiliser un aspirateur pour éliminer les punaises déjà à l'intérieur (Allsup, 2015). Il faut prévoir de tuer les punaises après les avoir aspirées sinon elles pourraient s'échapper.

Le parasitoïde *Trissolcus halyomorphae* est spécifique à *Halyomorpha halys* en Asie. Ce parasitoïde peut détruire jusqu'à 70% des œufs en Chine. Quatre autres espèces de ce genre *Trissolcus* font l'objet de recherche aux États-Unis (Welty, 2012) pour évaluer leur possible utilisation pour lutte contre la punaise

marbrée. Des travaux sont également menés au Canada sur les parasitoïdes de la punaise marbrée. Ce sont notamment les travaux d'Adams et al. (2014) sur le parasitoïde indigène au Québec, *Telenomus podis*. Toutefois ce parasitoïde ne semble pas contrôler la punaise marbrée qui constituerait un « cul-de-sac » évolutif pour cette espèce, c'est-à-dire une stratégie vouée à l'échec puisqu'elle ne permet pas de contrôler l'insecte hôte.

Le tournesol constituerait également une culture-piège permettant d'attirer les punaises et de les éloigner de la culture principale. Le sorgho et le pois pourraient aussi être de bonnes cultures-pièges pour la punaise marbrée (Welty, 2012). Dans plusieurs cultures, souvent celle à hautes valeurs commerciales, des filets d'exclusion sont parfois utilisés pour couvrir les cultures et les protéger de la punaise marbrée (Welty, 2012).

Lutte chimique

L'application d'insecticides est le principal moyen de lutte utilisé par les producteurs. Actuellement, plusieurs matières sont disponibles comme les produits suivants : méthomyl (Lannate), bifenthrin (Bifenture), cyhalothrin (Warrior), fenpropathrin (Danitol), thiamethoxan (Actara), acetamiprid (Assail), clothianidir (Belay), imidacloprid (Admire), beta-cyfluthrin. Les classes associées aux produits sont les néonicotinoïdes et les pyréthri-noïdes (Welty, 2012). Les mélanges, les dosages et les moments d'applications dépendent tous de la situation au champ et de la surveillance qui est faite au courant de la saison. Le recours à ces produits pourrait évoluer en raison des changements actuels de réglementation sur l'usage des pesticides. Pour chacune des matières actives, le tableau ci-dessous rapporte si de l'informations est disponible sur le site SAgE pesticides (pour le Québec) et sur le site de Santé Canada (pour le reste du Canada).

Tableau 10 : Matières actives pouvant être utilisées contre la punaise marbrée et la disponibilité d'informations sur les sites internet de SAgE Pesticides et Santé Canada.

Matière active	Exemple de produits	Information disponible dans SAgE pesticides	Information disponible dans Santé Canada
Méthomyl	LANNATE Toss-N-Go	x	x
Lambda-cyhalothrine	Warrior	x	x
Thiaméthoxame	Actara	x	x
Acétamipride	Assail 70 WP	x	x
Imidaclopride	ADMIRE 70 240	x	X
Beta-cyfluthrin			x
Acéphate	ACECAP 97	x	x

b) Punaise verte ponctuée

Mesures d'adaptation qui pourraient être envisagées

La punaise verte ne semble pas être un problème majeur dans les régions analogues d'après les experts consultés et qui ont répondu au sondage. Alberto Pozzebon (Université de Padova, Italie), affirme que c'est plus son déplacement pour aller hiverner dans les maisons qui cause des soucis. Dépendamment des régions, les cultures qui peuvent être affectées sont le soya, le maïs, le haricot, la tomate, les pommes, les pêches et la vigne. Il n'y a pas vraiment d'informations au sujet de la transmission de maladie aux cultures par le biais de ce ravageur excepté en Roumanie, où Ioana Grozea (Département de biologie de l'université d'agriculture et de sciences) affirme que la punaise verte pourrait transmettre des maladies et particulièrement des champignons aux tomates. Peu importe que ce soit aux États-Unis, en Italie ou en Roumanie, la punaise verte possède au moins une génération par année. En Italie, Gianandrea Salerno (Université de Perugia) affirme que c'est généralement de 2 à 3 générations qui sont observées par année. Les experts n'ont pas observé une augmentation de l'abondance de la punaise verte durant les dernières années, mais un point soulevé par Gianandrea Salerno est que sa présence est souvent associée à celle du soya.

Les stratégies par lesquelles on peut faire la gestion de la punaise verte sont principalement axées sur l'application de traitement chimique. Kelly Estes (Université de l'Illinois) explique qu'en Illinois, c'est l'abondance des scarabées japonais ou de la chrysome des racines du maïs qui dicte les applications de pesticides et que par le fait même on traite de cette façon la punaise verte, présente durant la même période. Une stratégie similaire est adoptée en Italie où l'on traite pour la punaise marbrée qui est invasive et que ces traitements ont indirectement un effet sur la punaise verte. En Roumanie, Ionana Grozea explique qu'il y a une rotation des cultures en plus du contrôle chimique avec par exemple du lambda-cyhalothrin, de l'acétamipride ou de l'imidaclopride. Aucun des experts n'a constaté ou rapporté de résistance aux insecticides pour le moment.

Pour ce qui est des nouvelles technologies, il est fait mention de la potentielle utilisation de filets d'exclusion comme avec la punaise marbrée pour les vergers de fruits en Italie. Le recours à l'utilisation possible de parasitoïdes (*Trissolcus basalus*). La plupart des experts s'entendent pour dire qu'avec les changements climatiques, il y aura une augmentation des populations et du nombre de générations par année.

Lutte biologique

Il a été démontré que le parasitisme des œufs de la punaise verte ponctuée est efficace pour augmenter la mortalité de ceux-ci et que ce bio-contrôle est significatif économiquement (Ehler et al. 2002). Des recherches ont démontré que l'utilisation de parasitoïdes (*Trissolcus basalus*) pour lutter contre les œufs de la punaise verte est une avenue intéressante. *Nezara viridula* a un potentiel de fécondité élevé avec des pontes (masses d'œufs) allant jusqu'à 300 œufs par femelles. Le parasite *Trissolcus basalus* est solitaire et peut parasiter jusqu'à 70% des œufs de la punaise verte, ce qui réduit énormément une population. À noter que *Trissolcus basalus* hiverne au stade adulte et peut donc parasiter les œufs de *Nezara viridula* dès la première génération de la saison (Liljestrom et al. 2014).

Les huiles essentielles ont plusieurs propriétés intéressantes pour lutter contre la punaise verte. Elles possèdent un effet répulsif sur ces insectes, en plus de retarder leur développement et d'influencer négativement leur reproduction : par exemple la fertilité et l'oviposition sont affectées. En ayant

différents modes d’actions sur un insecte, les huiles essentielles réduisent les risques de développement de résistance. De bons résultats ont été obtenus avec l’huile essentielle de thym et d’origan contre la punaise verte (Gonzalez et al. 2011).

La punaise verte ponctuée s’attaque au soya et peut causer des dommages en se nourrissant sur les gousses et grains en développement, ce qui peut réduire le poids du grain et entraîner une diminution de la qualité et du rendement. Des lignées de soya résistantes à cette punaise ont été développées et sélectionnées. Il est donc possible d’y avoir recours pour contrôler les populations de punaises (Campos et al. 2010).

