

Quels enjeux représentent les changements climatiques en lien avec les espèces exotiques envahissantes pour la culture du soya au Québec?

Benjamin Mimee, Jacques Brodeur, Gaétan Bourgeois, Joffrey Moiroux, Anne-Frédérique Gendron St-Marseille et Annie-Ève Gagnon



Institut de recherche
en biologie végétale
Centre sur la biodiversité
de l'Université de Montréal



Agriculture et
Agroalimentaire Canada


CEROM
Centre de recherche sur les grains inc.



Table des matières

1. Introduction	3
2. Objectifs.....	5
3. Cadre théorique	5
4. Méthodologie	9
5. Résultats.....	12
Revue de littérature	12
Modélisation du soya	16
Modélisation du nématode à kyste du soya	19
Modélisation de la punaise marbrée	22
Modélisation du ver de l'épi.....	29
6. Analyse et discussion.....	36
Revue de littérature	36
Modélisation du soya	36
Modélisation de la punaise marbrée	38
Modélisation du ver de l'épi.....	39
7. Conclusion et recommandations	40
8. Références	41
ANNEXE 1 – Éléments constituant le modèle phénologique du soya.....	48
ANNEXE 2 – Liste des scénarios climatiques utilisés dans le cadre du projet.....	50
ANNEXE 3 – Liste des 333 espèces s'attaquant au soya à travers le monde	51

1. Introduction

Les espèces exotiques envahissantes (EEE) sont, par définition, des espèces étrangères à l'écosystème où elles se trouvent, mais capables de s'y reproduire et susceptibles d'avoir des effets nuisibles sur l'économie, l'environnement ou la santé humaine (Convention on Biological Diversity, 2008). Ce type d'organismes nuisibles comprend, outre des plantes, certains microorganismes, champignons et animaux qui représentent également une menace à l'endroit de la biodiversité. Les espèces exotiques envahissantes perturbent l'équilibre des écosystèmes de différentes façons. Par exemple, elles peuvent contribuer au déclin des populations d'espèces indigènes, voire à l'extinction des plus vulnérables, par des phénomènes de prédation, d'herbivorie ou de compétition. Elles peuvent également altérer significativement l'hydrologie, le recyclage des éléments nutritifs, la décomposition de la matière organique et autres fonctions écologiques des écosystèmes naturels ou aménagés (Mack et al. 2000). Nombre d'entre elles jouissent d'avantages dont les espèces indigènes sont dépourvues, comme une croissance plus rapide ou des mécanismes de dispersion plus efficaces. Puisque ces espèces ne sont pas natives de l'écosystème qu'elles envahissent, il n'y a parfois aucun ennemi naturel ou espèce compétitrice pour restreindre la croissance de leurs populations. Les EEE représentent une menace réelle pour la biodiversité indigène partout dans le monde, et elles sont nombreuses à avoir des répercussions économiques dévastatrices sur les écosystèmes et l'industrie des ressources naturelles. On estime à plus de 120 milliards de dollars les dommages causés chaque année aux forêts, aux pêches, à l'agriculture et aux cours d'eau par ces espèces, et ce, uniquement sur le territoire américain (Pimentel et al. 2005). Au Canada, les pertes économiques associées à 16 espèces invasives particulièrement problématiques s'étaleraient de 13,3 à 34,5 milliards par an pour les secteurs de l'agriculture, des forêts et de la pêche, selon le modèle de Colautti et al. (2006). Plusieurs causes peuvent expliquer que certaines espèces deviennent envahissantes, dont les changements climatiques (CC). Actuellement, de nombreuses espèces végétales et animales voient leur aire de répartition s'étendre vers le nord grâce aux CC (Parmesan 2006). Un phénomène également de mieux en mieux documenté au Québec (ex. tique du cerf, cardinal rouge, érable rouge) (Berteaux 2014). De même, on devrait constater l'arrivée et l'établissement de nouveaux ennemis des cultures dans les décennies à venir, lesquels étendent actuellement leur aire de répartition vers le nord des États-Unis et le sud du Canada (Olfert et Weiss 2006; Olfert et al. 2006).

Les connaissances actuelles nous permettent d'affirmer que, dans le contexte des changements globaux prévus en matière de climat et d'échanges commerciaux, la grande adaptabilité qui caractérise les EEE accélèrera leur dispersion ainsi que leur établissement dans les divers écosystèmes agricoles du Canada (Smith et al. 2012). Les effets combinés des CC et des EEE sont très complexes et doivent être évalués dès maintenant si nous voulons être en mesure de développer des stratégies d'adaptation qui feront un usage minimal des pesticides et qui préconiseront des approches alternatives pour le bénéfice d'une agriculture durable.

La caractérisation de l'influence des CC sur les EEE actuelles ou futures d'une culture modèle comme le soya (*Glycine max*) permettra d'identifier les éléments clés qui doivent être considérés afin de développer ces stratégies d'adaptation. La mise en lumière des facteurs critiques de l'établissement et de gestion des EEE pourra éventuellement être utilisée dans d'autres cultures afin de permettre des actions plus rapides et plus efficaces suite à la

détection d'une nouvelle EEE. En ce sens, l'approche que nous proposons pour le soya pourrait être par la suite adaptée à d'autres cultures.

La culture du soya a connu une expansion fulgurante au Canada au cours des dernières décennies. En effet, les superficies cultivées sont passées de 150 000 ha en 1970 à plus de 1,7 millions ha en 2012 (Statistique Canada, 2012). L'augmentation des températures prévues au cours des prochaines décennies devraient repousser davantage les limites septentrionales des zones de production. Cette culture était jusqu'à récemment exempte de problème phytosanitaire majeur et avait donc un bilan environnemental enviable. L'arrivée en Amérique du Nord en 2000 du puceron du soya, *Aphis glycines*, a totalement changé la situation (Ragsdale et al. 2011). En 2002, ce ravageur d'origine asiatique avait déjà colonisé l'ensemble des régions productrices de soya du Québec et entraîné l'utilisation de traitements insecticides coûteux et néfastes pour l'environnement (Brodeur et Roy 2008). Par ailleurs, le nématode à kyste du soya (NKS), *Heterodera glycines*, est un endoparasite sédentaire des racines qui cause des dommages de plusieurs milliards de dollars annuellement aux États-Unis seulement (Koenning et Wrather 2010). Au Canada, le NKS est présent dans plusieurs comtés du sud de l'Ontario (Yu 2011) et a tout récemment été détecté au Québec (Mimee et al. 2014). Avec l'augmentation des températures, les producteurs de soya canadiens pourraient également devoir composer avec la rouille asiatique du soya, *Phakopsora pachyrhizi*. Cette maladie, qui peut engendrer des pertes de rendement atteignant 80 %, se propage très rapidement dans plusieurs régions du globe (Li et al. 2010).

De plus, les modifications du climat devraient également altérer les interactions trophiques de l'agroécosystème du soya, de la plante aux organismes supérieurs (Tylianakis et al. 2008; Sentis et al. 2014). La phénologie de la culture sera modifiée par les variations dans la durée de la saison de croissance et des régimes thermiques et pluviométriques. Certains ravageurs ou maladies présents sur notre territoire, mais qui ne causent que très peu de dommages à l'heure actuelle, pourraient devenir problématiques à la suite des CC (Rosenzweig et al. 2011; Gagnon et al. 2012; Brodeur et al. 2013). Citons par exemple le cas des thrips et des tétranyques, rarement nuisibles dans l'est du Canada mais responsables de lourdes pertes aux États-Unis. L'augmentation des populations de ces espèces pourrait entraîner de grandes modifications au niveau du réseau trophique en modifiant, par exemple, la guildes de prédateurs, de parasitoïdes et d'antagonistes (Manea et Leishman 2011). Les conséquences de ces modifications pourraient faciliter ou non la dispersion et l'établissement des EEE. Il s'avère donc pertinent d'approfondir dans un premier temps l'impact des CC sur les EEE, mais il importe également d'obtenir une vue d'ensemble de l'écosystème afin de pouvoir anticiper sa composition et sa dynamique future. Toutes ces informations seront d'une importance capitale pour l'industrie qui devra s'adapter, faire des investissements judicieux dans le développement d'approches phytosanitaires efficaces et s'assurer qu'à long terme, ces placements soient profitables. À terme, les travaux de recherche menés au Québec et ailleurs en Amérique devraient également permettre d'outiller les intervenants régionaux de mesures de gestion adaptées aux nouvelles situations phytosanitaires dans le contexte des CC.

Avant de caractériser l'agroécosystème du soya sous différents scénarios climatiques et de pouvoir envisager différentes mesures d'adaptation aux EEE, il importe d'établir des bases solides et de synthétiser les connaissances actuelles. Le présent projet visait donc à réaliser une revue de littérature sur les EEE qui affectent ou pourraient affecter la culture du soya à travers le monde. Cet exercice de synthèse a également recensé les informations disponibles

sur la biologie de ces ravageurs de même que les travaux existants en lien avec les CC. Ces données ont ensuite été utilisées afin d'établir des cartes de distribution potentielle pour quelques EEE ciblées à l'horizon 2041-2070.

À terme, les résultats de ce programme de recherche seront utiles à tous les niveaux d'intervenants en agriculture. Les producteurs agricoles et les conseillers obtiendront l'accès à des fiches d'information sur les nouveaux ravageurs qui menacent la culture du soya afin de pouvoir les reconnaître promptement. Les agronomes pourront anticiper l'arrivée de nouveaux ravageurs à l'aide des cartes de distribution et ainsi prévoir des méthodes de gestion des cultures en conséquence. De son côté, les décideurs bénéficieront du travail d'identification des besoins de recherche à long terme, de même que d'une liste des principales menaces afin d'orienter les stratégies gouvernementales à mettre en place afin d'assurer la pérennité des systèmes agricoles dans un contexte de CC. Par ailleurs, l'industrie profitera de ces connaissances afin de faire des investissements judicieux dans le développement d'approches phytosanitaires efficaces et durables. Les résultats générés par ce projet seront aussi grandement utiles à la communauté scientifique dans ses efforts pour mieux comprendre les impacts des CC et les mécanismes de dispersion et d'établissement des espèces exotiques envahissantes (EEE). Finalement, les retombées de ce projet contribueront au bien-être de toute la population puisqu'elles permettront d'identifier des stratégies d'adaptation qui font un usage minimal des pesticides.

2. Objectifs

L'objectif principal de cette étude est d'identifier les EEE susceptibles d'affecter la culture du soya à la faveur des CC et d'établir des modèles de dispersion en climat futur pour certaines d'entre elles.

Les objectifs spécifiques sont :

- 1) Identifier les principales EEE susceptibles d'affecter la culture du soya au Québec à la faveur des CC.
- 2) Développer des cartes du potentiel régional de la culture de soya à l'horizon 2041-2070.
- 3) Développer des cartes de l'aire potentielle d'établissement à l'horizon 2041-2070 des principales EEE.
- 4) Produire des outils de transfert technologique et de diffusion des résultats (fiches d'information, cartes et présentation orale).

3. Cadre théorique

Les étapes de modélisation prévues aux objectifs 2 et 3 impliquent la connaissance préalable de certains paramètres et équations liés au développement du soya ou des EEE. Ces données ont été obtenues à partir de la revue de littérature et de la consultation des experts dans chaque domaine.

Phénologie de la culture du soya

Pour la modélisation du soya, un modèle bioclimatique simulant la phénologie complète du semis à la maturité physiologique a été privilégié par rapport à l'approche des unités thermiques maïs (UTM) qui permet uniquement une prédiction de la maturité en fonction de la

température. D'ailleurs, étant donné que le développement phénologique de la culture de soya est plus lent à des photopériodes plus longues, le comité provincial chargé de la révision de l'approche des UTM pour l'Atlas agroclimatique du Québec ne recommande pas l'utilisation des UTM pour la culture de soya. Ce modèle phénologique, utilisé pour extraire les dates d'apparition des différents stades de croissance du soya (stades phénologiques BBCH, Tableau 1) est constitué de fonctions de températures $f(T)$ et de photopériode $f(P)$ (Annexe 1). Chaque fonction est utilisée selon la phase phénologique dans laquelle se trouve la culture et selon le groupe de maturité (GM) du cultivar. Pour utiliser le modèle, il est nécessaire de posséder les données horaires de température, la photopériode et les dates de semis. La version du modèle utilisé a été calibrée avec une trentaine de jeux de données phénologiques du soya GM1 recueillies dans le cadre d'expérimentations effectuées au Québec. Toutefois, ce modèle phénologique n'a pas été validé de façon exhaustive sur plusieurs sites et années dans toutes les régions de production du soya au Québec.

Tableau 1. Description des stades phénologiques du soya selon les échelles de Ferh et al., 1971 et Munger et al., 1997.

Stades de Ferh <i>et al.</i> , 1971	Nom du stade	Description	Équivalence avec l'échelle BBCH de Munger <i>et al.</i> , 1997
Stades végétatifs			
VE	Émergence	L'hypocotyle et les cotylédons perçent la surface du sol.	09
VC	Cotylédon	Les cotylédons sont complètement étalés.	10
V1	Premier nœud	La première paire de feuilles est étalée (feuilles simples Insérées sur le premier nœud).	11
V2	Second nœud	Feuille trifoliolée, insérée sur le 2ème nœud, est étalée.	12
V3	Troisième nœud	Feuille trifoliolée, insérée sur le 3ème nœud, est étalée.	13
Vn	Nième nœud	Feuille trifoliolée, insérée sur le Nème nœud, est étalée.	14 et plus.
Stades reproductifs			
R1	Début de la floraison	Les premières fleurs de la population sont ouvertes.	60
R2	Pleine floraison	Pleine floraison: environ 50% des fleurs sont ouvertes	65
R3	Début de la formation des gousses	Fin de la floraison: les premières gousses sont visibles.	69
R4	Gousse complète	La première gousse a atteint sa longueur finale (15–20 mm).	70
R5	Début du remplissage des gousses	Environ 20% des gousses ont atteint la longueur finale (15–20 mm) et elles commencent à se remplir de graines.	72
R6	Fin du remplissage des gousses	Environ 50% des gousses ont atteint la longueur finale (15–20 mm) et elles continuent à se remplir de graines.	75
R7	Début de la maturité	La première gousse est mûre, les graines ont atteint la couleur Typique et elles sont sèches et dures.	80
R8	Atteinte de la maturité	La plupart des gousses sont mûres, les graines ont atteint la Couleur typique et elles sont sèches et dures.	89

Nématode à kyste du soya (NKS)

Les recherches menées par Alston et Schmitt (1988) suggèrent que le taux de développement embryonnaire du NKS dans l'œuf est linéaire entre 15 et 30°C (Fig. 1). Par conséquent, l'équation associée est celle d'une droite :

$$y = 0,0041x + 0,0087$$

où y représente la proportion du développement embryonnaire dans l'œuf complétée par jour et x la température. Cependant, les travaux de Melton et al. (1986) suggèrent que le développement embryonnaire plafonnerait à 32°C et qu'il se poursuivrait à un rythme plus lent jusqu'à 35°C. Ainsi, le modèle linéaire a été prolongé jusqu'à 32°C. À l'inverse, la limite inférieure des températures permettant le développement embryonnaire du NKS serait de 15°C (Alston et Schmitt 1988). Ainsi, le modèle sera programmé de manière à ce qu'en deçà de 15°C ou qu'au-dessus de 32°C, le développement soit arrêté et ne reprenne qu'au retour des températures situées à l'intérieur de cette plage. Cependant, le nombre de jours, lui, continuera d'être compté afin de connaître le temps requis pour produire une génération.

Les articles de Ross (1964) et de Lauritis et al. (1983) ont fourni les données brutes nécessaires au calcul de la courbe de réponse du NKS à la température à l'intérieur de la racine (des larves infectieuses jusqu'au stade adulte) (Fig. 1). L'analyse visuelle des données suggère l'utilisation d'une équation polynomiale :

$$y = -0,0008x^2 + 0,04x - 0,4106$$

où y représente la proportion du développement des larves de stade 2 (J2) au stade adulte (associé à la production d'œufs prêts à éclore) complétée dans la racine par jour et x , la température. D'ailleurs, plusieurs articles traitant de sujets connexes (Duan et al. 2009; Melton et al. 1986; Slack et al. 1972) tendent à démontrer que cette formule s'ajuste bien à la réalité. Cependant, certaines limites doivent corriger cette équation. En effet, selon Ross (1964), à 10°C aucun développement à l'intérieur de la racine n'a été constaté. Par conséquent, l'équation ne sera pas appliquée lors de la simulation lorsque les températures atteindront moins de 10°C. Comme cette température n'est pas létale pour le NKS (Slack et al. 1972), le développement reprendra en concomitance avec le réchauffement des températures. En outre, puisque le stade adulte peut être atteint à 32°C, mais pas à 35°C (Ross 1964; Slack et al. 1972), l'équation ne sera pas appliquée lorsque les températures dépasseront 34°C. Par contre, le compteur continuera d'accumuler les journées afin de connaître le temps requis pour compléter une génération.

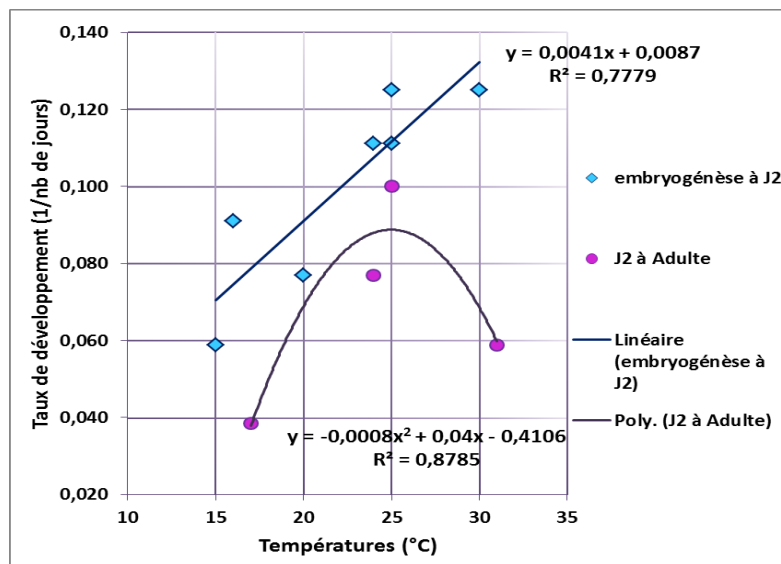


Figure 1. Courbes de réponse du nématode à kyste du soya à la température extérieure, développement embryonnaire à l'intérieur de l'œuf (quatre cellules au stade juvénile 2 (J2) et développement à l'intérieur de la racine (J2 à adulte). Sources : Alston et Schmitt 1988; Lauritis et al. 1983; Ross 1964.

Les paramètres physiologiques requis pour la modélisation du développement du NKS sont résumés au Tableau 2.

Tableau 2. Paramètres physiologiques liés au développement du NKS.