L’utilisation de cultures pièges est une autre méthode qui peut être envisagée pour contrôler la punaise verte. Par exemple pour le soya, il est possible de semer des variétés hâtives autour qui fleurissent avant le reste du champ pour avoir une accumulation du ravageur dans la culture piège et ensuite pouvoir la détruire mécaniquement ou avec un traitement. Le but est de créer un environnement attrayant pour regrouper l’insecte dans une zone déterminée. La fleuraison et la maturité de la culture piège influence le nombre d’insectes qu’on va y retrouver. Rea et al. (2002) ont également mené une expérience afin de tester l’impact de trois cultures pièges (moutarde brune, moutarde blanche et pois) sur cette punaise en Nouvelle-Zélande. Ils ont montré que les cultures pièges attirent plus les punaises que le maïs sucré.

Lutte chimique

L’application de pesticides est aussi une façon de lutter contre la punaise verte. Il existe plusieurs molécules disponibles pour réduire une population. L’idéal est de cibler les masses d’œufs plutôt que le stade adulte de l’insecte pour effectuer les applications de pesticides. Des combinaisons d’insecticides peuvent également permettre de réduire les taux d’émergence chez la punaise verte, comme l’association de *Bifenthrin* et de *Beta-cyfluthrin + Acephate* (Brown et al. 2012). Pour chacune des matières actives, le tableau ci-dessous rapporte si de l’informations est disponible sur le site SAgE pesticides (pour le Québec) et sur le site de Santé Canada (pour le reste du Canada).

Tableau 11 : Matières actives pouvant être utilisées contre la punaise verte ponctuée et la disponibilité d’informations sur les sites internet de SAgE Pesticides et Santé Canada.

Matière active	Produit	Sage pesticides	Santé Canada
Beta-cyfluthrin			x
Acéphate	ACECAP 97	x	x
Bifenthrine	Capture 240 EC		x

c) Noctuelle de la tomate

Mesures d'adaptation qui pourraient être envisagées

La France, la Chine et le Japon figurent parmi les régions analogues de la Montérégie pour la noctuelle de la tomate. Cette dernière semble plus problématique en Chine et au Japon qu'en France où elle est contrôlée avec des traitements (Giovinazzo, comm. pers.). Diverses cultures autres que la tomate sont affectées par ce ravageur. En Chine et au Japon, le soya, le maïs, le blé, le coton, la courge et bien d'autres cultures peuvent être affectés par la noctuelle. En ce qui concerne les pertes de rendements, elles peuvent atteindre 15 à 20% dus à des fruits percés ou pourris à la récolte. Toutefois, un bon contrôle de l'insecte permet maintenir les rendements. En Asie, les réponses sont partagées : Certains constatent une augmentation de l'abondance de la noctuelle de la tomate au cours des dernières années alors que d'autres mentionnent que les stratégies de gestion de la noctuelle de la tomate basées sur l'utilisation de coton *Bt*, ont été efficaces pour diminuer l'abondance de cet insecte. Pour ce qui est du cycle de vie, il y a 4 générations en moyenne dans les régions où l'espèce est actuellement présente selon les personnes ayant répondu au sondage.

Les stratégies de gestion intégrée sont assez diversifiées pour ce ravageur. En France, certains privilégient principalement le contrôle des jeunes stades larvaires avec l'utilisation de *Bacillus thuringiensis*. D'autres utilisent la modélisation de la première et de la deuxième génération pour encadrer les applications de matières actives. En Asie (Chine et Japon), les experts expliquent que la lutte chimique est très commune, mais et que pour certaines cultures l'utilisation de filets d'exclusions est plus courante qu'auparavant.

En ce qui concerne les cas de résistances aux insecticides, plusieurs cas ont été rapportés, notamment en France, vers la fin des années 1980 et début 1990 avec le *méthomyl*. En Chine, l'insecte a développé des résistances à la technologie *Bt* et aux *pyrethroides* dans les années 1980. Actuellement, les *diamines* semblent être efficaces et la noctuelle de la tomate n'y aurait pas encore développé de résistance. La noctuelle de la tomate serait aussi devenue résistante à certains insecticides comme le *chlorfenapyr* et le *flufenoxuron* dans certaines régions.

Parmi les technologies innovantes utilisées pour dépister et suivre les populations de noctuelles de la tomate, les pièges automatisés sont mentionnés. Cela permettrait notamment de pouvoir effectuer de la modélisation afin d'anticiper les futurs pics de populations et les différentes générations. Tous les répondants au sondage s'accordent pour dire que les changements climatiques pourraient avoir un impact sur ce ravageur, notamment en favorisant le développement des nymphes jusqu'au stade de pupe avant l'hiver.

Surveillance

Les populations de la noctuelle de la tomate sont dépendantes des facteurs météorologiques. Il est donc suggéré d'installer des pièges à phéromones et de coupler les pics d'abondance et de capture avec les données météorologiques pour établir une corrélation entre certains facteurs météo comme l'humidité, la température maximale et minimale, le nombre d'heures d'ensoleillement et l'abondance de la noctuelle de la tomate. Cette technique est utile pour la surveillance du ravageur et pour aider à la prise de décision concernant l'application de traitements insecticides pour contrôler la noctuelle de la tomate, uniquement lorsque des seuils de dommages économiquement significatifs sont atteints

(Sonkar et al, 2011). Cela évite des traitements insecticides inutiles effectués aux mauvais moments et permet de réduire également les risques de développement d'une résistance aux insecticides.

Lutte biologique et mécanique

La bactérie *Bacillus thuringiensis* produit les protéines *Cry* et *Cyt* qui sont toxiques pour certains types d'insectes. Ces protéines ont longtemps été utilisées comme insecticide biologique pour vaporiser les champs. La toxine *Cry* a déjà été utilisée pour modifier génétiquement des plantes et les rendre résistantes à certains insectes. Des essais en laboratoire ont démontré que le gène *Cry2* est toxique pour les larves de *H. armigera* (Saleem et Shakoori 2017). Ceci ouvre les portes à la production de cultures résistantes à la noctuelle de la tomate.

La possibilité d'attirer la noctuelle de la tomate dans une culture différente que celle d'intérêt a été évaluée. Par exemple, la noctuelle semblerait avoir une préférence pour l'œillet d'inde, suivi de la coriandre et en dernier lieu la tomate pour effectuer ses pontes (Sandhu et Arora 2014). Le recours à des cultures pièges, comme déjà indiqué dans les études de cas sur les punaises, constitue un moyen de gestion intéressant puisqu'en attirant le ravageur dans une autre culture il est possible alors de détruire mécaniquement la culture ou de lui appliquer un traitement insecticide pour diminuer la population de ravageurs sans affecter directement à la culture d'intérêt.

Une bonne gestion des résidus de cultures et l'élimination de matériel végétal contaminé permettent de contrôler les populations de noctuelles. Une rotation des cultures sur au moins 3 ans (avec des plantes non-hôtes) dans un champ où il y a eu contamination favorise le contrôle des populations. L'utilisation d'un insecticide à base d'huile de neem est également suggérée. Cette huile agit sur les insectes par contact donc lorsque la larve est rentrée à l'intérieur du fruit, elle est à l'abri des traitements il faut donc inspecter régulièrement la culture pour appliquer le traitement au bon moment.

Lutte chimique

L'utilisation de pesticides est une autre façon de lutter contre la noctuelle de la tomate. Il existe plusieurs types d'insecticides pour contrôler ce ravageur dont : le lambda-cyhalothrin 5 EC (pyréthrinéoïde), le clothianidin (néonicotinoïde) ou le quinalphos (organophosphate) pour le stade adulte et l'indoxacarb (oxadiazine) pour le stade larvaire (Lekha, 2016). Pour chacune des matières actives, le tableau ci-dessous rapporte si de l'informations est disponible sur le site SAgE pesticides (pour le Québec) et sur le site de Santé Canada (pour le reste du Canada).

Tableau 12 : Matières actives pouvant être utilisées contre la noctuelle de la tomate et la disponibilité d'informations sur les sites internet de SAgE Pesticides et Santé Canada.

Matière active	Produit	Sage pesticides	Santé Canada
Clothianidine	NIPSIT INSIDE 600	x	x
Lambda-cyhalothrine	Warrior	x	x

d) *Méligèthe des crucifères*

Mesures d'adaptation qui pourraient être envisagées

D'après le sondage auquel les experts consultés ont répondu, le méligèthe du colza *Brassicogethes aeneus* est l'espèce prédominante et problématique dans les régions analogues, alors que le méligèthe des crucifères (*Meligethes viridescens*) est peu présent. Les cultures affectées par ce ravageur sont le colza ainsi que la moutarde des champs et d'autres crucifères. Luule Metspalu (Estonie), mentionne que l'espèce est indigène dans son pays. Pour ce qui est du cycle de vie du méligèthe en Estonie, Eve Veromann (Estonie), explique que la génération apparaît au printemps et cause des dommages aux boutons floraux pour le colza d'hiver c'est à la mi-mai et pour le colza de printemps à la mi-juin. En général le colza d'hiver passe le stade critique avant l'arrivée du méligèthe, mais cela dépend de la météo dit-elle. L'abondance du méligèthe n'a pas augmenté récemment dans leur région.

L'utilisation d'insecticides est la méthode communément employée par les producteurs pour le contrôle du méligèthe du colza, d'après Eve Veromann. Par contre, des populations de la source *B. aeneus* résistantes aux insecticides ont été observées. Une autre alternative nous est indiquée par Luule Metspalu, c'est de faire une rotation des cultures aux 4 ans, avant de ressemer du colza dans le même champ. Pour ce qui est des stratégies prometteuses pour la surveillance de ce ravageur, les experts ont mentionné l'utilisation des pièges aux champs pour faire un suivi des populations.

Les deux experts consultés sont d'accord pour dire que les changements climatiques peuvent avoir un impact sur ce ravageur. Eve Veromann a mentionné qu'en 2017, il y a eu une période chaude de 3 semaines en janvier qui a fait fondre la neige; s'en est suivi une période très froide qui d'après elle doit avoir affecté la population hivernale puisque durant l'année, ils n'ont pas eu à traiter contrairement à d'habitude. Elle mentionne également que le colza d'hiver n'était jamais traité il y a 5 ans, mais que maintenant, des insecticides doivent être utilisés puisque leurs hivers sont plus doux et la mortalité des insectes hivernant est en baisse.

Surveillance

L'institut de recherche de l'agriculture biologique en Suisse propose de déterminer un seuil d'intervention pour mieux gérer ce ravageur. Effectuer un dépistage à l'aide d'un filet fauchoir et un comptage des insectes sur plusieurs plants est une méthode efficace pour évaluer l'état de la population, comme cela est actuellement réalisé au Québec, dans le cadre du RAP Grandes cultures. Il faut cependant prendre en considération le stade de développement de la plante puisque le seuil augmente avec le stade. Des mesures préventives sont aussi possibles pour diminuer les dégâts que peuvent causer les méligèthes.

Lutte biologique et mécanique

La création de bonnes conditions de croissance est cruciale pour une implantation rapide de la culture. Puisque les méligèthes migrent dans les champs depuis les bordures vers le centre du champ, avoir de grandes parcelles évite d'avoir une trop grande dissémination de l'insecte à l'intérieur de celles-ci. Pour une bonne gestion de ce ravageur, il est aussi possible d'implanter une bande de la culture d'intérêt avec une floraison plus hâtive autour du champ. Cela peut permettre d'attirer les insectes dans ce secteur plus tôt et permet de réduire la population dans les parcelles. D'un autre côté, la sélection de variétés très hâtives est aussi une avenue intéressante parce qu'elles peuvent avoir dépassé le stade

critique de développement (boutons floraux) d'attaque avant même que le méligèthe soit présent dans le champ (FiBL, 2009).

Ce même institut présente également des expériences et recherches innovatrices. Par exemple : l'utilisation de la poudre de roche du Napf et celle du Klinospray sur les plantes pour les protéger des insectes jusqu'à l'ouverture des boutons floraux. Également l'utilisation d'huile essentielle de lavande pour repousser les femelles de méligèthes, un essai a été réalisé à l'Agroscope ART Reckenholz. Des essais faits à Rothamsed (Royaume-Uni) démontrent que certaines variétés de colza contiennent moins d'alkenyl-glucosinolates, ce qui est moins attirant pour le méligèthe. Lors de dégâts mécaniques faits aux feuilles, une molécule (isothiocyanates) se dégage du composé d'alkenyl-glucosinolates et cette molécule attire les femelles.

Certaines cultures-pièges peuvent aussi affecter le développement de l'insecte et réduire sa survie. Des cultures-pièges pourraient être utilisées pour le méligèthe des crucifères pour réduire les infestations au champ et empêcher son développement. La composition chimique de la plante piège est essentielle. Une étude a démontré que le radis chinois représente une moins bonne source de nutrition pour la larve du méligèthe, ce qui a pour effet d'avoir un impact sur les hormones de croissance et peut causer la mort des larves au moment de la mue (Veromann, 2014).

En Europe, le méligèthe est la cible de plusieurs ennemis naturels, dont des parasitoïdes (*Tersilochus heterocerus*, *Phradis interstitialis*, *P. morionellus* et *Diospillus capito*), des nématodes (*Steinernema bicornutum*, *S. feltiae*, *S. carpocapsae* et *Heterorhabditis bacteriophora*), de pathogènes (*B. bassiana*, *Metarhizium anisopliae*) et des prédateurs. Toutefois, aucun parasitoïde n'a encore été observé au Québec. Les prédateurs (ex. : coccinelles), peuvent s'alimenter des larves de méligèthe présentes à l'intérieur des fleurs ou des boutons floraux, mais la prédation est très faible (RAP Grandes cultures 2017 – Fiche technique sur le Méligèthe des crucifères, Gagnon Marie-Eve 2017 – Mémoire de maîtrise). Il serait éventuellement possible d'introduire des parasitoïdes européens pour lutter contre le méligèthe.

Lutte chimique

Actuellement, il n'existe aucun insecticide homologué au Canada contre le méligèthe des crucifères. En Europe, la lutte peut également être faite à l'aide de traitements chimiques. Il est important de noter une résistance aux insecticides pyrèthrinoides dans le cas du méligèthe. La recommandation est donc de traiter seulement si nécessaire avec des néonicotinoïdes, des indoxacarbes ou des pymétozines (HGCA publications, 2011). Toutefois, au Québec la nouvelle réglementation sur l'utilisation de néonicotinoïdes nécessite d'être vigilants quant à l'utilisation de ces produits et nécessite une justification agronomique. Pour chacune des matières actives, le tableau ci-dessous rapporte si de l'informations est disponible sur le site SAgE pesticides (pour le Québec) et sur le site de Santé Canada (pour le reste du Canada).

Tableau 13 : Matières actives pouvant être utilisées contre le méligèthe des crucifères et la disponibilité d'informations sur les sites internet de SAgE Pesticides et Santé Canada.