Stades correspondant au taux de développement	Température de base de développement (Tbase)	Températures optimales de développement (Topt)	Température supérieure de développement (Tsup)
Développement dans l'œuf (embryogénèse à J2)	15°C	20 à 31°C	32°C
Développement dans la racine (J2 à adulte)	10°C	17 à 28°C	34°C

Comme les paramètres associés à la reproduction, dont la migration du mâle vers la femelle, étaient très complexes à simuler, un délai de trois jours a été appliqué avant la reprise de l'embryogenèse. L'impact sur le modèle devrait être mineur puisque selon Lauritis et al. (1983), la fécondation survient dans les deux jours suivant la production de la masse d'œufs.

Conséquemment, le modèle fournit les dates d'atteintes et la durée des stades embryonnaire, infectieux (J2) et adulte ainsi que le nombre de générations. Grâce à ces données, il sera possible d'évaluer le potentiel d'infection par le NKS lors des stades

phénologiques vulnérables du soya (BBCH 09 à BBCH 50) afin d'anticiper les pertes de rendement.

Punaise marbrée

Nielsen et al. (2008; 2009) ont étudié en détails la réponse de la punaise marbrée à la température, ce qui leur a permis de proposer les éléments requis à l'élaboration d'un modèle préliminaire basé sur l'approche des cumuls thermiques (degrés-jours) utilisant la méthode standard de calcul. Les températures de base et optimale ont été respectivement établies à 14,2 et 30,0°C, et le début des cumuls au 31 mai en Pennsylvanie. Les seuils thermiques pour l'atteinte des stades « Début de ponte », « Premières nymphes » et « Premiers adultes » ont été établis respectivement à 148, 201 et 686 degrés-jours. Le stade « Adulte » étant considéré comme le stade hivernant de cet insecte, l'atteinte de celui-ci est un prérequis pour son établissement dans une région. En termes de synchronisme avec la culture de soya, les stades « Nymphes » et « Adultes » préfèrent s'alimenter sur les grains en développement dans les gousses (Stades BBCH 70 à 75).

Ver de l'épi

Hartstack et al. (1976) ont étudié la réponse du ver de l'épi à la température, ce qui leur a permis de proposer les éléments requis à l'élaboration d'un modèle préliminaire basé sur l'approche des cumuls thermiques (degrés-jours) utilisant la méthode standard de calcul. Les températures de base et optimale ont été établies respectivement à 12,6 et 33,3°C, et le début des cumuls à la date des premières captures des adultes. Les seuils thermiques pour l'atteinte des stades « Début de ponte », « Premières larves », « Premières pupes » et « Premiers adultes » ont été établis respectivement à 63, 103, 305 et 485 degrés-jours. Le stade « Pupes » étant considéré comme le stade hivernant de cet insecte, l'atteinte de celui-ci est un prérequis pour son établissement dans une région. En termes de synchronisme avec la culture de soya, les stades larvaires préfèrent s'alimenter sur les jeunes gousses (Stades BBCH 65 à 70).

4. Méthodologie

Objectif 1 : Une revue de littérature a été réalisée afin d'identifier les principales EEE qui menacent la culture du soya dans le contexte des CC et les besoins futurs de recherche. Il a été décidé de ne pas inclure les mauvaises herbes car certaines ont déjà été traitées dans d'autres projets (ex. de Blois et al. 2013). De plus, la grande majorité des mauvaises herbes présentes dans les champs de soya ne sont pas spécifiques à cette culture.

Différents experts ont été consultés afin de mieux orienter la recherche bibliographique. Les revues de littérature scientifique déjà existantes pour certains groupes taxonomiques ont été utilisées, ainsi que les guides d'information mis à disposition des producteurs et agronomes par les universités et les laboratoires gouvernementaux. Par la suite, des articles scientifiques ciblant l'espèce ou certaines régions géographiques ont été recherchés afin d'établir une liste aussi exhaustive que possible. Les aires de distribution et le caractère invasif ont été majoritairement établis grâce aux informations disponibles sur le site Plantwise (<http://www.plantwise.org/KnowledgeBank/home.aspx>), qui regroupe les données relatives aux plantes et à leurs ravageurs. Pour chacune des espèces, les informations récoltées

étaient : nom; groupe taxonomique (virus, bactéries, champignons, nématodes, arthropodes, gastéropodes); nom de la maladie associée dans le cas des virus, bactéries et champignons; aire de distribution; caractère invasif; dommages causés au soya. Les dommages causés au soya ont été évalués selon un indice allant de 1 à 4. Un indice de 1 correspond à une espèce pouvant affecter grandement la culture du soya, avec des pertes de rendement atteignant fréquemment plus de 20% et pouvant atteindre plus de 50% dans certains cas. Un indice de 2 indique une espèce néfaste à la culture du soya, qui pourra induire une baisse du rendement souvent inférieure à 20%, et pour laquelle des traitements phytosanitaires sont souvent requis. Un indice de 3 caractérise une espèce bien présente dans les champs de soya mais qui ne cause pas de dégâts économiques importants pour le producteur. Un indice de 4 correspond à une espèce observée de façon ponctuelle et qui ne présente pas de problème pour la culture du soya

Objectif 2 : Afin d'établir l'impact des changements climatiques et de la variabilité spatio-temporelle sur le potentiel régional de différents groupes de maturité de la culture de soya dans les régions agricoles du Québec, un modèle bioclimatique simulant la phénologie complète de cette culture, soit du semis à la maturité physiologique, a été utilisé. Ce modèle, développé par l'équipe de recherche en bioclimatologie et modélisation de Gaétan Bourgeois (AAC/CRDH), est implanté dans logiciel CIPRA et utilise les données et équations présentées dans la section « Cadre théorique » et à l'annexe 1. Afin d'exécuter le modèle, des données météorologiques quotidiennes avec une résolution spatiale de 10 km ont été utilisées annuellement sur deux périodes de 30 ans, soit le passé récent (1971-2000) et le futur proche (2041-2070). Pour le futur proche, 14 scénarios de changements climatiques ont déjà été générés par le groupe scénarios climatiques d'Ouranos à partir de différentes combinaisons de modèles de climat global (MCG) et de modèles régionaux de climat (MRC) dans le cadre d'un projet piloté par G. Bourgeois (Annexe 2). Par conséquent, ces données du passé récent et les scénarios du futur proche sont disponibles sur le « Centre informatique de traitement spatio-temporel d'indices et de modèles bioclimatiques » chez AAC/CRDH à Saint-Jean-sur-Richelieu. La photopériode a été déterminée en fonction des latitudes et du jour de l'année et est appliquée à partir du début de la phase reproductive (Annexe 1). Les dates de semis de soya ont été déterminées en identifiant les dates des derniers gels printaniers (il y a gel si $T < 0^{\circ}\text{C}$) survenues entre le 1 janvier le 31 juillet. Puis, pour chaque année, à partir de la médiane du dernier gel printanier, on cherche la température moyenne mobile sur 5 jours qui serait $\geq 12,8^{\circ}\text{C}$, et le 5^{ème} jour sera la date du semis. Ainsi, le modèle est facilement utilisable avec les données météorologiques disponibles pour les périodes 1971-2000 (passé récent) et 2041-2070 (futur proche).

Afin de faciliter l'interprétation des informations géo-référencées générées par modélisation, ce centre informatique permet aussi la cartographie des résultats à l'aide du logiciel ArcGIS et des couches d'informations déjà générées pour les différentes cartes de l'Atlas agroclimatique du Québec. Les cartes du potentiel régional et du développement phénologique du soya serviront de base à l'établissement des cartes de distribution des EEE (Objectif 3). Ainsi, la présence de la plante hôte dans certaines régions de même que les périodes où certains stades intermédiaires (floraison, fructification, etc.) sont présents pourront être couplés aux informations disponibles sur les EEE afin d'établir la compatibilité et le potentiel d'établissement. Pour chacun des indices sélectionnés pour la phénologie du soya et des différents EEE, trois cartes ont été produites, la première illustrant la moyenne des valeurs obtenues pour le passé récent, la deuxième illustrant la moyenne pour le scénario de changement inférieur (10^{ème} percentile des 14 scénarios du futur proche) et la troisième

illustrant la moyenne pour le scénario de changement supérieur (90^{ème} percentile des 14 scénarios du futur proche). Toutes les cartes présentées dans ce rapport sont disponibles individuellement sous forme de fichiers « pdf » afin de permettre au lecteur de visualiser chacune de celle-ci de façon plus détaillée.

Objectif 3 : Des cartes représentant les aires de distribution potentielles ont été réalisées pour les EEE sélectionnées à la suite de la revue de littérature, des consultations avec les experts et la rencontre du comité d'usagers. Ces espèces sont le nématode à kyste du soya, le ver de l'épi et la punaise marbrée. Elles ont été choisies en fonction de leur fort potentiel d'établissement, de la sévérité des dommages prévus et de la disponibilité des modèles biologiques. Afin de réaliser ces cartes, les modèles développés à partir de l'information disponibles et présentés dans la section 'cadre théorique' ont été intégrés dans les outils informatiques développés par AAC/CRDH et soumis aux mêmes données climatiques du passé récent, scénarios climatiques du futur proche et approche de cartographie décrits à l'objectif 2.

Pour le nématode à kyste du soya, les dates d'atteinte de stades plus vulnérables (semis, BBCH 10 et BBCH 51, Tableau 1) ont été extraites du jeu de données, puisque la croissance des racines durant cette période déterminera 30 à 50 % du rendement potentiel final (Koenning 2000). Celles-ci serviront à évaluer le nombre de larves qui éclosent et le maintien du synchronisme entre la situation passée et future (voir section suivante). Les dates d'atteinte des stades BBCH 65 et BBCH 89 ont également été extraites afin d'observer l'évolution du synchronisme et la possibilité du NKS de poursuivre son développement après l'atteinte de la maturité et la récolte.

Pour la punaise marbrée, les différents paramètres requis pour le modèle de degrés-jours ont été implantés dans le logiciel CIPRA pour permettre la prédiction des trois stades de développement (« Début de ponte », « Premières nymphes » et « Premiers adultes ») en fonction des données météorologiques mesurées. À la suite d'évaluations préliminaires des prédictions des différents stades, la date de début des cumuls thermiques (degrés-jours) a été fixée au 1^{er} mai pour l'ensemble des régions du sud du Québec. Vu que des observations de populations de punaises marbrées n'étaient pas disponibles, il n'a pas été possible de calibrer les prédictions du modèle sous les conditions climatiques actuelles du Québec.

Pour le ver de l'épi, les différents paramètres requis pour le modèle degrés-jours ont été implantées dans le logiciel CIPRA pour permettre la prédiction des quatre stades de développement (« Début de ponte », « Premières larves », « Premières pupes » et « Premiers adultes ») en fonction des données météorologiques mesurées. Selon les premières adultes de ver de l'épi sont capturés normalement au cours du mois d'août au Québec. La date de début des cumuls thermiques (degrés-jours) a donc été fixée au 1^{er} août pour le ver de l'épi pour l'ensemble des régions du sud du Québec, mais cette date d'arrivée pourrait être plus précoce dans le futur. Vu que des observations de populations de vers de l'épi n'étaient pas disponibles, il n'a pas été possible de calibrer les prédictions du modèle sous nos conditions.

Objectif 4 : Les cartes réalisées dans le cadre de ce projet, de même que des fiches d'information sur les principales EEE seront mises à la disposition des différents intervenants sur la plateforme de diffusion Agri-Réseau. Des activités de vulgarisation ont également été réalisées afin de présenter les enjeux soulevés par ce projet. Finalement, une ou deux publications scientifiques seront rédigées afin de diffuser les résultats de ces travaux.

5. Résultats

Revue de littérature

À l'heure actuelle, 333 espèces s'attaquant au soya ont été référencées à travers le monde. Toutes les données recueillies dans le cadre de la revue de littérature sont présentées à l'annexe 3. Parmi ces espèces, on retrouvait une vaste majorité d'arthropodes (206 espèces), suivie par les mycètes (champignons, 51 espèces), les nématodes (51 espèces ou genres), les virus (14 espèces), les bactéries (8 espèces) et les gastéropodes (3 espèces) (Figure 2).

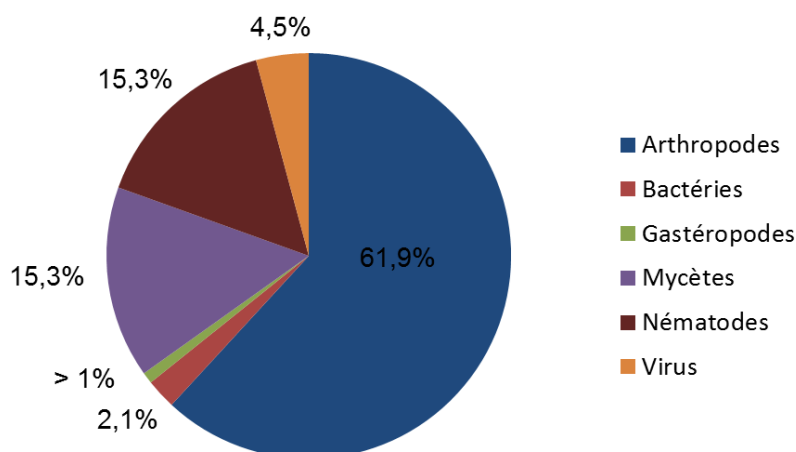


Figure 2. Répartition des ravageurs du soya en fonction de leur groupe taxonomique.

Parmi ces espèces, une grande majorité n'ont été enregistrées que de manière sporadique et ne semblent pas engendrer de dommages substantiels dans les cultures de soya (75%, soit 250 espèces). On retrouve néanmoins des espèces qui peuvent causer des pertes importantes aux cultures (11%, soit 36 espèces) alors que les autres espèces (14%, soit 47 espèces) sont susceptibles d'engendrer des dommages partiels, souvent associés à des pertes économiques mineures.

Parmi toutes ces espèces, nous pouvons distinguer différentes classes :

Tout d'abord, les espèces déjà établies au Québec, que ce soit en champ ou en serre sur d'autres plantes que le soya, depuis de nombreuses années ou plus récemment. Ces dernières représentent environ 46% du total des espèces recensées, dont le puceron du soya *Aphis glycines* (Hemiptera: Aphididae), responsable des plus grosses pertes économiques en

Amérique du Nord (Tilmon et al. 2011). Plus spécifiquement, la très grande majorité des virus, bactéries et champignons présents sur cette liste est déjà implantée au Québec.

Ensuite, les espèces présentes uniquement sous des climats tropicaux et qui n'ont pas le potentiel de s'établir au Québec au cours des prochaines décennies. Essentiellement parce qu'elles ne pourront rencontrer les conditions climatiques favorables à leur développement, entre autre durant la période hivernale. Il s'agit très majoritairement d'arthropodes (96%) qui représentent environ 45% du total des espèces (150 espèces).

Puis, celles dont l'aire de répartition s'accroît vers le nord en Amérique du Nord et qui sont actuellement implantées dans des régions proches et qui pourraient naturellement s'implanter au Québec à la faveur d'un réchauffement climatique. On peut notamment identifier la punaise marbrée *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae), introduite en 1996 en Pennsylvanie et que l'on retrouve aujourd'hui de la Floride à l'Ontario (Zhu et al. 2012).

Il y a aussi les espèces présentes sous des climats similaires à ceux du Québec mais qui ne devraient s'implanter qu'en cas d'introductions accidentelles liées aux activités humaines (notamment les échanges commerciaux depuis l'Asie). Par exemple, le lépidoptère *Leguminivora glycinivorella*¹ (Lepidoptera: Tortricidae) constitue l'un des principaux ravageurs du soya en Asie, certaines populations vivant sous un climat proche de celui du sud du Québec (Sakagami et al. 1985).

Finalement, il y a les espèces qui parviennent sous nos latitudes seulement au cours de l'été, via une migration estivale, et qui arriveront de plus en plus tôt au Québec grâce au CC, occasionnant des dégâts plus importants au soya à la suite d'infestations plus hâtives en saison. C'est le cas de diverses espèces d'insectes, notamment des lépidoptères, et de champignons.

De cette revue de littérature, nous avons dressé une liste de treize espèces susceptibles de s'établir dans la culture de soya au Québec dans un avenir proche, que ce soit dans le contexte de changement climatique ou d'introduction accidentelle sur le territoire, et de causer des pertes économiques notables, estimées selon les dommages enregistrés dans d'autres parties du monde.

Parmi ces espèces, huit étendent actuellement leur aire de répartition vers le nord et sont présentes dans des régions proches du Québec, voire déjà arrivées au Québec très récemment. Les mécanismes de dispersion spécifiques à chacune de ces espèces, ainsi que la rapidité du phénomène, demeurent peu connus. La progression sur le territoire peut-être plus ou moins lente et continue lorsque les organismes se propagent par contamination de contact (champignons) et se déplacent au sol ou par de courts vols (nématodes et arthropodes). Les processus sont accélérés et saltatoires lorsque les organismes peuvent se disperser par l'entremise de courants aériens. Finalement, les activités humaines, dont les échanges commerciaux, contribuent à l'augmentation de l'aire de répartition des espèces qui progressent vers et à l'intérieur du Québec. On identifie ainsi:

- La punaise marbrée, *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae). Originaires d'Asie, elle est aujourd'hui largement répandue aux États-Unis et a été détectée pour la première fois en Ontario en 2011 (Zhu et al. 2012). Au Québec, bien que 2 individus aient été détectés dans du matériel importé, aucune population n'a été répertoriée en milieu naturel (Légaré et al. 2013). En Pennsylvanie, des pertes de rendement de soya

supérieures à 50% lui ont été attribuées (Leskey et al. 2012). Elle s'attaque également aux fruits en vergers.

- La punaise verte ou ponctuée, *Nezara viridula* (Hemiptera: Pentatomidae). Commune dans les régions tropicales et subtropicales, elle progresse rapidement vers les zones tempérées grâce à l'augmentation des températures. Présente aujourd'hui jusqu'en Ohio, des individus ont été observés plus au nord. En Australie, des pertes de production de 183 à 492 kg/ha de soya ont été notées (Brier et Rogers 1991), soit des pertes pouvant atteindre 20% du rendement moyen (environ 2,5t/ha).
- La punaise du kudzu, *Megacopta cribraria* (Hemiptera: Plataspididae). Commune dans le sud-est des États-Unis, elle est dorénavant établie en Virginie et son expansion vers le nord est étroitement surveillée. En laboratoire, des chutes de rendement de près de 60% ont été mesurées sur des plants de soya infestés par ce ravageur (Seiter et al. 2012).
- Le nématode à kyste du soya, *Heterodera glycines* (Tylenchida: Heteroderidae). Commun aux États-Unis, il a été retrouvé au Québec en 2013 dans plusieurs échantillons (Mimee et al. 2014) et devrait voir son aire de répartition s'étendre avec une augmentation des températures. Principal responsable de pertes économiques dans la culture du soya dans de nombreuses régions du monde, il cause à lui seul plus de 50% des pertes enregistrées aux États-Unis (Wrather et al. 2001), les pertes de rendement associées pouvant atteindre 80%.
- Le nématode réniforme, *Rotylenchulus reniformis* (Tylenchida: Hoplolaimidae). Commun dans le sud des États-Unis, il est aujourd'hui bien implanté en Virginie et sa présence a été notée plus au nord, notamment en Ohio. Bien que les dégâts imputables soient difficiles à quantifier en raison d'une coexistence avec *H. glycines*, on considère qu'il s'agit d'un ravageur majeur (Rebois et Johnson 1973).
- Le « Bean pod mottle virus » (Comoviridae). Commun dans le sud des États-Unis, il est aujourd'hui établi en Ohio, au Wisconsin et a été noté en Ontario. Responsable de pertes de rendement de plus de 50%, il est véhiculé par un insecte, le coléoptère *Cerotoma trifurcata*, présent au Québec (Giesler et al. 2002).
- Le champignon *Cercospora sojina* (Capnodiales: Mycosphaerellaceae), responsable de la cercosporose du soya, ou « Frog-eye leaf spot ». Commun dans le sud des États-Unis, il est aujourd'hui établi en Ohio et en Illinois et retrouvé en Ontario où il ne cause pas encore de dégâts importants. Cependant les pertes causées par ce champignon dans le nord-est des États-Unis augmentent avec l'accroissement des températures. Des pertes de récolte de plus de 35% ont ainsi été enregistrées en Ohio (Cruz et Dorrance 2009).
- Le champignon *Phakopsora pachyrhizi* (Uredinales: Phakopsoraceae), responsable de la rouille asiatique du soya. Arrivée d'Asie en 2004, cette espèce ne peut survivre l'hiver que sous des climats subtropicaux et tropicaux (Floride, Louisiane...) mais se retrouve l'été jusqu'en Ontario. Selon la date d'arrivée du champignon, les pertes de rendement varient et peuvent atteindre jusqu'à 80% dans le cas d'une infection précoce (Twizeyimana et al. 2009).