Matière active	Produit	Sage pesticides	Santé Canada
Clothianidine	NIPSIT INSIDE 600	x	x
Pymétozine	Endeavor 50 wg	x	x
	FullFill 50 wg	x	x

e) *Rouille asiatique du soya*

Mesures d'adaptation qui pourraient être envisagées pour la

La rouille asiatique du soya causée par le champignon pathogène *Phakopsora pachyrhizi*; il existe aussi d'autres souches de rouille du soya par exemple *Phakopsora meibomia*. Aux États-Unis, c'est la souche *P. pachyrhizi* qui est présente ; c'est également le cas en Afrique du Sud et en Tanzanie. Au Brésil, on trouve par contre deux sources de la rouille du soya. Pour ce qui est des pertes de rendement, John Rupe (Arkansas) mentionne qu'il n'y a eu des dommages qu'une fois en 12 ans. Harun Murithi (Tanzanie) donne des chiffres plus élevés : par exemple 18-55% de perte en Uganda et jusqu'à 90% au Zimbabwe. Au Brésil, Claudia Vieira Godoy explique que c'est la maladie la plus importante au Brésil et que les pertes sont évitées avec l'application de fongicide : par exemple du groupe SDHI (Succinate Dehydrogenase Inhibitors) comme le *fluxapyroxad* et le *pyraclostrobin* qui inhibe une enzyme intervenant dans la respiration des cellules. Pour ce qui est de l'augmentation de la distribution de la rouille, Harun Murithi mentionne une augmentation de la propagation dans les régions productrices de soya en Éthiopie. Contrairement aux États-Unis, où la distribution n'a pas augmenté d'après les experts qui ont répondu au sondage.

Pour le cycle de vie et l'épidémiologie de la rouille asiatique du soya, Martin Draper (Kansas) explique que le nord des états qui bordent le Golfe du Mexique n'héberge pas les populations hivernales et que chaque année le pathogène doit être introduit et que cela dépend des autres régions avoisinantes d'hivernation du pathogène qui passe l'hiver sur sa plante hôte, le kudzu. Neal McLaren mentionne qu'en Afrique du Sud, le pathogène passe l'hiver dans les régions les plus chaudes de la côte sur le kudzu ; la propagation de la maladie sur cette plante dépend de la pluie, du développement de la plante et de l'escarpement. Claudia Vieira Godoy indique qu'au Brésil, il y a une période sans soya d'environ 90 jours pour réduire l'inoculum entre les saisons de croissance. Les épidémies sont fréquentes lorsqu'il y a de la pluie dans la saison.

Actuellement, les producteurs luttent contre la maladie de plusieurs façons. Jim Dunphy (Caroline du Nord) signale que les producteurs traitent seulement s'il y a confirmation de la présence de la rouille dans les 100 miles autour. Ils vont alors appliquer un fongicide habituellement du groupe des inhibiteurs de la déméthylation (triazole) une ou deux fois. Le même type de fongicide est utilisé en Afrique du Sud, mais de manière préventive et pouvant aller jusqu'à trois traitements durant la saison de croissance. Au Brésil, on privilégie les variétés hâtives semées tôt dans la saison pour échapper à la maladie mentionne Claudie Vieira Godoy. Les experts expliquent qu'il y a en moyenne 2 à 3 applications de fongicide sauf au Brésil où le nombre d'applications varie en fonction de la période de semis : plus le semis est tôt moins il y a d'applications. C'est également au Brésil qu'une résistance aux fongicides a été mentionnée en 2001. Une diminution de l'efficacité de fongicides inhibiteurs de déméthylation (DMI) a été observée. Donc un mélange de DMI et de QoI (fongicides unisites qui affectent les complexes mitochondriaux) est recommandé pour le moment.

Caspar Langenbach (Université d'Aachen) explique qu'en termes de technologies prometteuses on cherche à développer des variétés génétiquement résistantes particulièrement une manipulation génétique pour allonger la protection avec une dispersion de la pluie plus rapide sur les feuilles. Fernando Cezar Juliatti de son côté parle des utilisations de fongicides multi-sites (qui ont plusieurs

modes d'action) ainsi que des variétés génétiquement modifiées. Le dépistage au champ est la technique la plus recommandée pour effectuer une surveillance de la dispersion de ce pathogène. Tous les répondants s'entendent pour dire que les changements climatiques peuvent avoir un impact sur cette maladie. En particulier l'augmentation des régions de propagation si la rouille hiverne plus au nord (si hiver plus doux) et les pics d'abondance qui pourraient être plus fréquents lors d'une même saison.

Surveillance et autres méthodes de lutte contre la rouille asiatique du soya

Pour effectuer un contrôle durable et économiquement viable de la rouille asiatique du soya, la sélection génétique est préconisée. Travailler avec des variétés qui sont résistantes à cette maladie pourrait réduire le coût des traitements au champ et éviter le développement d'une résistance aux fongicides à long terme. Il existe une variété (PI 587855) avec un phénotype résistant et il s'avère que la résistance à la rouille asiatique du soya serait conférée par un seul gène dominant (Yamanaka et al. 2016). L'identifiant d'autres gènes de résistance permettrait de développer de nouvelles lignées de soya résistantes à la maladie.

Les épidémies les plus intenses de la rouille asiatique du soya se produisent lors de saisons avec des températures élevées et avec beaucoup de précipitations (Del Ponte, 2006). Il est possible de réaliser des modèles prédictifs basés sur les conditions météorologiques. Del Ponte et al. (2006) ont réalisé 4 modèles pour faire une évaluation quantitative des risques pour prédire la sévérité de la maladie. Ces modèles peuvent être combinés avec d'autres outils de surveillance (dépistage, cartographie) pour mettre en place des moyens de lutte.

La lutte chimique est la plus documentée pour contrôler la rouille asiatique du soya. Les fongicides les plus utilisés sont les DMI et les QoI. Les DMI (inhibiteur de déméthylation) inhibent la synthèse de molécules essentielles aux membranes cellulaires fongiques et les QoI (famille des strobilurines) inhibent une réaction chimique de la chaîne respiratoire mitochondrienne ce qui empêche la germination des spores (Langenbach et al, 2016). Une autre classe de fongicide est maintenant utilisée pour lutter contre la rouille est c'est celle des SDHI (succinate dehydrogenase inhibitor). Les SDHI inhibent une enzyme intervenant dans la respiration cellulaire spores (Langenbach et al, 2016). Il est important de noter que le grand nombre de spores produites par *P. pachyrhizi* le rend facilement insensible aux fongicides. Pour chacune des matières actives, le tableau ci-dessous rapporte si de l'informations est disponible sur le site SAgE pesticides (pour le Québec) et sur le site de Santé Canada (pour le reste du Canada).

Tableau 14 : Matières actives pouvant être utilisées contre la rouille asiatique du soya et la disponibilité d'informations sur les sites internet de SAgE Pesticides et Santé Canada.

Matière active	Produit	Sage pesticides	Santé Canada
Azoxystrobine Difénoconazole	Quadris top	x	x
Penthiopyrade	Velista	x	x

6. Analyse et discussion

Il a été choisi de réaliser cinq études de cas dans le cadre de ce projet. Toutes les étapes du projet n'ont pu être réalisées pour chacun des cas étudiés. On constate que les insectes qui ont un fort potentiel de causer des dommages aux cultures présentent un plus grand intérêt et sont beaucoup mieux documentés, comme c'est le cas pour la punaise marbrée. Il existe peu de documents sur certains insectes et maladies comme le méligèthe des crucifères et la rouille du soya par exemple. Pour certaines espèces, des études de laboratoire et sur le terrain ont permis d'acquérir des données sur leur biologie et leur développement. Cela facilite le travail de modélisation et permet donc de faire des recherches plus approfondies et plus justes pour finalement envisager de façon plus certaine le devenir de ces ennemis des cultures.

Selon les données actuelles, on constate toutefois que pour les espèces qui ont pu être modélisées (punaise marbrée, punaise verte ponctuée et noctuelle de la tomate), il y a un fort potentiel d'établissement à l'horizon 2041-2070. La plupart des espèces étudiées pourraient s'établir de façon permanente dans le sud du Québec (Montérégie et autour du Fleuve St Laurent). La hausse des températures favoriserait la croissance des insectes qui pourraient compléter leur cycle de développement au Québec, alors qu'ils ne pourraient pas le faire dans les conditions actuelles. De plus, certaines espèces pourraient avoir plusieurs générations par année, ce qui augmenterait les dommages sur les cultures dus à leur exposition pendant de plus longues périodes aux ravageurs. Les cultures pourraient aussi être soumises à la pression de plusieurs nouveaux ennemis pendant leur période de vulnérabilité. Cela aura sans nul doute un impact sur la phytoprotection. L'insecte qui a le plus grand potentiel d'établissement et qui pourrait causer d'importants dommages aux cultures est la punaise marbrée. Si on compare les informations publiées suite aux précédents travaux concernant cet insecte, on constate que les nouvelles modélisations réalisées au cours de ce projet, basées sur des données plus récentes de distribution ont permis de raffiner les informations. En 2017, la capture de nymphes et d'adultes dans la ville de Montréal suggérerait qu'il existe une population établie dans celle-ci. Cela est le début de la possible expansion de l'aire de répartition de cette espèce au Québec. En 2015, la punaise marbrée n'avait été piégée que de façon sporadique. Toutefois, son statut a changé depuis 2016, puisque des nymphes et des adultes sont aujourd'hui retrouvés annuellement à Montréal (Chouinard et al. 2018) et que sa présence a aussi été observée dans des campings, des vergers et dans un champ de maïs situé à Saint-Mathieu-de-Beloil en 2018 (données non publiées). Même si les captures sont rares, la punaise marbrée est probablement plus présente sur le territoire québécois qu'on ne le pense. La vigilance sera donc de mise dans les prochaines années pour cet insecte. Divers réseaux de dépistage existent au Québec (Agriculture et Agroalimentaire Canada, MAPAQ, Ville de Montréal) et des pièges sont installés chaque année dans différents milieux (urbain et agricoles) et à proximité des grands axes routiers. L'insectarium de Montréal effectue des identifications de punaises collectées par les citoyens. Afin de suivre cet insecte et sa progression dans les différents milieux, il conviendrait d'accroître sa surveillance en augmentant le réseau de dépistage à travers la province et en facilitant l'acquisition de données de captures grâce à des outils tels que des applications numériques impliquant la participation citoyenne.

Des adaptations aux changements climatiques en agriculture pour lutter contre les insectes et les maladies sont possibles si on assiste à l'introduction et/ou l'expansion de certains ennemis. La biosurveillance est la première étape pour s'adapter aux changements climatiques. Les réseaux de dépistage ont toute leur importance dans le suivi des phytoravageurs et les méthodes de dépistages

devront tendre à être modernisées, avec un meilleur réseautage et une meilleure veille sur ce qui se passe dans les provinces et états voisins. Il faudra toutefois pouvoir être réactifs rapidement si l'on souhaite limiter leur progression et protéger les cultures. Une bonne connaissance de ces nouveaux phytoravageurs (biologie, méthodes de lutte) permet justement d'être plus réactif.

7. Conclusion et recommandations

Un tel projet ne permet pas de réaliser un trop grand nombre d'études de cas et l'objectif de celui-ci était d'en réaliser cinq. Malheureusement sur les cinq espèces sélectionnées, trois cas seulement (punaise marbrée, punaise ont pu être traités complètement. Pour les deux autres cas (Mélégèthe des crucifères et rouille asiatique du soya), il manquait d'informations pour pouvoir effectuer les modélisations et/ou réaliser des cartes de distribution future. Toutefois, cela n'a pas empêché de poursuivre le projet, et de compiler des informations concernant ces espèces seront incomplètes. Le choix des espèces pour l'étude de cas pourrait être mieux défini afin de compléter tous les sous-objectifs du projet, notamment celui sur la modélisation des espèces. Une sélection judicieuse préalable effectuée au début du projet aurait permis de savoir si nous avions suffisamment de données pour traiter tous les cas sélectionnés. D'autres espèces auraient pu être choisies pour ce projet et nous aurions pu avoir peut-être de meilleurs résultats. Malheureusement, il n'est pas toujours évident de savoir en début de projet s'il existe suffisamment de données pour sélectionner tous les paramètres nécessaires pour effectuer les modélisations bioclimatiques des insectes et des maladies. C'est souvent quand le projet a débuté que l'on constate que l'on ne dispose pas de tous ces paramètres. Il faudrait donc prévoir des analyses de faisabilité plus exhaustives avant de se lancer dans des modélisations bioclimatiques. C'est pourquoi au cours de ce projet il avait aussi été décidé d'actualiser les modèles pour la fusariose du blé puisque nous n'avions pas suffisamment de données pour la rouille du soya. Cela a été réalisé dans le cadre d'un autre projet Prime-Vert.

Il y a sûrement plusieurs autres ravageurs qui auraient pu être étudiés dans ce projet, mais les contraintes de temps et de disponibilités de données ne permettent pas de traiter un grand nombre de ravageurs. Plusieurs insectes migrent chaque année des États-Unis vers le Québec. Ces insectes qui sont souvent dommageables pour les cultures ont dû être exclus de notre sélection, car leur arrivée au Québec dépend essentiellement de la direction des vents. Ce facteur climatique n'est pas très bien modélisable pour le moment. Il serait bon d'intégrer ces facteurs (direction et force des vents) ainsi que l'impact d'évènements climatiques extrêmes (tornades, pluie, grêle ...) dans ce type de projets. Parmi les insectes ravageurs et migrants sur lesquels il serait bon de se questionner on peut citer les exemples de la légionnaire uniponctué (lépidoptère), du puceron du soya (hémiptère) et les vers-gris (notamment le ver-gris occidental du haricot) (lépidoptères). De plus, il reste encore beaucoup à faire pour développer des modèles pour les maladies. Il faudrait peut-être envisager de réaliser des modèles plus génériques qui puissent être adaptés à plusieurs maladies en tenant compte de facteurs communs à toutes les maladies fongiques.

Les analyses et modélisations qui ont été réalisées sont basées sur les données actuellement disponibles et sur une période de référence 1981-2010. Elles tiennent compte des paramètres de croissance des variétés actuelles des différentes cultures. Depuis les années 2010, les variétés ont toutefois rapidement évolué. Par conséquent, il serait intéressant de refaire des analyses sur une période de référence plus courte (10 ou 20 ans) et/ou d'intégrer des données plus récentes (jusqu'à 2015 par exemple). Dans le cadre de l'adaptation aux changements climatiques, de nouvelles variétés verront probablement le jour et leur taux de développement ne seront peut-être plus les mêmes que celles que nous avons actuellement. Cela pourrait notamment affecter le synchronisme entre les plantes et leurs

ennemis et pourrait réduire ou accroître les périodes de vulnérabilité des cultures. Il serait intéressant de refaire ces analyses dans quelques années, en changeant la période de référence et en tenant compte des données climatiques plus récentes, mais aussi des données sur les ravageurs et les cultures. De plus, on ne sait pas comment évolueront les besoins de chacune des grandes cultures sur les marchés internationaux et comment le Québec répondra à la demande. La production de certaines cultures (ex. le canola) pourrait régresser alors que d'autres cultures pourraient s'intensifier, comme on le constate actuellement avec le blé d'automne qui prend une place plus importante qu'il y a quelques années encore. Il conviendrait également de tenir compte de l'importance que prendront certaines cultures émergentes (ex. chia, quinoa, ...) qui elles aussi seront la cible d'ennemis.