Parmi les treize espèces, quatre sont déjà référencées au Québec puisqu'elles y migrent au cours de l'été. Actuellement, elles arrivent tard dans la saison et en trop faible quantité pour engendrer des pertes substantielles dans la culture du soya. Toutefois, une arrivée plus précoce pourrait éventuellement conduire à des pertes importantes. Voici ces espèces :

- Le ver de l'épi du maïs, *Helicoverpa zea* (Lepidoptera: Noctuidae). Migrateur tardif au Québec, il ne semble pas survivre à l'hiver au-delà de l'Ohio. Plus gros ravageur du soya en Virginie où sa présence en début de saison engendre des traitements chimiques onéreux (Herbert et al. 1992). Ce ravageur est bien connu au Québec puisqu'il peut causer des dommages importants dans la culture du maïs sucré. Aucun dommage lié à cet insecte n'a toutefois été répertorié à l'heure actuelle dans la culture du soya au Québec.
- L'arpenreuse du soya, *Chrysodeixis includens* (Lepidoptera: Noctuidae). On la retrouve à l'extrême sud du Québec et en Ontario. Plus gros défoliateur de la culture du soya dans le sud des États-Unis, les dégâts qu'elle génère dans ce pays augmentent depuis quelques années (Plantwise 2014).
- La noctuelle verdoyante, *Heliothis virescens* (Lepidoptera: Noctuidae). Commune dans les régions subtropicales et tropicales, elle connaît une expansion rapide, se retrouvant dorénavant établie au nord de la Virginie. Il s'agit d'un défoliateur majeur du soya (Boldt et al. 1975). L'espèce est fréquemment observée au Québec durant la saison estivale.
- La chenille du haricot velu, *Anticarsia gemmatalis* (Lepidoptera: Noctuidae). Commune au sud des États-Unis, elle est aujourd'hui établie dans le Wisconsin. Les dommages causés peuvent atteindre 30% sur certaines variétés de soya, et les traitements requis en début de saison limitent la régulation naturelle via une forte mortalité des prédateurs et parasitoïdes (Lourençao et al. 1999).

Enfin, une espèce est déjà présente en serres au Québec et ne peut survivre à l'extérieur durant l'hiver. Il s'agit de l'aleurode du tabac ou du cotonnier, *Bemisia tabaci* (Hemiptera: Aleyrodidae). Si les dégâts causés au soya sont généralement faibles, des pullulations au Mexique dues à des conditions climatiques favorables ont conduit à l'abandon de 100 000 ha cultivés en 5 ans (Oliveira et al. 2001). L'aleurode du tabac est également porteur de virus néfastes à la culture du soya (Oliveira et al. 2001). Les modifications du climat pourraient lui permettre de compléter son cycle hors serre au Québec.

À cette liste, nous pouvons ajouter quatre espèces qui auraient les capacités de s'implanter au Québec dans les années à venir en cas d'introductions par les humains. L'espèce la plus à risque est probablement la tordeuse du soya, *Leguminivora glycinivorella* (Lepidoptera: Tortricidae), un des principaux ravageurs en Asie (Sakagami et al. 1985). Deux autres espèces asiatiques, « Bean bug », *Riptortus clavatus* (Heteroptera: Alydidae) (Kadozawa et Santa 1981) et *Matsumuraeses phaseoli* (Lepidoptera: Tortricidae) (Qu et Kogan 1984) sont également des ravageurs importants en Asie qui pourraient s'implanter au Québec. La pyrale du haricot, *Etiella zinckenella* (Lepidoptera: Pyralidae) représente la dernière espèce à surveiller. Ce lépidoptère d'origine asiatique est aujourd'hui présent au sud des États-Unis, quelques individus ayant également été échantillonnés au Manitoba et en Saskatchewan. Pour une raison inconnue, ce ravageur majeur du soya en Asie ne s'attaque pas à cette culture en Amérique du Nord (Plantwise 2014). Dans l'éventualité où la souche de lépidoptères établis en Amérique du Nord retrouverait les mêmes préférences alimentaires que celle présente en Asie, des problèmes phytosanitaires seraient à envisager. Aucune fiche technique n'a été produite pour *M. phaseoli* puisqu'il y a très peu d'information sur le développement, l'écologie et le statut de ravageur chez cette espèce.

Modélisation du soya

Les cartes présentées aux figures 3 à 5 illustrent les potentialités régionales d'atteinte de la maturité, simulées pour la production de soya au Québec, groupe de maturité 1 (GM1). Pour le passé récent (1971-2000), le potentiel de maturité du soya se situe surtout dans le sud-ouest du Québec (Figure 3). Pour le futur proche, cette capacité pourrait augmenter significativement, surtout dans l'éventualité où les dates du premier gel automnal mortel deviennent plus tardives. Les dates d'atteinte de la maturité du soya (GM1) seraient devancées de 10 à 15 jours dans la majorité des régions selon les scénarios climatiques inférieur et supérieur (Figure 4 et 5).

Dates moyennes de la maturité du soya basées sur la période 1971-2000

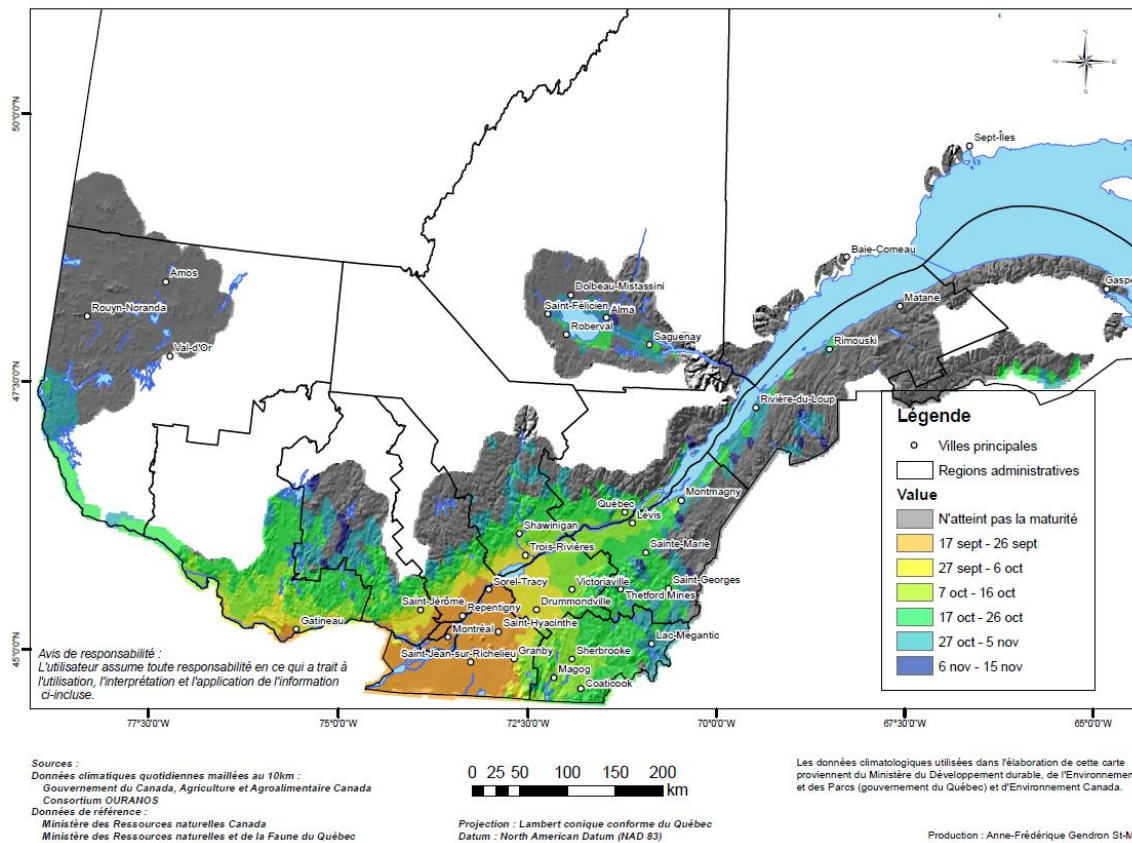


Figure 3. Date moyenne d'atteinte de la maturité du soya (Stade BBCH 89) durant le passé récent (1971-2000) dans les régions agricoles du Québec.

Dates d'atteinte du stade BBCH 89 du soya : Scénario de changement inférieur (2041-2070)

Période de référence : 1971-2000

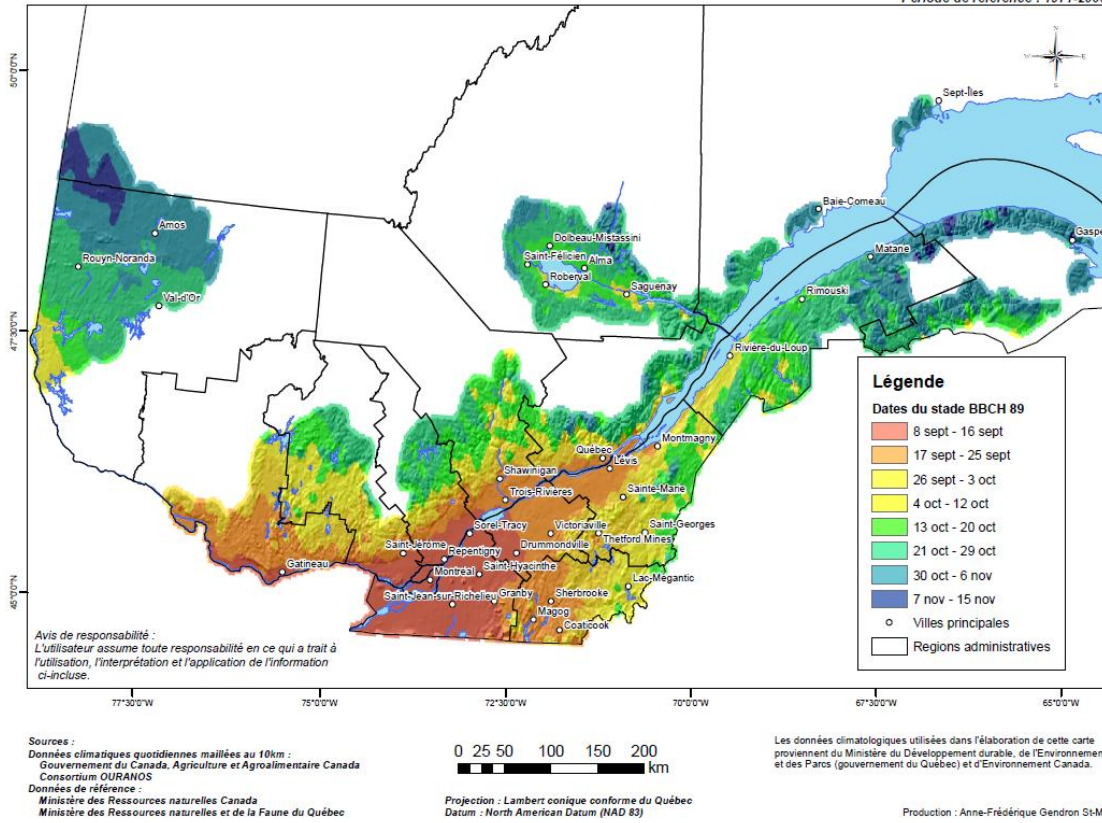
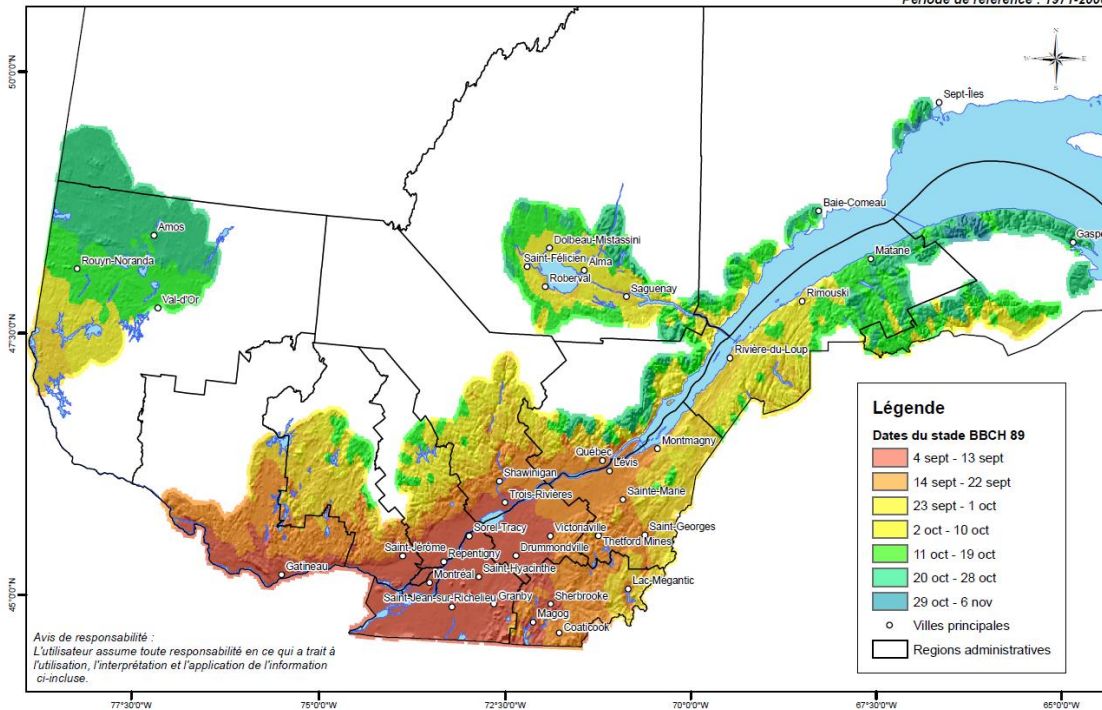


Figure 4. Date moyenne d'atteinte de la maturité du soya selon les scénarios de changements inférieurs pour le futur proche (2041-2070) dans les régions agricoles du Québec. Ces projections climatiques proviennent de 14 scénarios climatiques (voir Annexe 2).

Dates d'atteinte du stade BBCH 89 du soya : Scénario de changement supérieur (2041-2070)

Période de référence : 1971-2000



Avis de responsabilité :
L'utilisateur assume toute responsabilité en ce qui a trait à l'utilisation, l'interprétation et l'application de l'information ci-incluse.

Sources :
Données climatiques quotidiennes maillées au 10km :
Gouvernement du Canada, Agriculture et Agroalimentaire Canada
Consortium DURANOS
Données de référence :
Ministère des Ressources naturelles Canada
Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec

0 25 50 100 150 200
km

Projection : Lambert conique conforme du Québec
Datum : North American Datum (NAD 83)

Les données climatologiques utilisées dans l'élaboration de cette carte proviennent du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (gouvernement du Québec) et d'Environnement Canada.

Production : Anne-Frédérique Gendron S.M.

Figure 5. Date moyenne d'atteinte de la maturité du soya selon les scénarios de changements supérieurs pour le futur proche (2041-2070) dans les régions agricoles du Québec. Ces projections climatiques proviennent de 14 scénarios climatiques (voir Annexe 2).

Modélisation du nématode à kyste du soya

Les cartes présentées aux figures 6 à 8 illustrent le nombre potentiel simulé de générations du nématode à kyste du soya. Une génération s'étend du début de la production d'œufs au début de la production d'œufs de la génération suivante. Pour le passé récent, jusqu'à trois générations sont simulées dans la zone actuelle de production du soya, surtout dans le sud-ouest du Québec (Figure 6). Pour le futur proche, une à deux générations supplémentaires pourraient être produites dans cette région selon les scénarios de changements inférieur et supérieur (Figure 7 et 8).