La recherche d'analogues spatiaux permet de donner des informations intéressantes sur les endroits dans le monde qui pourraient servir de référence pour les climats futurs. Cela permet de savoir ce qui se passe dans ces régions lorsque les ennemis des cultures y sont présents. On peut ainsi obtenir de l'information sur la biologie, la vitesse d'expansion des espèces, le comportement, le nombre de générations. Les analogues peuvent aussi permettre de valider les modèles bioclimatiques établis pour prédire le nombre de générations qui pourraient se développer chaque année au Québec. Toutefois, ce n'est peut-être pas la meilleure façon de rechercher des méthodes de lutte. Une synthèse bibliographique pourrait être réalisée dans ce sens.

Pour s'intéresser aux adaptations envisageables en cas d'introduction d'une nouvelle espèce, il serait aussi intéressant de regarder ce qui se passe dans les régions nouvellement envahies par une EEE. Cela permettrait de savoir comment les différents acteurs de la filière agricole ont réagi lors de l'introduction de la nouvelle espèce sur leur territoire et les résultats des actions mises en place. Il a également été possible d'identifier des mesures d'adaptation et des méthodes de lutte potentielles pour contrôler les cinq ennemis ayant fait l'objet d'une étude de cas.

Le présent document présente une synthèse des réponses obtenues lors des sondages envoyés à de nombreux participants. Malheureusement, le nombre de répondants n'a pas été très élevé, malgré les trois relances effectuées pour chaque sondage. Compte tenu du faible nombre de répondants, il a donc été nécessaire de compléter les informations en effectuant des recherches bibliographiques, en sélectionnant des articles récemment publiés pour tenir compte des dernières avancées en matière de recherche et de contrôle actuellement dans le monde.

Ces informations sont intéressantes. Toutefois, il faut être vigilant quant à leur utilisation. En effet, les projections sont faites pour la période 2041-2070. D'ici cette période, les moyens de surveillance, de dépistage et de contrôle auront probablement fortement évolué, notamment pour tout ce qui concerne la lutte chimique. Une mise à jour régulière sera nécessaire pour les méthodes de lutte basées sur l'utilisation de traitements chimiques. Une mise à jour sera également nécessaire pour les modèles prévisionnels et les cartes de distributions, en fonction de l'évolution du climat et de la distribution effective des ravageurs et pathogènes.

Toutefois, plusieurs informations pourraient s'avérer très utiles (méthode de dépistage, contrôle biologique, cultures-pièges, ennemis ou prédateurs), notamment dans le cas des espèces qui ont le potentiel de s'implanter prochainement au Québec ou qui le sont déjà, comme c'est le cas pour la punaise marbrée ou le méligèthe des crucifères.

Le statut des différentes espèces pourrait également évoluer plus rapidement si une introduction accidentelle se produisait et que l'espèce introduite trouve au Québec des conditions favorables à sa dispersion. Il faudrait donc tenir compte de cela et pouvoir aussi avoir des modèles qui soient prêts à fonctionner pour modéliser l'évolution des espèces sur du court terme.

Les cultures et pratiques culturales vont sûrement évoluer dans les prochaines années. Certaines cultures seront peut-être délaissées ou réduites au profit d'autres. Des cultures émergentes feront probablement également leur apparition et apporteront avec elle leur lot de ravageurs et de maladies qui pourront potentiellement affecter les cultures déjà en place. Il conviendrait donc de prendre en considération ces évolutions, dans les méthodes d'adaptation aux changements climatiques. Par exemple, au cours des dernières années, le blé d'automne a pris une place grandissante. Les semis étant effectués à l'automne, cela pourrait présenter des avantages ou des inconvénients par rapport au blé de printemps, puisque le cycle de développement est décalé dans le temps. Si cela peut avoir un avantage pour lutter contre certains insectes (désynchronisation des stades de développement de l'insecte et de la plante), en revanche, la période de floraison sera aussi devancée, ce qui pourrait entraîner une augmentation de la période de vulnérabilité vis-à-vis de certaines maladies la fusariose du blé par exemple.

Les décideurs pourront consulter la synthèse réalisée par Annabelle Firlej et Julien Saguez sur « Les changements climatiques et la phytoprotection au Québec » (document en cours de révision) et se baser sur ces études pour déterminer quelles sont les mesures à prendre à plus ou moins long terme pour enrayer la prolifération d'ennemis des cultures déjà présents au Québec, mais aussi pour prévenir et gérer l'introduction de nouvelles espèces invasives qui pourraient menacer l'agriculture et l'économie québécoise.

Annexe 1 : Liste des espèces choisies pour la réalisation de la revue de littérature et cotations pour chaque espèce. Pour les cotes, voir les détails dans la revue de littérature.

Note : La signification des catégories et l'attribution des côtes sont décrites en détail dans la [revue de littérature](#) disponible sur Agri-Réseau. La signification de ces catégories et côtes est également mentionnée dans la section « 4. Méthodologie » de ce rapport scientifique.

Tableau i. Cotations attribuées pour les sept espèces retenues d'insectes ravageurs présents au Québec.

Nom commun	Nom d'espèce	Cat.	Cote A	Cote B	Cote C	Cote D	Cote finale
Ver gris occidental du haricot	<i>Striacosta albicosta</i>	1	NA	3	3	3	27
Scarabée japonais	<i>Popillia japonica</i>	2	NA	3	2	3	18
Cécidomyie du chou-fleur	<i>Contarinia nasturtii</i>	1	NA	3	3	2	18
Chrysomèle du haricot	<i>Cerotoma trifurcata</i>	2	NA	3	2	3	18
Altise du navet	<i>Phyllotreta striolata</i>	1	NA	3	2	2	12
Meligèthe des crucifères	<i>Meligethes viridescens</i>	1	NA	3	2	2	12
Charançon de la silique	<i>Ceutorhynchus obstrictus</i>	2	NA	3	2	2	12

Tableau ii. Cotations attribuées pour les 17 espèces exotiques envahissantes d'insectes ravageurs retenues.

Nom commun	Nom d'espèce	Cat.	Cote A	Cote B	Cote C	Cote D	Cote finale
Noctuelle de la tomate ou Chenille des épis du maïs	<i>Helicoverpa armigera</i>	4	2	3	3	3	54
Noctuelle gamma	<i>Autographa gamma</i>	4	2	3	3	3	54
Punaise verte ponctuée	<i>Nezara viridula</i>	3	3	3	2	3	54
Prodénia	<i>Spodoptera littoralis</i>	5	2	3	3	3	54
Ver-gris (noctuelles)	<i>Euxoa auxiliaris/Chorizagrotis auxiliaris</i>	3	3	3	2	3	54
Punaise du Kudzu	<i>Megacopta cribraria</i>	4	3	3	2	3	54
Punaise marbrée	<i>Halyomorpha halys</i>	3	3	3	2	3	54
Pyrale des tiges de maïs du sud	<i>Diatraea crambidoides</i>	3	2	3	3	3	54
Noctuelle du maïs	<i>Sesamia nonagrioides</i>	5	2	2	3	3	36
Pyrale des amandes	<i>Cadra cautella</i>	4	3	2	2	3	36
Charançon frangé de blanc	<i>Naupactus leucoloma/Graphognathus leucoloma</i>	4	2	3	2	3	36
Pyrale du haricot	<i>Etiella zinckenella</i>	3	3	2	2	3	36
Pyrale du sud-ouest	<i>Diatraea grandiosella</i>	3	3	2	2	3	36
Légionnaire africaine	<i>Spodoptera exempta</i>	3	3	2	2	3	36
Noctuelle	<i>Helicoverpa punctigera</i>	5	1	3	3	3	27
Cicadelle du maïs	<i>Cicadulina mbila</i>	5	1	3	3	3	27
Tordeuse du soya	<i>Leguminivora glycinivorella</i>	5	1	3	3	3	27

Tableau iii. Cotations attribuées pour les sept espèces retenues de maladies présentes au Québec.