Nombre moyen de générations de nématodes à kyste du soya produites durant une saison de croissance de soya durant le passé récent (1971-2000)

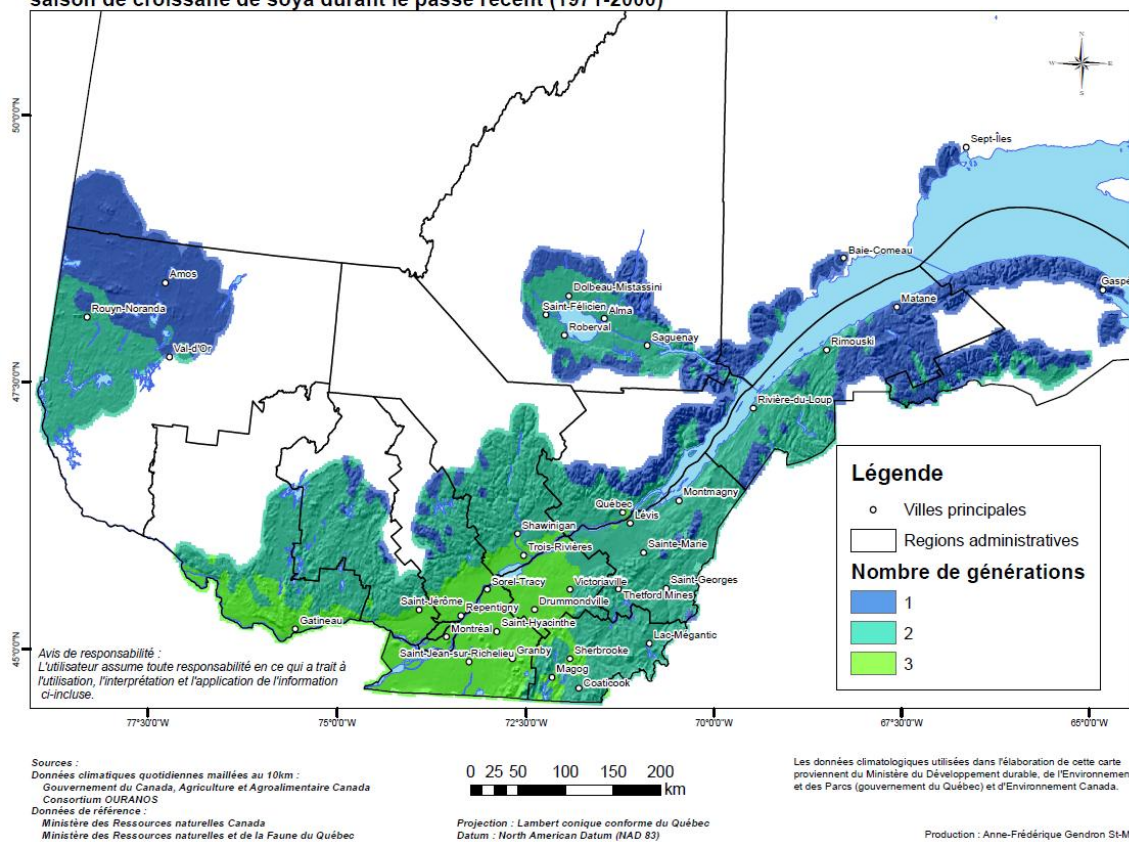
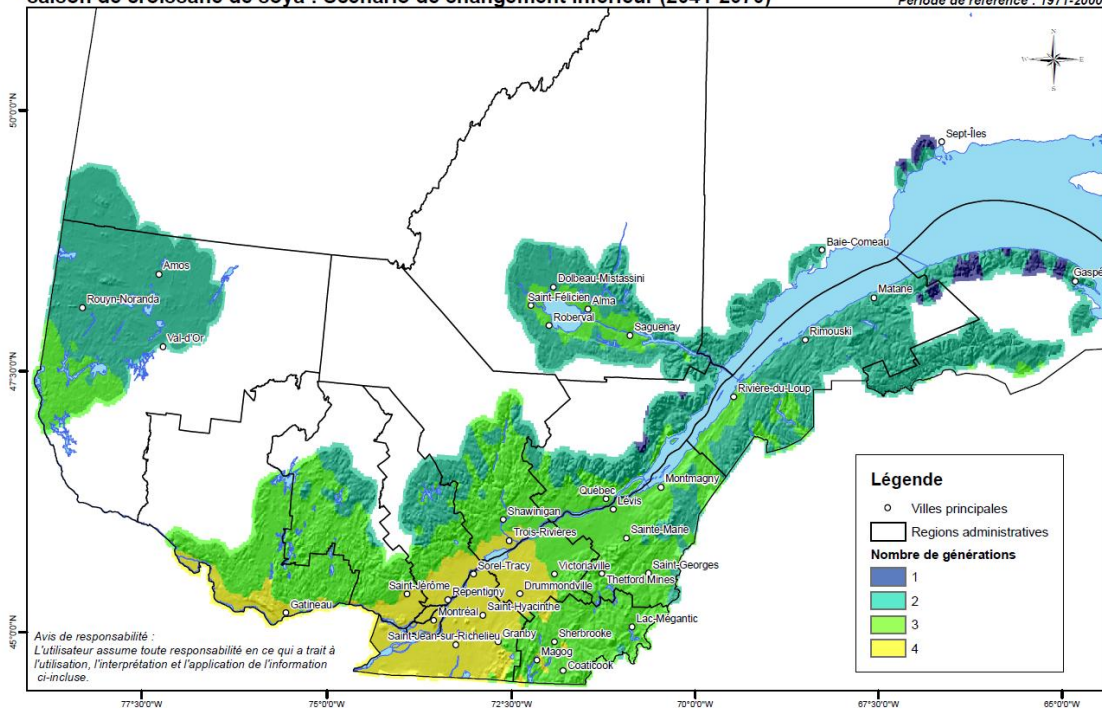


Figure 6. Nombre moyen de générations du nématode à kyste du soya (NKS) par saison de croissance durant le passé récent (1971-2000) dans les régions agricoles du Québec.

Nombre moyen de générations de nématodes à kyste du soja produites durant une saison de croissance de soja : Scénario de changement inférieur (2041-2070)

Période de référence : 1971-2000



Avis de responsabilité :
L'utilisateur assume toute responsabilité en ce qui a trait à l'utilisation, l'interprétation et l'application de l'information ci-incluse.

Sources :
Données climatiques quotidiennes mailleées au 10km :
Gouvernement du Canada, Agriculture et Agroalimentaire Canada
Consortium OURANOS
Données de référence :
Ministère des Ressources naturelles Canada
Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec

0 25 50 100 150 200
km

Projection : Lambert conique conforme du Québec
Datum : North American Datum (NAD 83)

Les données climatiques utilisées dans l'élaboration de cette carte proviennent du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (gouvernement du Québec) et d'Environnement Canada.

Production : Anne-Frédérique Gendron S.H.

Figure 7. Nombre moyen de générations du nématode à kyste du soja par saison de croissance selon les scénarios de changements inférieurs pour le futur proche (2041-2070) dans les régions agricoles du Québec. Ces projections climatiques proviennent de 14 scénarios climatiques (voir Annexe 2).

Nombre moyen de générations de nématodes à kyste du soya produites durant une saison de croissance de soya : Scénario de changement supérieur (2041-2070)

Période de référence : 1971-2000

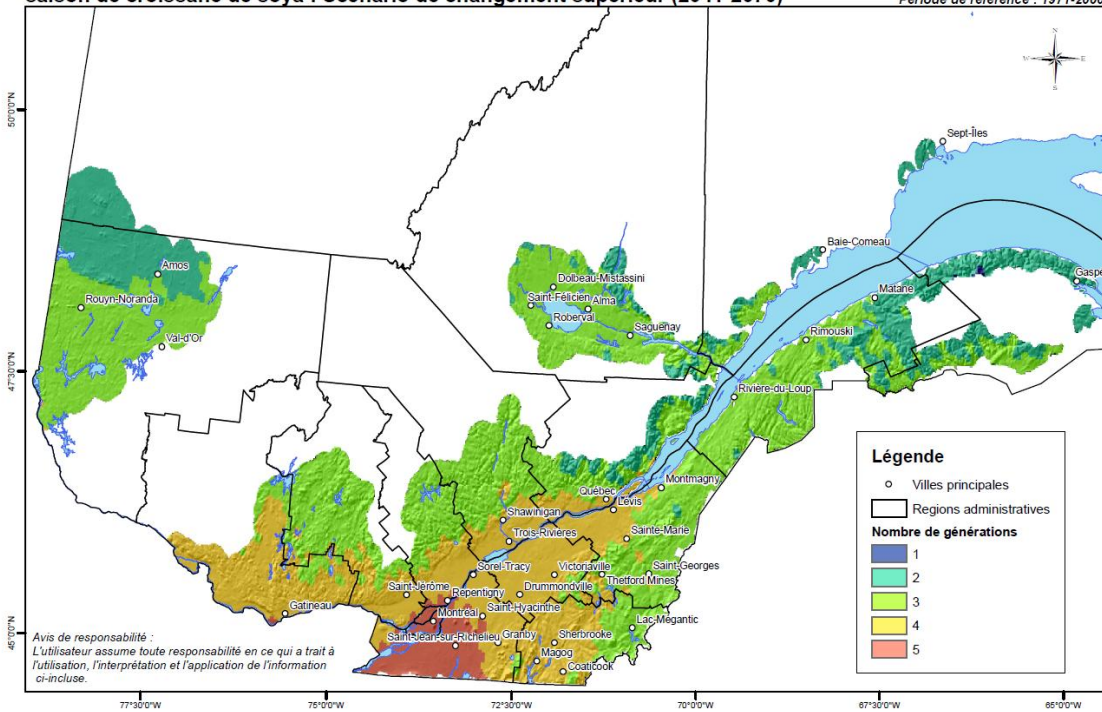


Figure 8. Nombre moyen de générations du nématode à kyste du soya par saison de croissance selon les scénarios de changements supérieurs pour le futur proche (2041-2070) dans les régions agricoles du Québec. Ces projections climatiques proviennent de 14 scénarios climatiques (voir Annexe 2).

Modélisation de la punaise marbrée

Les nymphes et les adultes de la punaise marbrée causent les dommages sur les grains en maturation du soya. Le stade adulte est le stade hivernant de ce ravageur. Sa capacité à s'établir dans une région est donc liée à l'atteinte de ce stade avant la saison hivernale. Les cartes présentées aux figures 9 et 12 illustrent le potentiel actuel d'établissement de la punaise marbrée dans les régions agricoles du Québec. Selon le modèle prévisionnel utilisé, les premières pontes auraient lieu en moyenne entre le 25 juin et le 7 juillet dans les régions où le soya se cultive (Figure 9) si l'espèce était présente sur le territoire. Toutefois, l'espèce ne semble pas capable de s'établir au Québec puisque les premiers adultes hivernants n'apparaîtraient qu'1 à 2 années sur 10 dans la zone de production du soya en Montérégie (Figure 12).

Pour le futur proche, le potentiel d'établissement de la punaise s'accroîtrait significativement dans plusieurs régions agricoles du Québec. Les premières pontes devraient débuter en Montérégie entre les 14 et 24 juin pour le scénario de changement inférieur (Figure 10) et entre les 9 et 18 juin pour le scénario de changement supérieur (Figure 11). Ceci représente entre 10 et 15 jours plus tôt que la moyenne obtenue pour le passé récent. De plus, les premiers adultes de la punaise marbrée (génération d'été) pourraient coloniser plusieurs régions agricoles du sud du Québec (Figures 13 et 14) où les potentialités du soya seront également en progression, ce qui serait une nette progression par rapport au passé récent.

Dates moyennes de la première ponte de la punaise marbrée basées sur la période 1971-2000

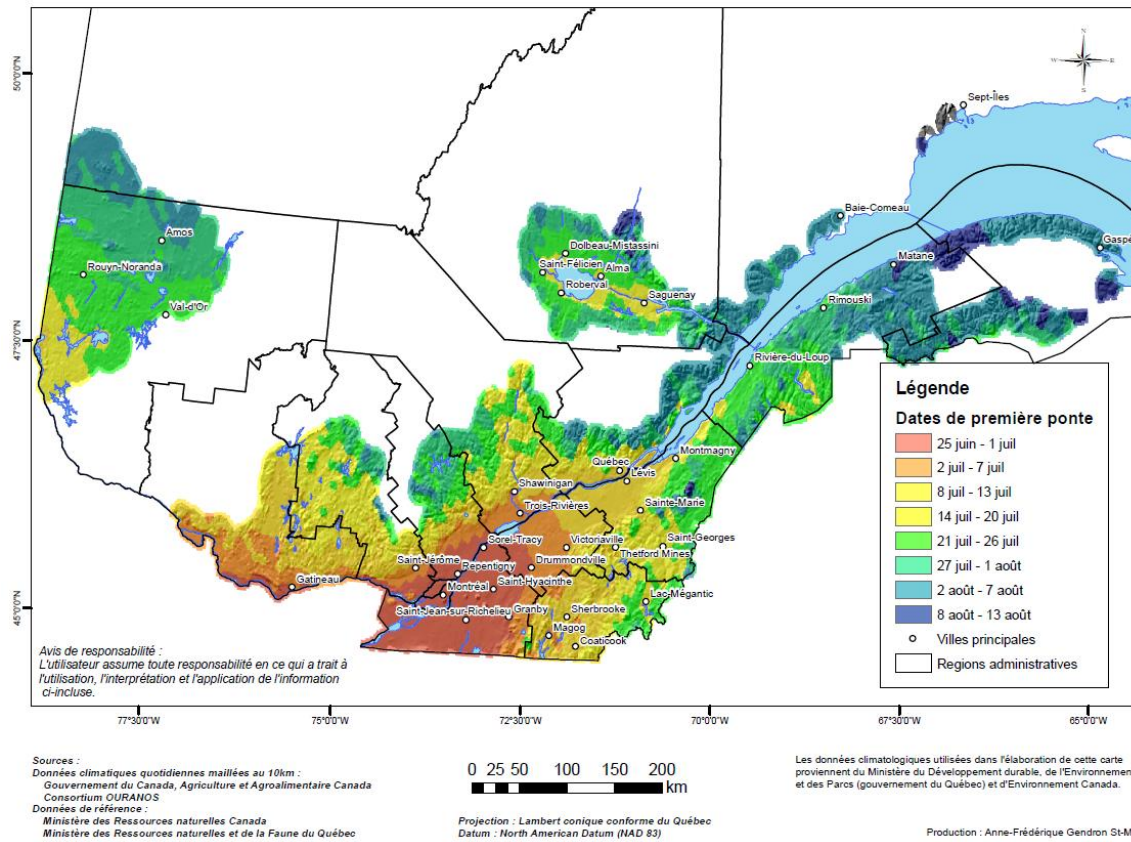
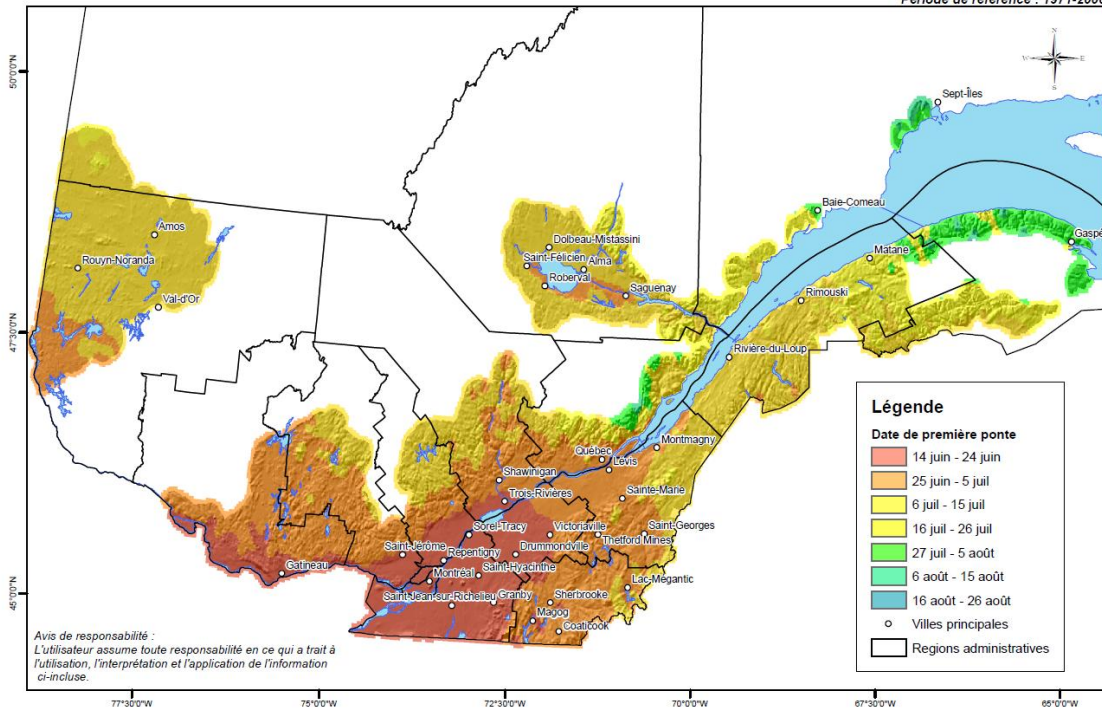


Figure 9. Date moyenne du début de la ponte de la punaise marbrée durant le passé récent (1971-2000) dans les régions agricoles du Québec.

Dates moyennes de ponte de la punaise marbrée : Scénario de changement inférieur (2041-2070)

Période de référence : 1971-2000



Sources :
Données climatiques quotidiennes maillées au 10km :
Gouvernement du Canada, Agriculture et Agroalimentaire Canada
Consortium OURANOS
Données de référence :
Ministère des Ressources naturelles Canada
Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec

0 25 50 100 150 200
km

Projection : Lambert conique conforme du Québec
Datum : North American Datum (NAD 83)

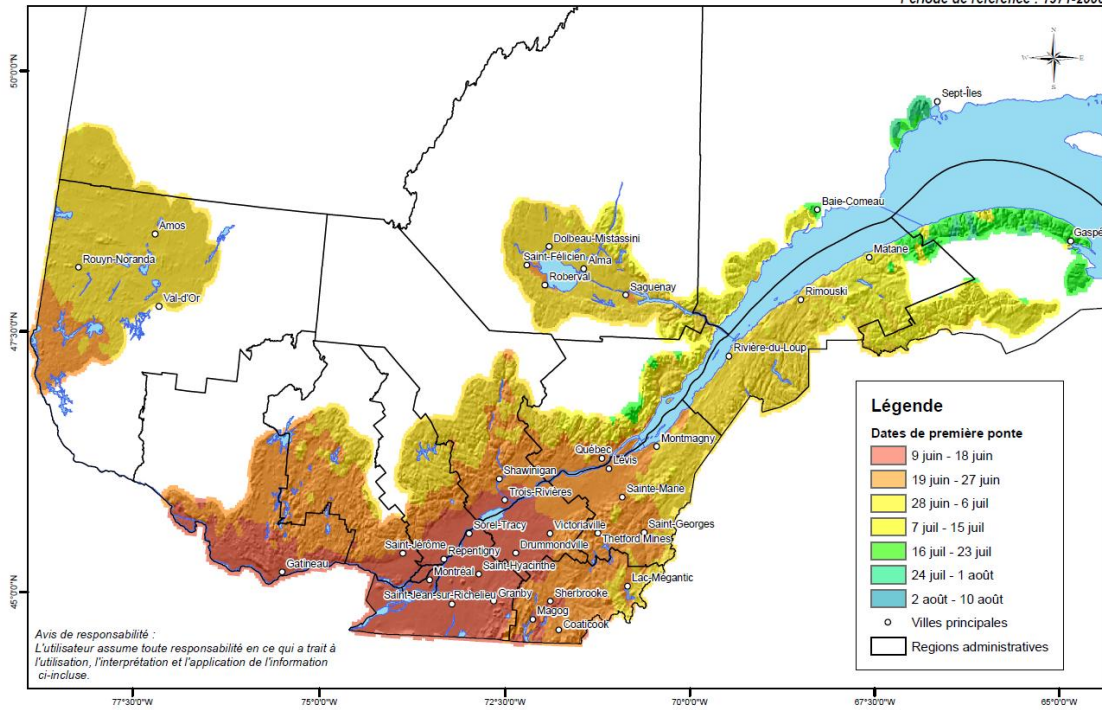
Les données climatiques utilisées dans l'élaboration de cette carte proviennent du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (gouvernement du Québec) et d'Environnement Canada.

Production : Anne-Frédérique Gendron S.M.

Figure 10. Date moyenne du début de la ponte de la punaise marbrée selon les scénarios de changements inférieurs pour le futur proche (2041-2070) dans les régions agricoles du Québec. Ces projections climatiques proviennent de 14 scénarios climatiques (voir Annexe 2).

Dates moyennes de ponte de la punaise marbrée : Scénario de changement supérieur (2041-2070)

Période de référence : 1971-2000



Sources :
Données climatiques quotidiennes maillées au 10km :
Gouvernement du Canada, Agriculture et Agroalimentaire Canada
Consortium OURANOS
Données de référence :
Ministère des Ressources naturelles Canada
Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec

0 25 50 100 150 200
km

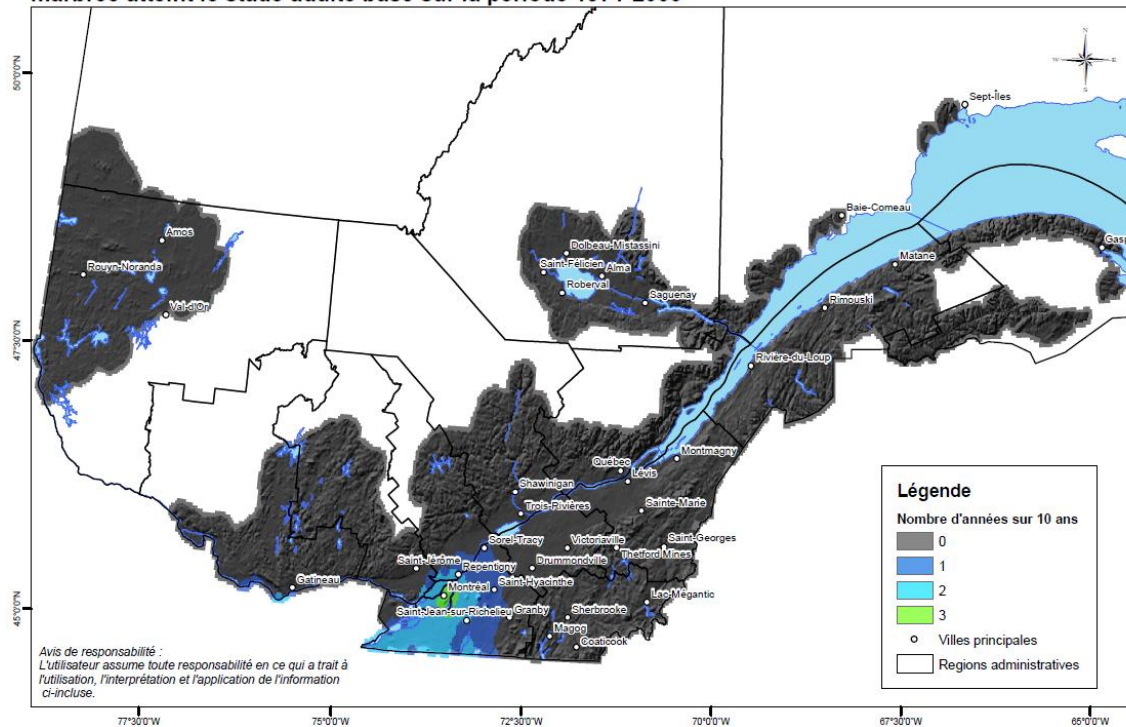
Projection : Lambert conique conforme du Québec
Datum : North American Datum (NAD 83)

Les données climatiques utilisées dans l'élaboration de cette carte proviennent du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (gouvernement du Québec) et d'Environnement Canada.

Production : Anne-Frédérique Gendron S.H.M.

Figure 11. Date moyenne du début de la ponte de la punaise marbrée selon les scénarios de changements supérieurs pour le futur proche (2041-2070) dans les régions agricoles du Québec. Ces projections climatiques proviennent de 14 scénarios climatiques (voir Annexe 2).

Nombre moyen d'années sur dix ans durant lesquelles la punaise marbrée atteint le stade adulte basé sur la période 1971-2000



Avis de responsabilité :
L'utilisateur assume toute responsabilité en ce qui a trait à l'utilisation, l'interprétation et l'application de l'information ci-incluse.

Sources :
Données climatiques quotidiennes maillées au 10km :
Gouvernement du Canada, Agriculture et Agroalimentaire Canada
Consortium OURANOS
Données de référence :
Ministère des Ressources naturelles Canada
Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec

0 25 50 100 150 200
km

Projection : Lambert conique conforme du Québec
Datum : North American Datum (NAD 83)

Les données climatiques utilisées dans l'élaboration de cette carte proviennent du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (gouvernement du Québec) et d'Environnement Canada.

Production : Anne-Frédérique Gendron St-M.

Figure 12. Nombre moyen d'années sur dix ans durant lesquelles la punaise marbrée (génération d'été) atteint le stade adulte pour le passé récent (1971-2000) dans les régions agricoles du Québec.

Dates moyennes d'atteinte du stade adulte de la punaise marbrée : Scénario de changement inférieur (2041-2070)

Période de référence : 1971-2000

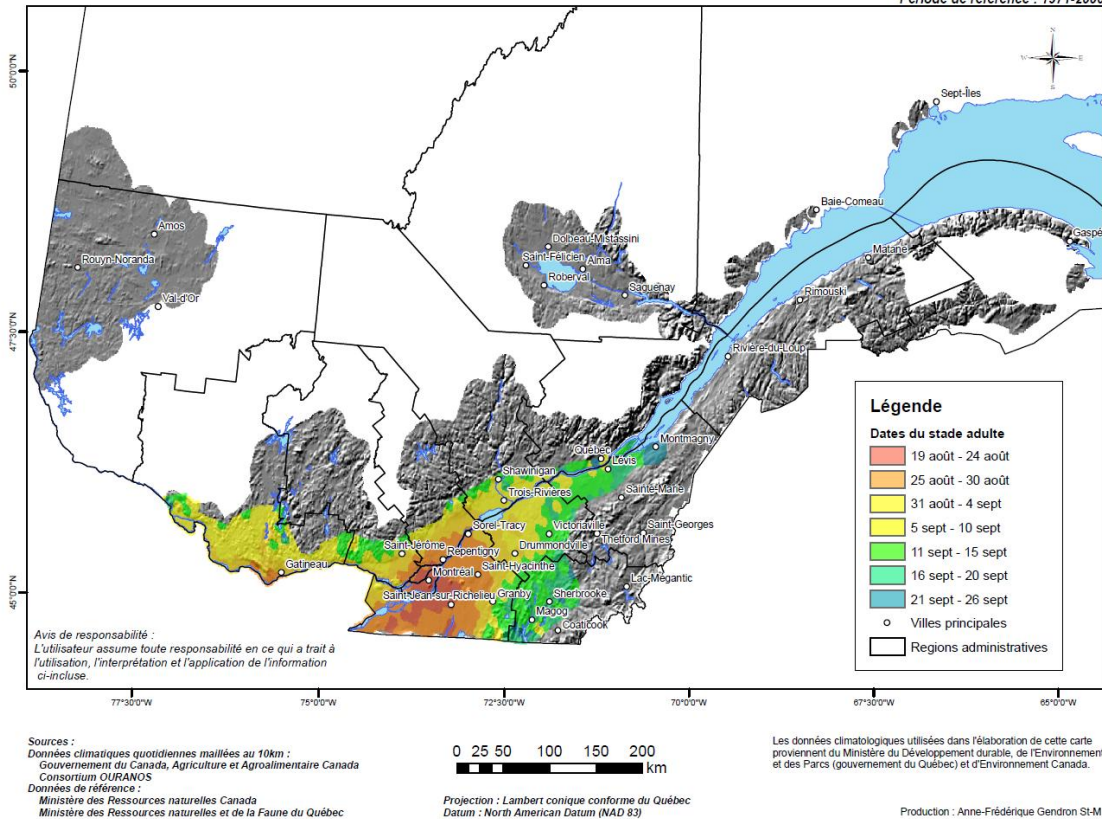


Figure 13. Date moyenne d'apparition des premiers adultes de la punaise marbrée (génération d'été) selon les scénarios de changements inférieurs pour le futur proche (2041-2070) dans les régions agricoles du Québec. Ces projections climatiques proviennent de 14 scénarios climatiques (voir Annexe 2). Dans les zones associées à des dates moyennes d'apparition, le stade adulte a été atteint au moins 8 années sur 10.

Dates moyennes d'atteinte du stade adulte de la punaise marbrée : Scénario de changement supérieur (2041-2070)

Période de référence : 1971-2000

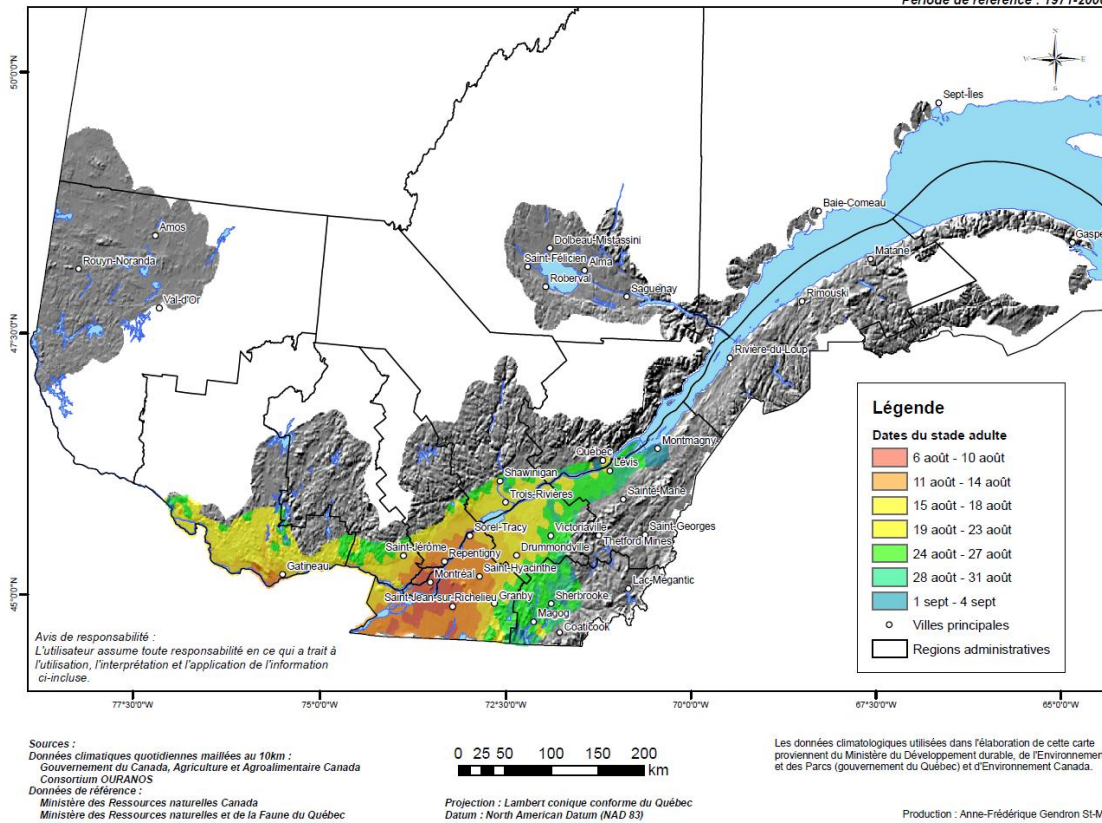


Figure 14. Date moyenne d'apparition des premiers adultes de la punaise marbrée (génération d'été) selon les scénarios de changements supérieurs pour le futur proche (2041-2070) dans les régions agricoles du Québec. Ces projections climatiques proviennent de 14 scénarios climatiques (voir Annexe 2). Dans les zones associées à des dates moyennes d'apparition, le stade adulte a été atteint au moins 8 années sur 10.

Modélisation du ver de l'épi

Les larves du ver de l'épi causent les dommages principaux sur les jeunes gousses du soya. Le stade pupes est le stade hivernant de ce ravageur. Sa capacité à s'établir dans une région est donc liée à l'atteinte de ce stade avant la saison hivernale. Les cartes présentées aux figures 15 et 18 illustrent le potentiel actuel d'établissement du ver de l'épi pour le passé récent dans les régions agricoles du Québec. Selon le modèle prévisionnel utilisé, qui présume une date d'arrivée migratoire des adultes le 1 août de chaque année, les premières larves apparaîtraient en moyenne entre le 14 et le 23 août dans les régions où le soya est cultivé (Figure 15). Toutefois, les premières pupes pourraient être formées 1 à 7 années sur 10 dans des zones de production du soya en Montérégie et Outaouais (Figure 18).

Pour le futur proche, le potentiel d'établissement du ver de l'épi s'accroîtrait significativement dans plusieurs régions agricoles du Québec. Les premières larves devraient émerger, par exemple en Montérégie, entre les 11 et 14 août pour le scénario de changement inférieur (Figure 16) et entre les 10 et 13 août pour le scénario de changement supérieur (Figure 17). Ceci représente entre 3 et 4 jours plus tôt que la moyenne obtenue pour le passé récent. Toutefois, il est fort probable que les vols migratoires de cette espèce soient aussi affectés par les changements climatiques, ce qui pourrait devancer la date d'arrivée dans les régions agricoles du Québec. De plus, les premières pupes du ver de l'épi pourraient être formées dans plusieurs régions agricoles du sud du Québec dès le début septembre (Figures 19 et 20), ce qui est une nette progression par rapport au passé récent.

Dates moyennes du stade larve du ver de l'épi basées sur la période 1971-2000

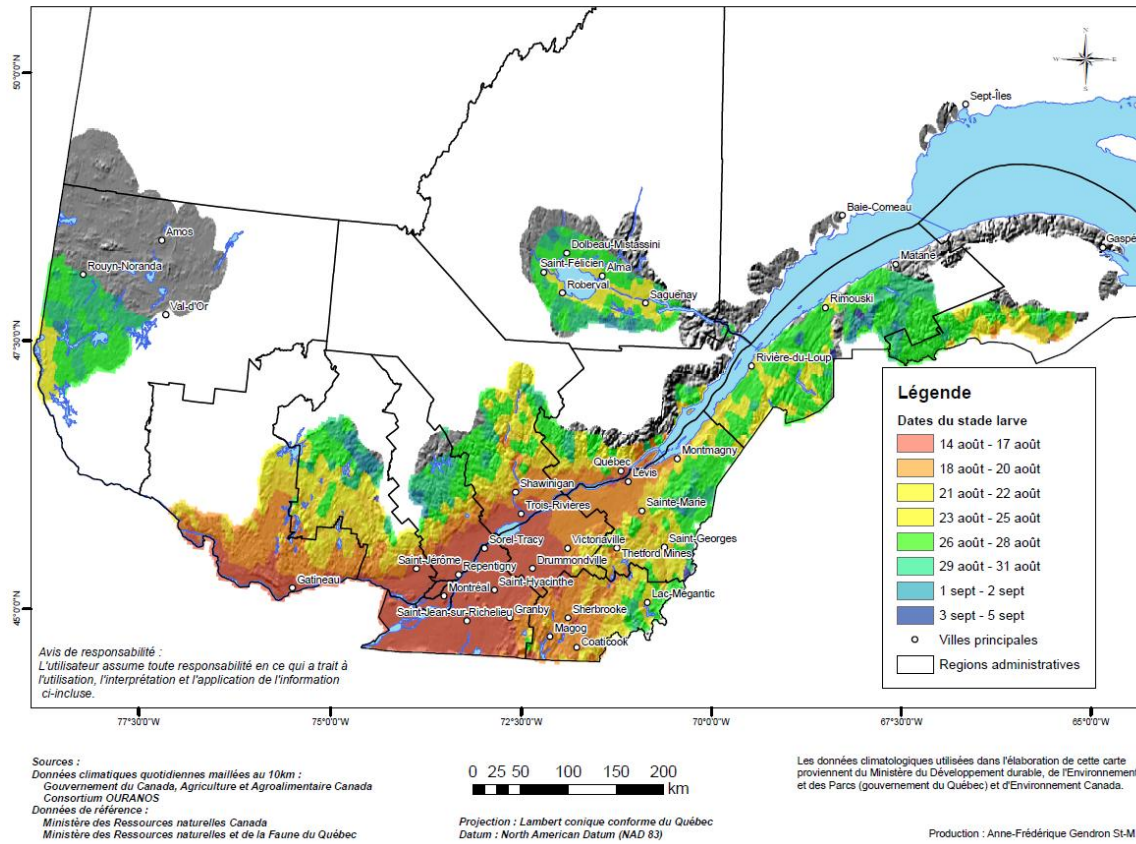
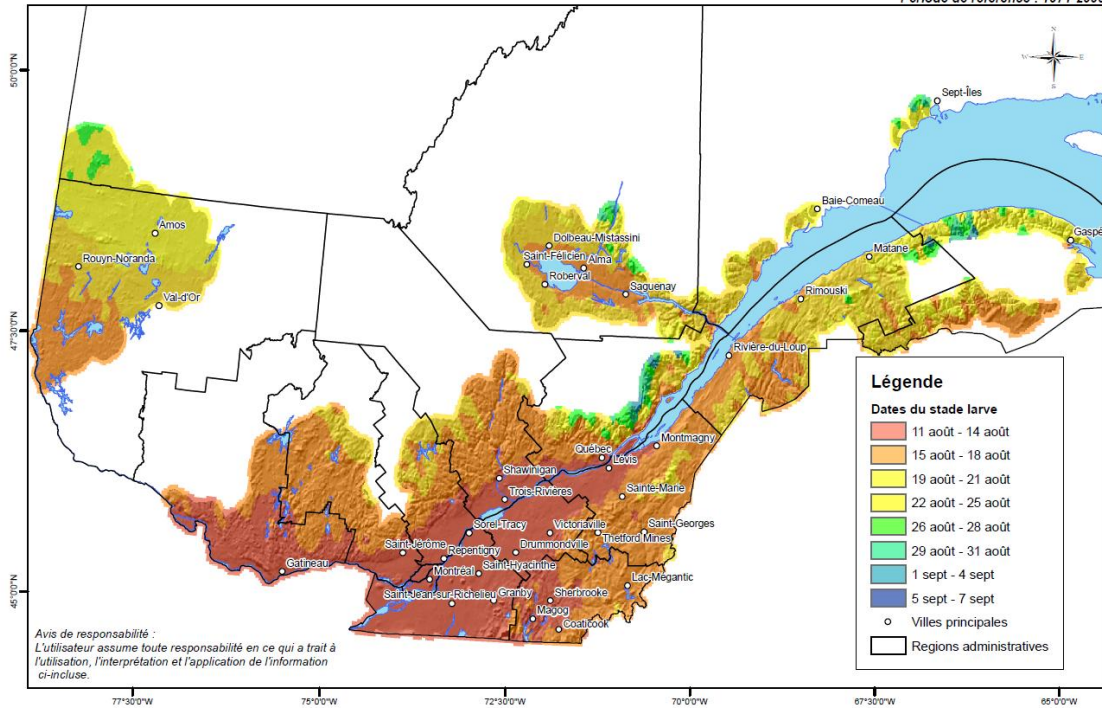


Figure 15. Date moyenne d'apparition des premières larves du ver de l'épi durant le passé récent (1971-2000) dans les régions agricoles du Québec.