Nom commun	Agent pathogène et/ou vecteur	Cat.	Cote A	Cote B	Cote C	Cote D	Côte finale
Maladie de Stewart	Bactérie : <i>Pantoea stewartii</i> transmise par l'altise du maïs <i>Chaetocnema pulicaria</i>	2	NA	3	3	2	18
Cercosporose	Champignon : <i>Cercospora sojina</i>	2	NA	3	2	2	12
Taches grises	Champignon : <i>Cercospora zeaemaydis</i>	1-2	NA	3	2	2	12
Jaunisse de l'aster	Phytoplasme : <i>Candidatus phytoplasmi asteris</i> transmis par des cicadelles (<i>Macrosteles quadrilineatus</i> en particulier)	2	NA	2	2	2	8
Pourriture des graines	Champignon : <i>Phomopsis longicolla</i>	2	NA	2	2	2	8
Charbon commun	Champignon : <i>Ustilago zea/U. maydis</i>	2	NA	3	1	2	6
Pourriture à sclérotés	Champignon : <i>Sclerotinia sclerotiorum</i>	1	NA	2	1	2	4

Tableau iv. Cotations attribuées pour les sept espèces retenues de maladies potentiellement envahissantes.

Nom commun	Agent pathogène et/ou vecteur	Cat.	Cote A	Cote B	Cote C	Cote D	Côte finale
Mosaïque nanisante du maïs	Virus transmis par des pucerons (<i>Sitobion avenae</i> , <i>Rhopalosiphum padi</i> et <i>R. maidis</i>)	3	3	3	3	3	81
Virus américain de la mosaïque striée du blé	Virus transmis par une cicadelle (<i>Endria inimica</i>)	3-4	3	3	2	3	54
Virus de la mosaïque striée du blé	Virus transmis par un acarien (<i>Aceria tosichella</i>)	4	3	3	3	2	54
Rouille (asiatique) du soya	Champignon : <i>Phakopsora pachyrhizi</i>	3-4	3	3	3	2	54
Nématode cécidogène de Columbia	Nématode : <i>Meloidogyne chitwoodi</i> (Nematoda, Meloidogynidae)	3	3	2	2	3	36
Nématode du maïs	Nématode: <i>Heterodera zae</i> (Nematoda, Heteroderidae)	3	3	1	2	3	18
Nématode à kystes des céréales	Nématode : <i>Heterodera avenae</i> (Nematoda, Heteroderidae)	3	3	2	1	3	18

Annexe 2 : Cartographie indiquant le nombre de jours où la température est inférieure < 7°C et est où elle est > 33°C, selon différentes périodes et différents scénarios de changements.

Ces cartes ont permis de définir les zones dans lesquelles le mûligèthe des crucifères à des chances de se développer dans le futur. Actuellement, le mûligèthe est principalement présent au Bas-St-Laurent, mais dans le futur, il pourrait être adapté pour vivre dans des régions plus nordiques telles que l’Abitibi-Témiscamingue et le Saguenay – Lac-St-Jean où la culture du canola auraient des conditions optimales de culture.

Nombre de jours où la température minimale atteint 7°C ou moins, de la date des semis de canola à la récolte, basé sur la période 1981-2010

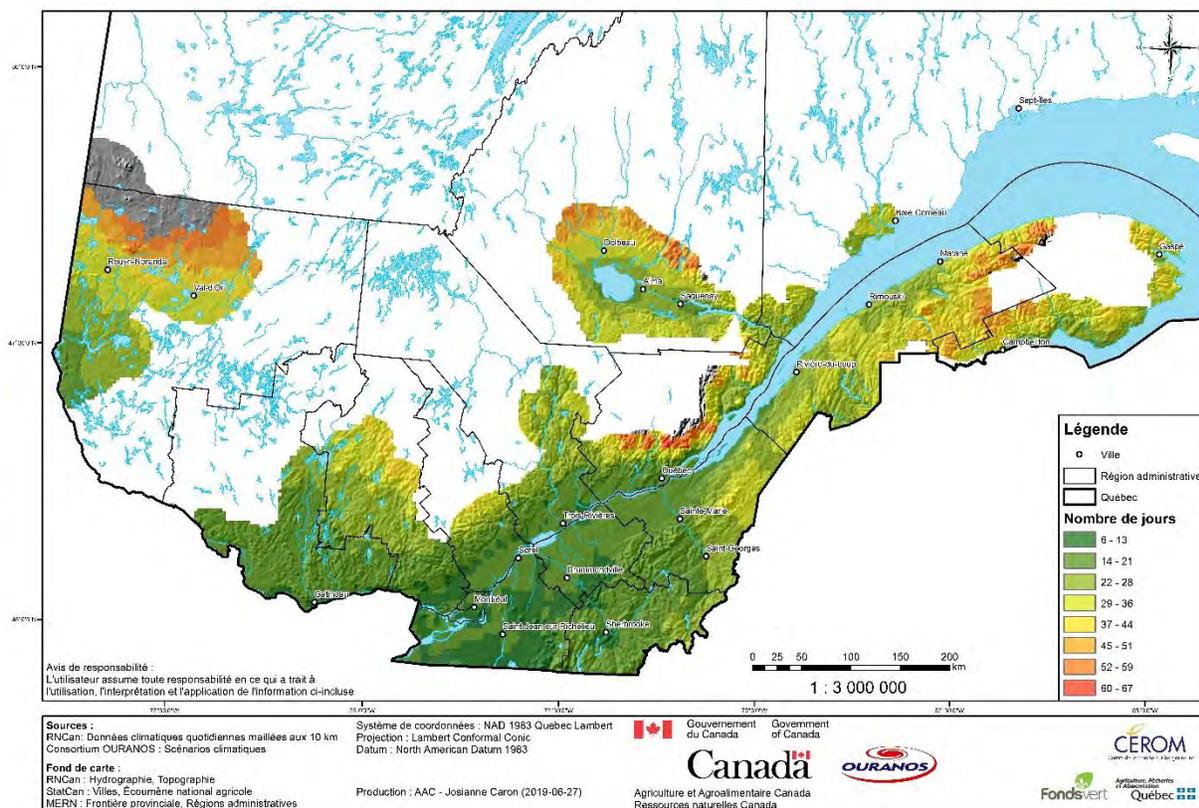


Figure 1 : Nombre de jours où la température atteint 7°C ou moins, de la date des semis de canola à la récolte, basé sur la période 1981-2010.

Selon les données historiques, et dans les conditions actuelles, c’est au sud de la province et au sud du St Laurent, que l’on a le moins de jours avec des températures < 7°C. Dans les régions les plus au nord il n’est pas impossible d’avoir plus d’un mois voire plus de 2 mois avec des températures < 7°C. Cela limite le développement du mûligèthe.

Parallèlement, pour le nombre de jours avec une température > 33°C, on constate que dans les conditions actuelles, il ne dépasse pas 2 jours partout à travers la province.