Dates moyennes d'atteinte du stade larve du ver de l'épi : Scénario de changement inférieur (2041-2070)

Période de référence : 1971-2000



Sources :
Données climatiques quotidiennes maillées au 10km :
Gouvernement du Canada, Agriculture et Agroalimentaire Canada
Consortium OURANOS
Données de référence :
Ministère des Ressources naturelles Canada
Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec

0 25 50 100 150 200
km

Projection : Lambert conique conforme du Québec
Datum : North American Datum (NAD 83)

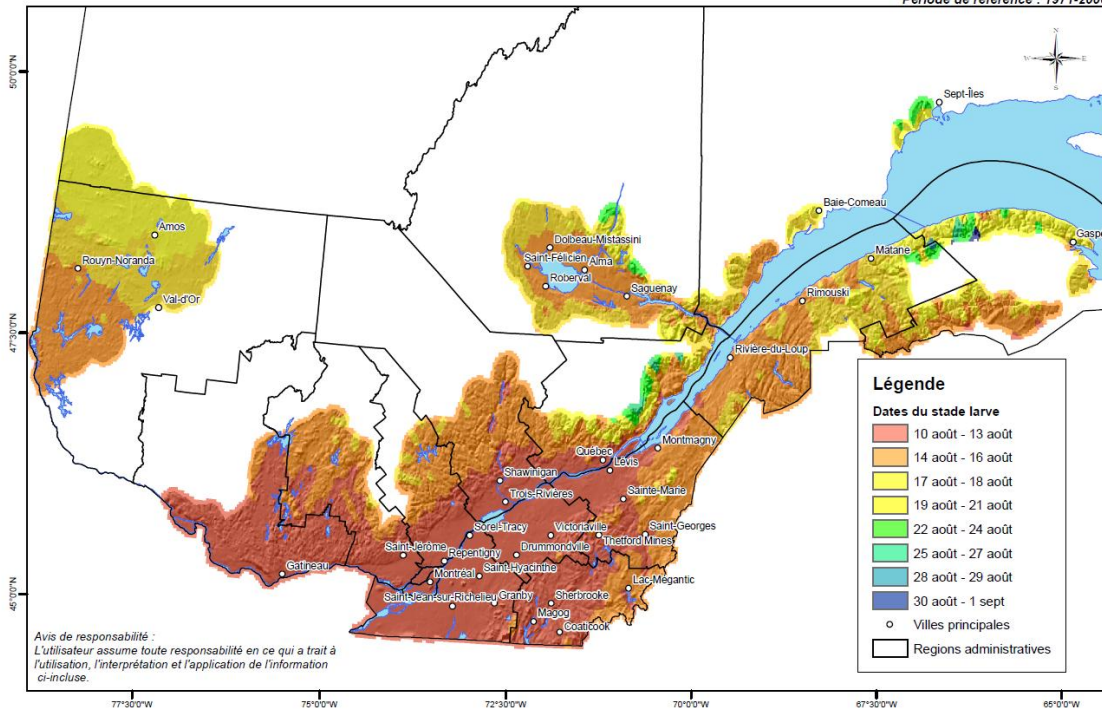
Les données climatiques utilisées dans l'élaboration de cette carte proviennent du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (gouvernement du Québec) et d'Environnement Canada.

Production : Anne-Frédérique Gendron S.H.M.

Figure 16. Date moyenne d'apparition des premières larves du ver de l'épi selon les scénarios de changements inférieurs pour le futur proche (2041-2070) dans les régions agricoles du Québec. Ces projections climatiques proviennent de 14 scénarios climatiques (voir Annexe 2).

Dates moyennes d'atteinte du stade larve du ver de l'épi : Scénario de changement supérieur (2041-2070)

Période de référence : 1971-2000



Sources :
Données climatiques quotidiennes maillées au 10km :
Gouvernement du Canada, Agriculture et Agroalimentaire Canada
Consortium OURANOS
Données de référence :
Ministère des Ressources naturelles Canada
Ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec

0 25 50 100 150 200
km

Projection : Lambert conique conforme du Québec
Datum : North American Datum (NAD 83)

Les données climatiques utilisées dans l'élaboration de cette carte proviennent du Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs (gouvernement du Québec) et d'Environnement Canada.

Production : Anne-Frédérique Gendron S.M.

Figure 17. Date moyenne d'apparition des premières larves du ver de l'épi selon les scénarios de changements supérieurs pour le futur proche (2041-2070) dans les régions agricoles du Québec. Ces projections climatiques proviennent de 14 scénarios climatiques (voir Annexe 2).

Nombre moyen d'années sur dix ans durant lesquelles le ver de l'épi atteint le stade pupe basé sur la période 1971-2000

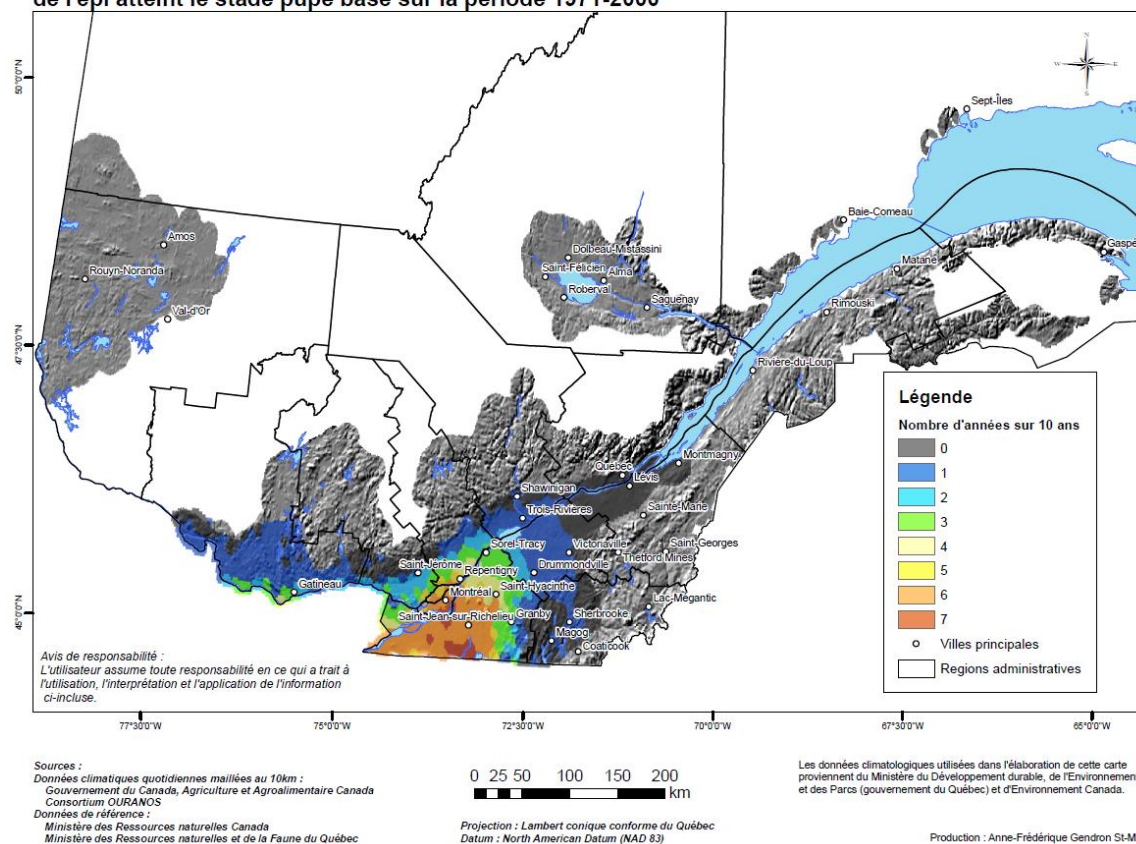


Figure 18. Nombre moyen d'années sur dix ans durant lesquelles le ver de l'épi atteint le stade pupe pour le passé récent (1971-2000) dans les régions agricoles du Québec.

Dates moyennes d'atteinte du stade pupes du ver de l'épi : Scénario de changement inférieur (2041-2070)

Période de référence : 1971-2000

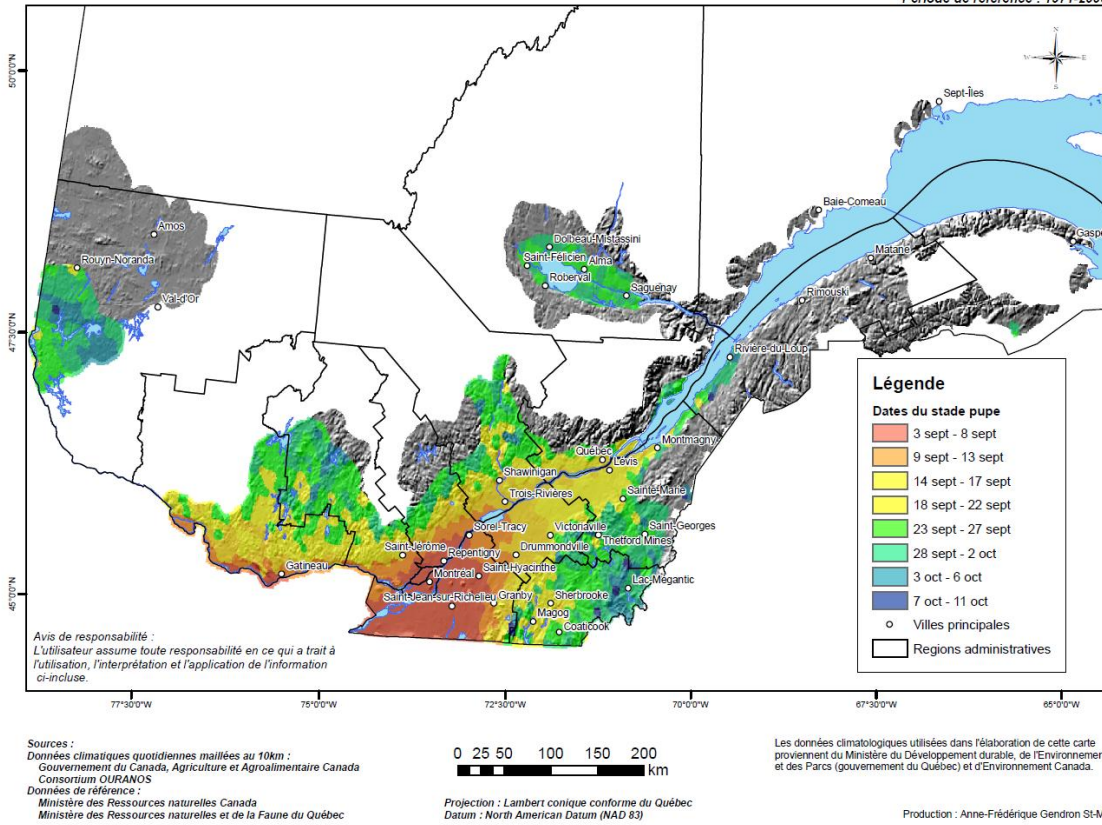


Figure 19. Dates moyennes d'apparition des premières pupes du ver de l'épi selon les scénarios de changements inférieurs pour le futur proche (2041-2070) dans les régions agricoles du Québec. Ces projections climatiques proviennent de 14 scénarios climatiques (voir Annexe 2). Dans les zones associées à des dates moyennes d'apparition, le stade pupes a été atteint au moins 8 années sur 10.

Dates moyennes d'atteinte du stade puce du ver de l'épi : Scénario de changement supérieur (2041-2070)

Période de référence : 1971-2000

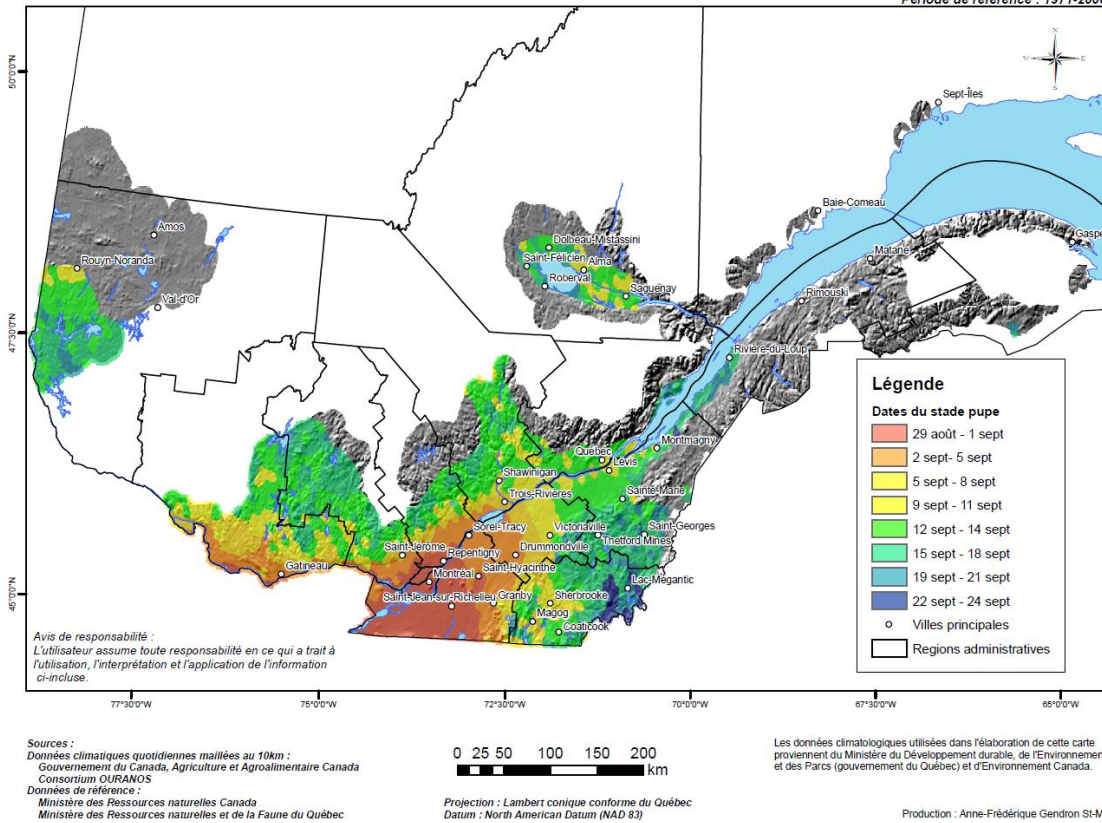


Figure 20. Dates moyennes d'apparition des premières pupes du ver de l'épi selon les scénarios de changements supérieurs pour le futur proche (2041-2070) dans les régions agricoles du Québec. Ces projections climatiques proviennent de 14 scénarios climatiques (voir Annexe 2). Dans les zones associées à des dates moyennes d'apparition, le stade puce a été atteint au moins 8 années sur 10.

6. Analyse et discussion

Revue de littérature

Ce projet a permis d'établir une liste exhaustive des virus, bactéries, champignons, nématodes et arthropodes s'attaquant à la culture du soya à travers le monde. Même si de très nombreuses espèces ont été répertoriées, le nombre d'EEE susceptibles de faire leur apparition au Québec et de causer des dommages significatifs est assez restreint. Évidemment, ces listes devront être mises à jour dans le futur. Il est clair cependant que les principales menaces viendront des arthropodes. À cela, il faudra également ajouter l'impact qu'aura l'arrivée de plantes envahissantes et de mauvaises herbes qui n'ont pas été traitées dans le cadre de la présente étude. Il est à noter que la difficulté à accéder parfois à la littérature asiatique peut avoir induit une sous-estimation des ravageurs de soya pour cette région du monde. De même, le manque d'informations concernant les gastéropodes a probablement amené à une sous-estimation de ce groupe.

Modélisation du soya

Les conséquences des CC sont claires. L'augmentation des températures et l'allongement de la saison de croissance permettront une expansion potentielle de la zone de culture vers le nord et l'est du Québec. Le soya est une culture actuellement très rentable qui pourrait revitaliser l'agriculture dans plusieurs régions actuellement moins choyées. En conséquence, la position du Québec comme producteur de soya en Amérique devrait se bonifier sensiblement au détriment du « mid-west » américain. Si ce scénario se réalise, il est par contre difficile de prédire si l'expansion de la culture du soya se fera au détriment d'autres productions agricoles et si elle entraînera des problèmes environnementaux significatifs.

Les résultats de la modélisation confirment qu'à l'heure actuelle, la maturité des cultivars issus du GM1 n'est jamais atteinte dans les régions du Bas-St-Laurent, du Saguenay Lac St-Jean et de l'Abitibi Témiscamingue (zones grises sur la figure 3) et atteinte tardivement dans plusieurs autres régions. Seule la Montérégie peut actuellement cultiver des variétés de ce groupe de maturité. Cependant, les simulations climatiques montrent que certaines régions pourraient prochainement s'ouvrir à ce groupe de maturité (Figures 4 et 5). En effet, la maturité pourrait être atteinte avant la mi-octobre dans plusieurs régions du Québec. Pour les régions plus nordiques, il faudra probablement produire des cultivars encore plus insensibles à la photopériode. Des travaux récents effectués par le Centre de recherche sur les grains (CÉROM) et l'Université Laval ont justement permis d'identifier des marqueurs liés à des gènes d'insensibilité à la photopériode qui seront utilisés pour produire la prochaine génération de cultivars adaptés aux conditions du Québec (Tardivel et al., 2014). Seule, la région du Bas-Saint-Laurent ne pourra pas cultiver du soya de GM1, toutefois, la région pourrait s'ouvrir à d'autres GM tel que le 0 et le 00. À ce propos, en 2013, 2 200 ha de soya ont été semés dans cette région afin d'évaluer les possibilités (ISQ, 2013).

Selon le modèle, toutes les régions du Québec pourront bénéficier des CC qui favoriseront à la fois une diminution de la durée des stades phénologiques et l'allongement de la saison de croissance: deux éléments favorables à la production de soya (Figures 4 et 5). D'ailleurs, les résultats de la modélisation démontrent que la date du semis pourra être

devancée de 7 à 15 jours dans le futur, et ce, pour toutes les régions. Cela permettra, à moyen terme, de cultiver des variétés hâtives, voire de semer des cultivars tardifs, mais plus tôt en saison et d'augmenter le rendement (Ontario Ministry of Agriculture and Food (OMAFRA), 2011).

Initialement, dans le cadre de ce projet, d'autres groupes de maturité comme le GM0 (plus hâtif et moins sensible à la photopériode des hautes latitudes, à jours longs) et le GM2 (cultivars plus productifs mais nécessitant une plus longue saison de croissance) devaient être évalués afin de connaître leur potentialité géographique pour le passé récent et le futur proche. Cependant, des anomalies liées à l'effet de la photopériode ont été décelées dans certains modules du modèle phénologique d'AAC/CRDH et devront être réajustées afin de simuler correctement la phénologie des cultivars de ces groupes de maturité. Ainsi, seuls les cultivars issus du GM1 ont pu être modélisés à ce jour dans le cadre de ce projet. Des expérimentations démarrées en janvier 2013 en serres à AAC/CRDH permettront d'établir les réponses des différentes phases phénologiques du soya à la photopériode et ainsi améliorer les prédictions de la phénologie des GM0 et GM2 du soya.

Modélisation du nématode à kyste du soya

Les CC devraient généralement favoriser la culture du soya au Québec, par contre l'arrivée du NKS devrait engendrer quelques petits soucis. Le choix et la disponibilité des cultivars, idéalement résistants, seront notamment très importants pour réduire les impacts négatifs anticipés.