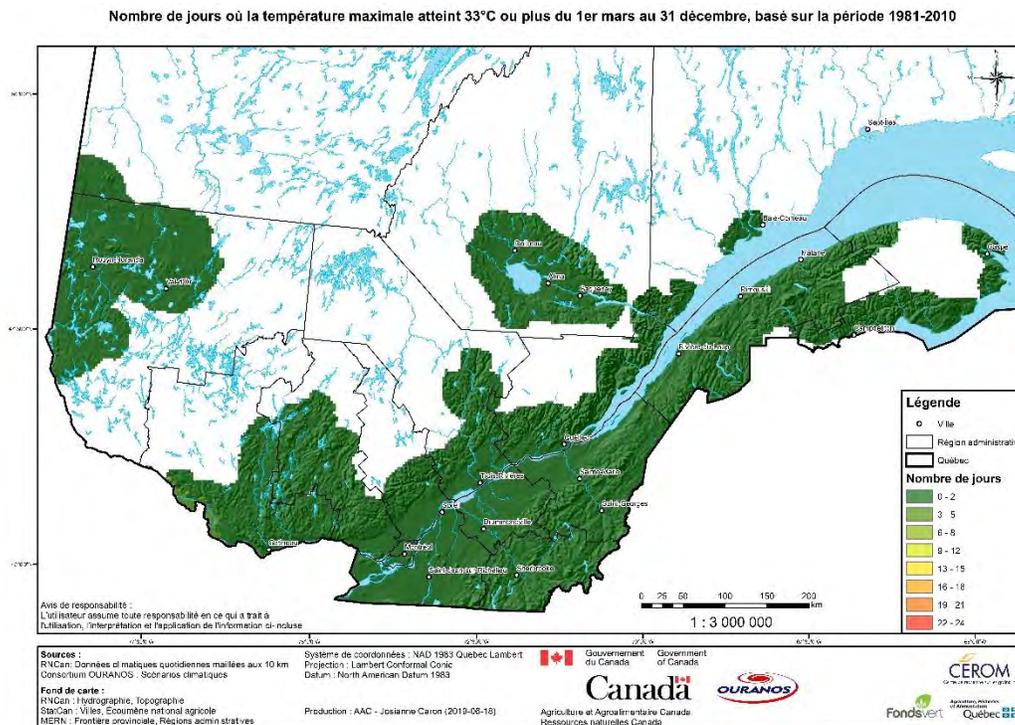


Figure 4 : Nombre de jours où la température atteint 33°C ou plus, du 1^{er} mars au 31 décembre, basé sur la période 1981-2010.

Dans le futur, on constate toutefois qu'il y aura plus de jours avec une température > 33°C. Dans le cas d'un scénario de changement inférieur, le nombre de jours avec une température > 33°C sera faiblement affecté. En revanche, dans le cas d'un scénario de réchauffement supérieur, il y aura beaucoup plus de jours avec une températures > 33°C, notamment dans le sud de la Province, ou l'on pourrait avoir une vingtaine de jours pendant lesquelles les températures seront très élevées.

Par conséquent, les régions plus nordiques seront d'avantage favorables au développement du méligèthe des crucifères (moins de jours < 7°C et > 33°C).

Nombre de jours où la température maximale atteint 33°C ou plus du 1er mars au 31 décembre : Scénario de changement inférieur (2041-2070)

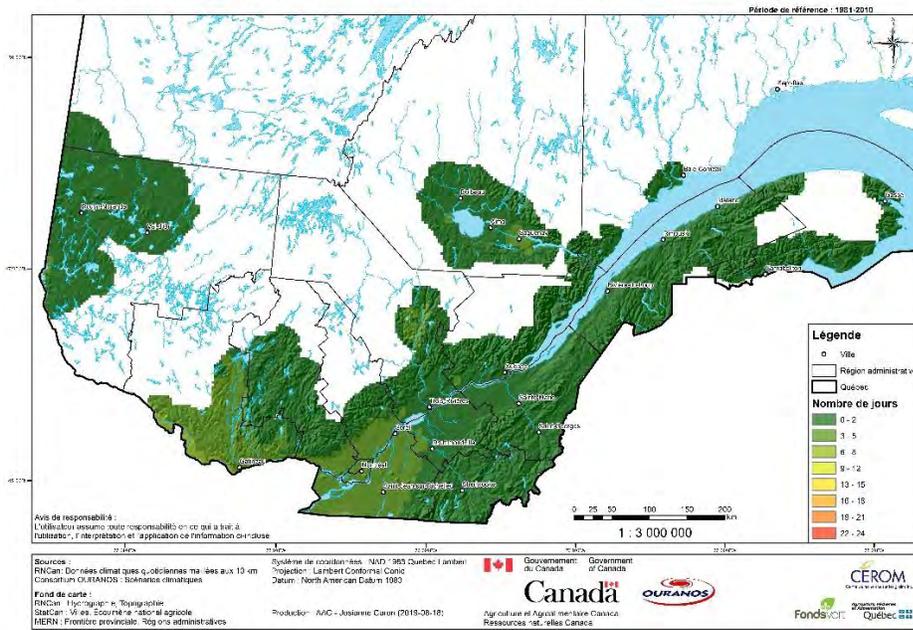


Figure 5 : Nombre de jours où la température atteint 33°C ou plus, du 1^{er} mars au 31 décembre : Scénario de changement inférieur (2041-2070).

Nombre de jours où la température maximale atteint 33°C ou plus du 1er mars au 31 décembre : Scénario de changement supérieur (2041-2070)

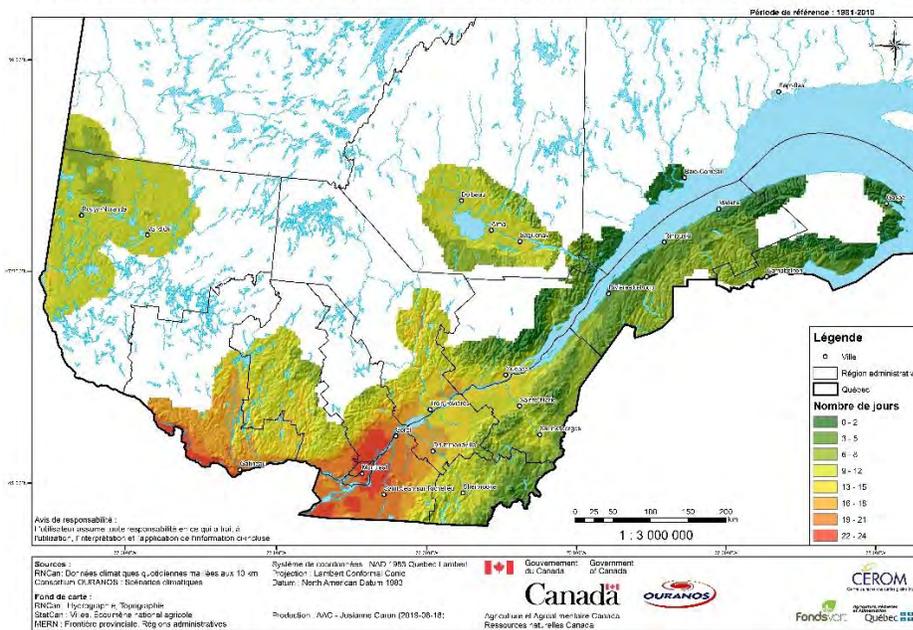


Figure 6 : Nombre de jours où la température atteint 33°C ou plus, du 1^{er} mars au 31 décembre : Scénario de changement supérieur (2041-2070).