Le NKS a été détecté pour la première fois en 2013 au Québec et est maintenant considéré comme une EEE émergente (Mimee *et al.*, 2014). D'emblée, la figure 6 présentant le nombre de générations possibles du NKS pour le passé récent démontre que les températures actuelles permettent le développement du NKS dans toutes les régions du Québec. Ainsi, de trois à quatre générations sont possibles annuellement selon la latitude de la région étudiée. Toutes les régions où l'on produit actuellement du soya sont donc propices à l'établissement du NKS, donc à son chevauchement avec les cultures de soya. Également, il semble que la hausse des températures imputable aux CC permettrait dans un futur proche le développement d'une ou deux générations supplémentaires partielles ou complètes dans toutes les régions ciblées (Figures 7 et 8). D'ailleurs, la Montérégie qui, en plus d'être la région où le risque de propagation du NKS est le plus élevé (puisque les superficies cultivées en soya sont plus importantes et que la connectivité entre les champs est plus grande) est celle qui permet déjà le développement du plus grand nombre de générations. De plus, dans le futur, cette région pourrait voir apparaître une sixième génération incomplète; le NKS pourra y atteindre le stade infectieux (J2). En outre, des régions comme le Bas-Saint-Laurent et le Saguenay-Lac-Saint-Jean où le soya n'est pas cultivé actuellement, mais qui pourraient s'ouvrir à cette culture dans le futur, voient également les probabilités d'établissement du NKS augmenter. Par conséquent, l'étalement de la culture du soya vers ces régions pourrait favoriser l'introduction et l'établissement du NKS. Finalement, les probabilités d'avoir une génération supplémentaire durant chaque saison de croissance varient d'un endroit à l'autre. Cependant, un des points critiques s'avère le moment d'apparition de ces générations puisqu'il pourrait avoir un impact marqué sur les rendements et sur les densités des populations à la récolte. En effet, des stades phénologiques du soya sont plus sensibles à l'infection du NKS, ils sont critiques dans le développement des stades suivants (floraison et

le remplissage des gousses). De plus, l'inoculum de départ est directement lié à la densité finale du NKS. C'est pourquoi il est important de cibler le pathosystème soya-NKS dans son ensemble afin d'évaluer les probabilités de synchronisme entre la plante et le nématode et les conséquences tant pour le rendement de la culture que la dynamique des populations du nématode.

En effet, lorsque l'inoculum de départ est plus faible, il y a moins de juvéniles qui pourront pénétrer les racines et limiter leur croissance tout comme celle du plant en détournant les éléments nutritifs et l'eau nécessaire (Alston et Schmitt, 1987; Bonner et Schmitt, 1985). Dans ce cas particulier, comme les racines seront plus saines, à la mi-saison lorsque les températures seront plus élevées, elles favoriseront un développement plus rapide des individus et par conséquent, un nombre de surinfection plus élevé (Alston et Schmitt, 1987; Bonner et Schmitt, 1985). Si cela concorde avec le début de la floraison et du remplissage des gousses, comme c'est le cas dans toutes les régions du Québec, le rendement final risque d'être énormément affecté, malgré la faible densité de population en début de saison (Pederson, 2007; Riggs et al., 2000). En outre, cette situation favorisera de fortes densités de population en fin de saison donc, accentuera l'inoculum de la saison suivante (Alston et Schmitt, 1987; Bonner et Schmitt, 1985). À l'inverse, une population élevée en début de saison favorisera un plus grand nombre d'infections des racines et un faible développement de celles-ci. Par conséquent, si le cumul des dommages aux racines est trop important, elles pourraient ne plus se développer et limiter la reproduction des individus. Ainsi, la densité de population sera plus faible en fin de saison et l'inoculum moins important, mais là aussi le rendement final sera grandement affecté (Alston et Schmitt, 1987; Bonner et Schmitt, 1985; Riggs et al., 2000). Afin de limiter les pertes imputables au développement du NKS, la modification de la date du semis et le choix du groupe de maturité pourraient avoir un rôle important pour briser ce cycle.

En général, il est reconnu que l'usage d'un cultivar tardif favorise, la production d'une génération supplémentaire de NKS, alors qu'à l'inverse un cultivar hâtif favorise un plus grand nombre d'infections des racines puisque le taux d'éclosion est très élevé durant la période s'étalant de mai à juin (Koening 2000). La solution pour les producteurs aux prises avec le NKS pourrait être l'utilisation d'un cultivar hâtif plus tard en saison (entre la mi-juin et la fin de juin), ce qui sera rendu possible dans certaines régions du Québec dans le futur en raison de l'allongement de la saison de croissance (Bélanger et Bootsma 2005). Par conséquent, le choix de la maturité du cultivar et de son niveau de résistance au NKS sera déterminant dans le contrôle des populations du nématode.

Modélisation de la punaise marbrée

La punaise marbrée monopolise déjà énormément d'énergie et de ressources au sud de la frontière et de plus en plus en Ontario. Son caractère généraliste lui confère un statut majeur d'EEE dans un grand nombre de cultures dont le soya. La figure 12 montre que l'espèce ne pourrait pas s'établir actuellement au Québec de façon pérenne, puisque le stade adulte hivernant n'est atteint qu'une ou deux années sur dix. Les travaux de modélisation révèlent cependant que la punaise marbrée pourra s'établir sur la grande majorité du territoire à l'horizon 2041-2070, puisque son cycle de vie pourra se compléter jusqu'en en Abitibi à l'ouest, en Gaspésie à l'est et au Saguenay-Lac-St-Jean au nord. De plus, la ponte sera avancée de 12 jours environ au sud (ex : Montérégie) et à plus de 20 jours dans certains

secteurs (ex : Abitibi, Saguenay-Lac-St-Jean). Si le synchronisme plante-insecte devait se maintenir au sud, en raison d'un effet similaire des changements de température sur le cycle de la punaise et la phénologie du soya, la punaise pourrait bénéficier grandement d'une augmentation des températures dans les régions les plus froides, cela dans la mesure où elle survit bien à l'hiver. Une ponte précoce, relativement au cycle du soya, et l'émergence plus précoce des adultes de la génération estivale, augmentera d'autant le nombre d'individus qui coloniseront les champs de soya lors de la formation et de la maturation des gousses, partie de la plante la plus sensible à une attaque par *H. halys*. Par contre, d'autres scénarios peuvent être envisagés dans l'éventualité où le synchronisme entre le développement de la punaise marbrée et celui du soya n'est pas maintenu. On peut donc s'attendre à des dégâts plus marqués pour ces régions, comparativement aux régions du sud. Il serait néanmoins pertinent d'intégrer l'évolution des cultures de petits fruits sur le territoire québécois avec les changements climatiques, la punaise marbrée étant tributaire de celles-ci lors du réveil des adultes au printemps.

La punaise marbrée aura des effets directs et néfastes sur les cultures mais également sur la biodiversité. D'abord, il s'agit d'une espèce très compétitrice qui devrait avoir un impact négatif sur les populations de punaises indigènes au Québec par compétition directe pour les ressources. De plus, phénomène original, la punaise marbrée devrait avoir un impact négatif sur la principale espèce de parasitoïde qui attaque les punaises au Québec, soit *Telenomus podisii*, via un phénomène de trappe évolutive. Dans ce contexte, le parasitoïde attaque sans discernement, du moins pour le moment, la punaise marbrée bien que cette espèce ne soit pas un hôte convenable. Le parasitoïde gaspille donc ses œufs dans un hôte cul-de-sac. Et comme la punaise marbrée risque de devenir abondante et omniprésente au Québec, cela devrait à court terme avoir un effet négatif sur les populations de *T. podisii*. Et comme ce parasitoïde est important pour réguler de façon naturelle les populations de certaines autres punaises nuisibles en agriculture, on prévoit donc aussi un effet négatif indirect associé à l'arrivée au Québec de la punaise marbrée (Abram et al. 2013). Une attention particulière devra donc être dévolue à l'établissement de cette punaise tant en milieu agricole que naturel, et ce dans le contexte des changements climatiques. L'espèce se disperse relativement lentement en Amérique du Nord mais sa progression est constante. Elle est désormais aux portes du Québec, tant à l'ouest en Ontario qu'au sud dans l'État de New York.

Modélisation du ver de l'épi

Actuellement, le ver de l'épi du maïs se retrouve au Québec au cours de l'été, les adultes observés étant des individus en provenance des États-Unis. D'après la carte 15, et en considérant une arrivée des adultes au premier août, des larves peuvent théoriquement être produites sur une grande partie du territoire. Ces travaux de modélisation concordent avec l'observation de chenilles de cette espèce l'été au Québec, dans les champs de maïs. On observe néanmoins que le stade pupé (figure 18), qui correspond au stade de survie hivernale, n'est atteint qu'au sud (essentiellement Montérégie, Outaouais et Centre-du-Québec). L'espèce ne pourrait ainsi compléter son cycle que dans ces régions. La sévérité de l'hiver au Québec explique probablement pourquoi *H. zea* ne s'implante pas présentement dans le sud de la province, les pupes ne pouvant survivre plus de quelques jours sous -5 °C. Si l'on compare la figure 15 avec les figures 16 et 17, on note que la date d'émergence des larves ne sera devancée que de quelques jours au sud (ex : 4 jours en Montérégie) d'ici à

l'horizon 2041-2070, alors qu'elle sera devancée de plus de quinze jours dans d'autres secteurs, dont l'Abitibi, le Bas-Saint-Laurent ou le Saguenay-Lac-St-Jean. La date d'apparition des larves est un point crucial pour *H. zea* car ce sont les chenilles qui sont nuisibles à la culture du soya, laquelle sera d'autant plus sensible qu'elle sera attaquée précocement. Dans la mesure où la phénologie actuelle du soya demeure la même dans le futur, on peut donc s'attendre à ce que cette culture soit plus affectée dans ces régions qu'au sud du Québec. Une émergence des larves aux premiers stades de maturation des gousses, stades les plus sensibles, serait particulièrement problématique. De plus, cette espèce sera capable de compléter son cycle sur l'ensemble des régions concernées. Si les hivers venaient à s'adoucir, l'espèce pourrait donc s'implanter sur la grande majorité des terres où le soya pourra être cultivé. Toutefois, d'autres scénarios peuvent être envisagés dans l'éventualité où le soya se cultivera plus tôt en saison dans le cadre d'un réchauffement climatique.

Les prédictions concernant le ver de l'épi du maïs s'avèrent extrêmement complexes car à l'heure actuelle, la présence de l'espèce au Québec est uniquement le fait d'individus migrants en saison estivale. Afin de prédire précisément les risques associés à *H. zea*, il serait nécessaire d'intégrer non seulement les besoins thermiques de l'espèce ainsi que la phénologie du soya, mais également l'influence des changements climatiques sur les vents dominants en provenance des États-Unis, dont profitent les adultes pour la dispersion, et sur le cycle du maïs, hôte attaqué préférentiellement par le ver de l'épi du maïs. Ceci permettra de fixer la date d'arrivée des adultes au cours de la saison dans les champs de soya, laquelle sera probablement avancée avec une augmentation des températures.

7. Conclusion et recommandations

Suite à la découverte du NKS au Québec en 2013 et de l'arrivée probable de plusieurs autres EEE, de nombreux défis se profilent pour les producteurs de soya du Québec et les intervenants du domaine phytosanitaire. Le plus important sera indéniablement le développement de cultivars résistants adaptés aux conditions climatiques et de photopériode du Québec. Pour contrer le développement des populations de NKS, il s'agit du moyen de lutte le plus efficace et le moins dommageable pour l'environnement. Toutefois, plusieurs problèmes concernent leur développement dans les zones nordiques, dont le temps et les ressources requis pour leur développement, l'élaboration de variétés hâtives et moins sensibles à la photopériode (GM 000 à I), le maintien de la pérennité des sources de résistance et le croisement des cultivars résistants avec des lignées élites pour améliorer les qualités agronomiques et le rendement (Colgrove et Niblack 2008; Orf 2007 et 2013; Shannon et al. 2004). Heureusement, le Centre de recherche sur les grains, en collaboration avec Agriculture et Agroalimentaire Canada a déjà mis en place un programme d'amélioration génétique afin de produire des cultivars résistants au NKS de groupes de maturité très hâtives (000 à 0). Également, AAC finance présentement une étude visant l'identification des génotypes de NKS présents au Québec et dans les régions limitrophes, de même que le développement d'une méthode d'identification rapide des Hg types. Ces outils sont essentiels pour permettre aux producteurs de faire un choix éclairé d'un cultivar et de limiter la dispersion et l'impact économique du NKS.

En ce qui concerne les arthropodes, il sera nécessaire de mettre en place une stratégie afin de suivre l'évolution des populations de EEE qui colonisent actuellement le sud de

l'Amérique mais qui migrent chaque année au Québec. Cela afin de documenter leur progression dans le temps et dans l'espace, ainsi que le niveau des dommages associés. Pour la punaise marbrée, il serait intéressant dès maintenant de caractériser les populations de punaises indigènes et leurs parasitoïdes, cela en prévision de l'arrivée imminente de la punaise marbrée. Nous pourrions ainsi suivre en temps réel les changements dans la dynamique des communautés et les conséquences pour les espèces indigènes et la culture du soya.

Ce projet se présente comme une première étape de notre compréhension globale de l'impact des CC sur les problèmes phytosanitaires anticipés dans la culture du soya. Il importe de poursuivre l'approfondissement des connaissances à divers niveaux. Entre autres, pour chacun des ravageurs potentiels du soya, il sera nécessaire d'identifier les stades phénologiques de la plante qui sont les plus susceptibles d'être affectés par le ravageur et d'entraîner des pertes de rendement. Par exemple, quels sont les impacts d'une infestation de punaise marbrée selon les stades de développement du soya? Ces informations sont déjà disponibles pour certains ravageurs mais pas pour tous. De plus, il faudra établir quelles seront les fenêtres temporelles de chevauchement au champ entre le ravageur et les stades susceptibles de développement du soya. Ici également, ces informations existent pour certains ravageurs mais elles devront être validées pour les conditions agronomiques qui prévalent au Québec. Ainsi, il a été démontré que les fenêtres de vulnérabilité du soya au puceron du soya varient significativement entre le « mid-west » américain et le Québec (Rhainds et al. 2007). Bien certainement, selon les règles de l'art, il faudra également établir des seuils économiques pour les ravageurs qui causeront des dommages importants à la culture du soya. De plus, tel que discuté par Brodeur et al. (2013), les CC auront également des effets, positifs, négatifs ou neutres, sur l'écologie des ennemis naturels des ravageurs des cultures. La nature et l'ampleur des conséquences en lutte biologique devront aussi être évaluées. Il en va de même pour l'ensemble des moyens de lutte qui peuvent être déployés pour contrôler les populations des espèces exotiques envahissantes.

L'exercice que nous avons mené pour la culture du soya s'avère fructueux et pourrait se répéter pour d'autres cultures d'importance économique au Québec. La caractérisation de l'influence des CC sur les EEE futures d'une culture permet d'anticiper non seulement les problèmes en devenir mais également les éléments clés à considérer lors du développement de mesures d'adaptation. L'approche méthodologique que nous avons développée, tant pour la revue de la littérature que pour les aspects de modélisation, nous a permis de répondre aux objectifs du projet. Les moteurs de recherche sont de puissants outils qui permettent de dénicher les informations pertinentes là où elles se trouvent à l'échelle de la planète. Le principal facteur limitant à ce type d'étude s'est révélé être la disponibilité de jeux de données complets et rigoureux sur les paramètres thermiques du développement des EEE. Cela limite d'autant la capacité de prédire par modélisation les aires de répartition futures des EEE.

8. Références

- Abram P.K., T.D. Gariepy, G. Boivin et J. Brodeur. 2014. An invasive stink bug as an evolutionary trap for an indigenous egg parasitoid. *Biological Invasions* DOI 10.1007/s10530-013-0576-y
- Alston, D.G. et D.P. Schmitt. 1988. Development of *Heterodera glycines* life stages as influenced by temperature. *Journal of Nematology* 20:366-372.

Alston, D.G. et D.P. Schmitt. 1987. Population density and spatial pattern of *Heterodera glycines* in relation to soybean phenology. *Journal of Nematology* 19 :336-345.

Atlas agroclimatique du Québec. 2012. Accueil. <http://dev.agrometeo.org/atlas/index/true>

Bélanger, G. et A. Bootsma. 2005. Impacts des changements climatiques sur l'agriculture au Québec, 65ème congrès de l'ordre des agronomes du Québec: changements climatiques comprendre pour mieux agir.

Berteaux, D. 2014. Changements climatiques et biodiversité du Québec: Vers un nouveau patrimoine naturel. Presses de l'Université du Québec. 202 p.

Bonner, M.J. et D.P. Schmitt. 1985. Population dynamics of *Heterodera glycine* life stages on soybean. *Journal of Nematology* 17:153-158.

Brodeur, J. et M. Roy. 2008. Le puceron du soya. Statut du ravageur et stratégies de lutte. *Grandes Cultures* Décembre: 32-38.

Brodeur, J., G. Boivin, G. Bourgeois, C. Cloutier, J. Doyon, P. Grenier et A.E. Gagnon. 2012. Impacts des changements climatiques sur le synchronisme entre les ravageurs et leurs ennemis naturels: conséquences sur la lutte biologique en milieu agricole au Québec. Rapport final, OURANOS. 124 p.

Boldt, P.E., D. Biever et C. M. Ignoffo. 1975. Lepidopteran pests of soybeans: consumption of soybean foliage and pods and development time. *Journal of Economic Entomology* 68:480-482.

Brier, H.B. et D. J. Rogers. 1991. Susceptibility of soybeans to damage by *Nezara viridula* (L.)(Hemiptera: Pentatomidae) and *Riptortus serripes* (F.)(Hemiptera: Alydidae) during three stages of pod development. *Australian Journal of Entomology* 30:123-128.

Colautti, R.I., S.A. Bailey, C.D. van Overdijk, K. Amundsen et H.J. MacIsaac. 2006. Characterised and projected costs of nonindigenous species in Canada. *Biological Invasions* 8: 45-59.

Colgrove, A.L. et T.L. Niblack. 2008. Correlation of female indices from virulence assays on inbred lines and field populations of *Heterodera glycines*. *Journal of Nematology* 40:39-45.

Convention on Biological Diversity (CBD). 2008. Alien Species that Threaten Ecosystems, Habitats or Species [Article 8(h)], United Nations.

Cruz, C.D. et A.E. Dorrance. 2009. Characterization and survival of *Cercospora sojina* in Ohio. Online. *Plant Health Progress* doi:10.1094/PHP-2009-0512-03-RS.

de Blois, S., L. Boisvert-Marsh, R. Schmucki, C.A. Lovat, C. Byun, P. Gomez-Garcia, R. Otfinowski, E. Groeneveld et C. Lavoie. 2013. Outils pour évaluer les risques d'invasion biologique dans un contexte de changements climatiques. Université McGill. Montréal, Québec.

- Duan, Y.-X., Y.-N. Zheng, L.-J. Chen, X.-M. Zhou, Y.-Y. Wang et J.-S. Sun. 2009. Effects of abiotic environmental factors on soybean cyst nematode. *Agricultural Sciences in China* 8:317-325.
- Fehr, W.R., C.E. Caviness, D.T. Burmood et J.S. Pennington. 1971. Stage of development descriptions for soybeans, *Glycine max* (L.) Merr. *Crop Sciences* 11:929-931.
- Gagnon, A.-É., G. Arsenault-Labrecque, G. Bourgeois, L. Bourdages, P. Grenier et M. Roy. 2012. Études de cas pour faciliter une gestion efficace des ennemis des cultures dans le contexte de l'augmentation des risques phytosanitaires liés aux changements climatiques. Rapport final, projet #550004-PXI. OURANOS.
- Gervais, A. 2011. Phénologie et modélisation du soya (*Glycine max* L. Merr.). Rapport de stage. Université de Sherbrooke, Sherbrooke.
- Giesler, L.J., S.A. Ghabrial, T.E. Hunt et J.H. Hill. 2002. Bean pod mottle virus: A threat to US soybean production. *Plant Disease* 86:1280-1289.
- Hartstack, A.W., J.P. Hollingsworth, R.L. Ridgeway et J.D. Lopez. 1976. MOTHZV-2: A computer simulation of *Heliothis zea* and *virescens* population dynamics. User manual. 1976. U.S.D.A. ARS-S-127.
- Herbert, A., C. Hull et E. Day. 1992. Corn Earworm Biology and Management in Soybeans. *Virginia Cooperative Extension Service Publication:444-770*.
- Institut de la statistique du Québec (ISQ). 2013. Superficie des grandes cultures, rendement à l'hectare et production, par région administrative, Québec, 2012. In Tableau statistiques. (http://www.stat.gouv.qc.ca/donstat/econm_finnc/filr_bioal/culture/culture/gc_2012.htm)
- Kadozawa, T. et H. Santa. 1981. Growth and reproduction of soybean pod bugs (Heteroptera) on seeds of legumes. *Bulletin of the Chugoku National Agricultural Experiment Station Series E* 19: 75-97.
- Koenning, S.R. et J.A. Wraether. 2010. Suppression of soybean yield potential in the continental United States from plant diseases estimated from 2006 to 2009. *Plant Health Progress*, doi:10.1094/PHP-2010-1122-01-RS.
- Koenning, S. 2000. Management of Soybean cyst nematode – plant pathology information note, soybean No 6. *North Carolina Cooperative Extension Service* (<http://www.ces.ncsu.edu/depts/pp/notes/Soybean/soy001/soy001.htm>)
- Lauritis, J.A., R.V. Rebois et L.S. Graney. 1983. Development of *Heterodera glycines* Ichinohe on soybean, *Glycine max* (L.) Merr., under gnotobiotic conditions. *Journal of Nematology* 15:272-281.
- Légaré, J.-P., J. Moisan-De Serres et M. Fréchette. 2013. La punaise marbrée (*Halyomorpha halys*). Fiche d'identification. Laboratoire de diagnostic en phytoprotection, MAPAQ.

- Leskey, T.C., G.C. Hamilton, A.L. Nielsen, D.F. Polk, C. Rodriguez-Saona, C. Bergh et al. 2012. Pest status of the brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys* in the USA. *Outlooks on Pest Management* 23:218-226.
- Li, X., P.D. Esker, Z. Pan, A.P. Dias, L. Xue et X.B. Yang. 2010. The uniqueness of the soybean rust pathosystem : An improved understanding of the risk in different regions of the world. *Plant Disease* 94:796-806.
- Lourenção, A.L., J.C.V.N. Pereira, M.A.C. De Miranda et G.M.B. Ambrosano. 1999. Evaluation of damage to early maturity soybean cultivars and lines caused by stink bugs and caterpillars. *Pesquisa Agropecuaria Brasília* 35:879-886.
- Mack, R.N., D. Simberloff, W.M. Lonsdale, H. Evans, M. Clout et F.A. Bazzaz. 2000. Biotic invasions: Causes, epidemiology, global consequences, and control. *Ecological Applications* 10: 689-710.
- Manea, A. et M.R. Leishman. 2011. Competitive interactions between native and invasive exotic plant species are altered under elevated carbon dioxide. *Oecologia* 165:735-744.
- Melton, T.A., B.J. Jacobsen et G.R. Noel. 1986. Effect of temperature on development of *Heterodera glycines* on *Glycine max* and *Phaseolus vulgaris*. *Journal of Nematology* 18:468-474.
- Mimee, B., H. Peng, V. Popovic, Q. Yu, M.O. Duceppe, M.P. Tétreault et G. Belair. 2014. First report of Soybean Cyst Nematode (*Heterodera glycines* Ichinohe) on soybean in the province of Quebec, Canada. *Plant Disease* 98:429-429.
- Munger, P., H. Bleiholder, H. Hack, M. Hess, R. Stauss, T. Van Den Boom et E. Weber. 1997. Phenological growth stages of the soybean plant (*Glycine max* (L.) Merr.) – Codification and description according to the general BBCH scale – with figures. *Journal of Agronomical Crop Sciences* 179:209 - 217.
- Nielsen, A.L., G.C. Hamilton et D. Matadha. 2008. Developmental rate estimation and life table analysis for *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae). *Environmental Entomology* 37:348-355.
- Nielsen, A.L. et G.C. Hamilton. 2009. Life history of the invasive species *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) in Northeastern United States. *Annals of the Entomological Society of America* 102:608-616.
- Olfert, O., R. Hallett, R.M. Weiss, J. Soroka et S. Goodfellow. 2006. Potential distribution and relative abundance of swede midge, *Contarinia nasturtii*, an invasive pest in Canada. *Entomologia Experimentalis et Applicata* 120:221-228.
- Olfert, O. et R.M. Weiss. 2006. Impact of climate change on potential distributions and relative abundances of *Oulema melanopus*, *Meligethes viridescens* and *Ceutorhynchus obstrictus* in Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 113:295-301.

- Oliveira, M.R.V., T.J. Henneberry et P. Anderson. 2001. History, current status, and collaborative research projects for *Bemisia tabaci*. *Crop protection* 20:709-723.
- Ontario Ministry of Agriculture and Food, OMAFRA. 2011. Soybean Cyst Nematode (*Heterodera glycines*). In Diseases of Field Crops: Soybean Diseases. (<http://www.omafra.gov.on.ca/english/crops/pub811/14soybean.htm>).
- Orf, J. 2007. SCN resistant genes and breeding strategies: an academic perspective. (<http://www.soybeans.umn.edu/pdfs/2007/scnsummit/JamesOrf.pdf>).
- Orf, J. 2013. Breeding for SCN resistance in the north. (http://soybase.org/meeting_presentations/soybean_breeders_workshop/SBW_2013/presentations/13SBW_tues_Orf.pdf).
- Parmesan, C. 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 37:637-669.
- Pederson, P. 2007. Soybean physiology: yield, maturity groups, and growth stages. (<http://www.plantmanagementnetwork.org/infocenter/topic/soybeanrust/2007/presentations/Pedersen.pdf>).
- Pimentel, D., R. Zuniga et D. Morrison. 2005. Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. *Ecological Economics* 52:273-288.
- Plantwise. Plantwise knowledge bank. 2014. (<http://www.plantwise.org/knowledgebank/datasheet.aspx>)
- Qu, Y. et J. Kogan. 1984. A bibliography of three lepidopterous pod borers, *Etiella zinckenella*, *Leguminivora glycinivorella* and *Matsumuraeses phaseoli*: associated with soybean and other legumes. Soybean Insect Research Information Center.
- Ragsdale, D. W., D.A. Landis, J. Brodeur, G.E. Heimpel et N. Desneux. 2011. Ecology and management of the soybean aphid in North America. *Annual Review of Entomology* 56:375-399.
- Rebois, R.V. et W.C. Johnson. 1973. Effect of *Rotylenchulus reniformis* on yield and nitrogen, potassium, phosphorus and amino acid content of seed of *Glycine max*. *Journal of Nematology* 5:1-6.
- Rhainds, M., M. Roy, G. Daigle et J. Brodeur. 2007. Toward management guidelines for soybean aphid in Québec. I. Feeding damage in relationship to seasonality of infestation and incidence of native predators. *The Canadian Entomologist* 139: 728-741.
- Riggs, R.D., J.A. Wrather, A. Mauromoustakos, et L. Rakes. 2000. Planting date and soybean cultivar maturity group affect population dynamics of heterodera glycines, and all affect yield of soybean. *Journal of Nematology* 32:334-342.

- Rosenzweig, C., A. Iglesias, X.B. Yang, P.R. Epstein et E. Chivian. 2011. Climate change and extreme weather events: Implications for food production, plant diseases, and pests. *Global Change and Human Health* 2:90-104.
- Ross, J.P. 1964. Effect of soil temperature on development of *Heterodera glycines* in soybean roots. *Phytopathology* 54:1228-1231.
- Sakagami, S.F., K. Tanno, H. Tsutsui et K. Honma. 1985. The role of cocoons in overwintering of the soybean pod borer *Leguminivora glycinivorella* (Lepidoptera: Tortricidae). *Journal of the Kansas Entomological Society* 1:240-247.
- Seiter, N.J., J.K. Greene et F.P. Reay-Jones. 2012. Reduction of soybean yield components by *Megacopta cribraria* (Hemiptera: Plataspidae). *Journal of Economic Entomology* 106:1676-1683.
- Sentis, A., J.L. Hemptinne et J. Brodeur. 2014. Toward a mechanistic understanding of temperature and enrichment effects on species interaction strength, omnivory and food web structure. *Ecology Letters* (sous presse)
- Shannon, J.G., P.R. Arelli et L.D. Young. 2004. Breeding for resistance and tolerance. Dans: Schmitt, D.P. Wrather, J.A. et Riggs, R.D. (Éds.). *Biology and management of soybean cyst nematode*, second edition. Schmitt and associated : Marceline.
- Slack, D.A., R.D. Riggs et M.L. Hamblen. 1972. The effect of temperature and moisture on the survival of *Heterodera glycines* in the absence of a host. *Journal of Nematology* 4:263-266.
- Smith, A.L., N. Hewitt, N. Klenk, D.R. Bazely, N. Yan, S. Wood, I. Henriques, J.I. MacLellan et C. Lipsig-Mummé. 2012. Effects of climate change on the distribution of invasive alien species in Canada: a knowledge synthesis of range change projections in a warming world. *Environmental Review* 20:1-16.
- Statistique Canada. 2012. Tableau 001-0010- Estimation de la superficie, du rendement, de la production et du prix moyen à la ferme des principales grandes cultures, en unités métriques, annuel, CANSIM (base de données).
- Tardivel, A., H. Sonah, F. Belzile et L.S. O'Donoghue. 2014. Rapid identification of alleles at the soybean maturity gene E3 using genotyping by sequencing and a haplotype-based approach. *The Plant Genome* 7:1-9.
- Tilmon, K.J., E.W. Hodgson, M.E. O'Neal et D.W. Ragsdale. 2011. Biology of the soybean aphid, *Aphis glycines* (Hemiptera: Aphididae) in the United States. *Journal of Integrated Pest Management* 2:1-7.
- Twizeyimana, M., P.S. Ojiambo, K. Sonder, T. Ikotun, G.L. Hartman et R. Bandyopadhyay. 2009. Pathogenic variation of *Phakopsora pachyrhizi* infecting soybean in Nigeria. *Phytopathology* 99:353-361.

- Tylianakis, J.M., R.K. Didham, J. Bascompte et D.A. Wardle. 2008. Global change and species interactions in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters* 11: 1351-1363.
- Wrather, J.A., W.C. Stienstra et S.R. Koenning. 2001. Soybean disease loss estimates for the United States from 1996 to 1998. *Canadian Journal of Plant Pathology* 23:122-131.
- Yu, Q. 2011. Soybean Cyst Nematode (*Heterodera glycines* Ichinohe). Dans: Soybean Physiology and Biochemistry (Ed. H.A. El-Shemy). InTech, New-York, USA, pp. 461-474..

ANNEXE 1 – Éléments constituant le modèle phénologique du soya

Le modèle phénologique du soya prend en compte deux types de réponse: la réponse de la plante à la température $f(T)$ et la réponse à la photopériode $f(P)$. Les deux fonctions interviennent dans le modèle selon qu'elles influencent la phase associée ou non (Tableau A.1.1).

Tableau A.1.1. Modèle de développement du soya dans CIPRA incluant les fonctions et paramètres utilisés (Gervais, 2011).

	Phase d'émergence	Phase foliaire	Phase de transition	Phase reproductive I	Phase reproductive II
Stades BBCH	0-9	10-22	14.8	51-79	79-89
Fonctions	$f(T)$	$f(T)$		$f(T), f(P)$	$f(T), f(P)$
Paramètres	T	T	stade BBCH	T, P	T, P

Le tableau A.1.2 fournit les équations associées à chaque phase phénologique utile au calcul du modèle, celle des paramètres et unités utilisés, de même qu'une courte description de chacun des paramètres.

Tableau A.1.2. Le modèle du soya dans CIPRA : les fonctions, les paramètres ainsi que leur description pour chacun des stades de développement (Gervais, 2011).

Stade	Équation	paramètres	unités	Description
Semis-Émergence	1	T_{max}	°C	Température maximale de la phase d'émergence
		T_{opt}	°C	Température optimale de la phase d'émergence
		T_{base}	°C	Température de base de la phase d'émergence
		T	°C	Température observée de l'air
Foliaire	2	r_E	jour ⁻¹	Taux de développement prédit pour la phase d'émergence
		$R_{E,max}$	jour ⁻¹	Taux de développement maximal pour la phase d'émergence
		$f_e(T)$		Fonction de réponse à la température pour la phase végétative
Reproductive I	3	r_F	jour ⁻¹	Taux de développement prédit pour la phase foliaire
		$R_{F,max}$	jour ⁻¹	Taux de développement maximal pour la phase foliaire
		$f_r(T)$		Fonction de réponse à la température pour la phase végétative
Reproductive I	4	r_{R1}	jour ⁻¹	Taux de développement prédit pour la phase reproductive 1
		$R_{R1,max}$	jour ⁻¹	Taux de développement maximal pour la phase reproductive 1
		$F_{r1}(T)$		Fonction de réponse à la température pour la phase reproductive
		$F_{r1}(P)$		Fonction de réponse à la photopériode pour la phase reproductive
Reproductive I	5	P_S	heures	Photopériode seuil
		P	heures	Photopériode observée
		A		constante (A=0.1280)
		B		constante (B=2.2226)
	5b	MG		Groupe de maturité des cultivars de soja utilisés
Reproductive II	6	r_{R2} $R_{R2,max}$ $F_{r2}(T)$ $F_{r2}(P)$	jour ⁻¹ jour ⁻¹	Taux de développement prédit pour la phase reproductive 2 Taux de développement maximal pour la phase reproductive 2 Fonction de réponse à la température pour la phase reproductive Fonction de réponse à la photopériode pour la phase reproductive

Il est nécessaire de spécifier que l'équation utilisée pour chacune des réponses à la température est la même pour toutes les phases phénologiques :

$$f(T) = \left(\frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{V_opt}} \right) \cdot \left(\frac{T - T_{base}}{T_{opt} - T_{base}} \right)^{\frac{T_{opt} - T_{base}}{T_{\max} - T_{opt}}}$$

Cette équation utilise toujours les mêmes paramètres [T_{base} (température de base), T_{opt} (température optimale) et T_{max} (température maximale)] dont les températures cardinales varient selon la phase phénologique (Tableau A.1.3).

Tableau A.1.3. Liste des équations et valeurs des paramètres utilisés pour le calcul de chacune des phases du modèle phénologique du soya.

Phase	Équations	Paramètres et valeurs
Semis à émergence (stades BBCH 0 à 9)	$r_E = R_{E_max} \cdot f_E(T)$	$T_{E_base} = 5^{\circ}\text{C}$ $T_{E_opt} = 31,5^{\circ}\text{C}$ $T_{E_max} = 45^{\circ}\text{C}$
Foliaire (stades BBCH 10 à 22)	$r_F = R_{F_max} \cdot f_f(T)$	$T_{F_base} = 0^{\circ}\text{C}$ $T_{F_opt} = 30,8^{\circ}\text{C}$ $T_{F_max} = 41,8^{\circ}\text{C}$
Reproductive I (stades BBCH 51-79)	$r_R = R_{R_max} \cdot f_{r1}(T) \cdot f_{r1}(P)$	$T_{R_base} = 3,6^{\circ}\text{C}$
	$f(P) = 1 - \left[1 - \exp(-(A(P - P_S))^B) \right]$	$T_{R_opt} = 25^{\circ}\text{C}$
	$f(P) = 1$ si $P < P_S$	$T_{R_max} = 40^{\circ}\text{C}$
	$P_S = -0.0479\text{MG}^2 - 0.5302\text{MG} + 11.828$	$P_S = 11,27$ h
Reproductive II (stades BBCH 79-89)	$r_{T } = R_{T _max} \cdot f_{r2}(T) \cdot f_{r2}(P)$	$P_{critique} = 8$ h

Modifié de Gervais, 2011.

Pour le calcul de la réponse à la photopériode pour la phase reproductrice I, la photopériode seuil (P_S) a été estimée à partir du groupe de maturité du soya (GM de 0 à 8). Par exemple, dans ce cas-ci, comme le GM = 1, le $P_S = 11,27$ heures (Tableau A.1.3). Les constantes A et B sont respectivement de 0,1280 et de 2,2226 (Tableau A.1.2). Pour le calcul de la fonction de la photopériode pour la phase reproductrice II, la $P_{critique}$ a été estimée 8 heures (Tableau A.1.3).

ANNEXE 2 – Liste des scénarios climatiques utilisés dans le cadre du projet

Tableau A.2.1. Informations sur les simulations régionales utilisées dans le cadre de ce projet.

Code de simulation pour le présent projet	Code de simulation MRCC4.2.3 à Ouranos (historique / future)	Pilote (centre-modèle_version #membre)	Scénario d'émissions
R1	aey / afb	CCCMA-CGCM_v3.1 #1	A2
R2	aez / afc	CCCMA-CGCM_v3.1 #2	A2
R3	afa / afd	CCCMA-CGCM_v3.1 #3	A2
R4	aet / aet	CCCMA-CGCM_v3.1 #4	A2
R5	aev / aev	CCCMA-CGCM_v3.1 #5	A2
R6	agx / agx	MPI-ECHAM_v5 #1	A2
R7	ahi / ahk	MPI-ECHAM_v5 #2	A2
R8	ahj / ahw	MPI-ECHAM_v5 #2	A2

Tableau A.2.2. Informations sur les simulations globales utilisées dans le cadre de ce projet.

Code de simulation pour le présent projet	Centre	MCG (modèle_version #membre)	Résolution	Scénario d'émissions
G1	CCCMA	CGCM_v3.1 #3	~280 km	B1
G2	CCCMA	CGCM_v3.1 #4	~280 km	A1b
G3	CCCMA	CGCM_v3.1 #4	~280 km	B1
G4	CSIRO	MK_v3.5 #1	~140 km	A1b
G5	CSIRO	MK_v3.5 #1	~140 km	B1
G6	MPI	ECHAM_v5 #4	~140 km	A1b

ANNEXE 3 – Liste des 333 espèces s’attaquant au soya à travers le monde

La liste des espèces recensées et des informations recueillies se retrouve dans le fichier Excel nommé « Liste EEE soya 550012.xls ».