



Sciences et technologies

# IMPACTS ET DÉFIS LIÉS AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES POUR LA GESTION DES ENNEMIS DES GRANDES CULTURES AU QUÉBEC

Crédit photo : Waldemar Brandt

**Julien Saguez**

Chercheur en biosurveillance  
CÉROM – Centre de recherche sur les grains

**L**es changements climatiques ont un impact sur l'ensemble des sphères de notre quotidien. L'agriculture est un domaine déjà affecté et le sera encore davantage dans les prochaines années. Les producteurs agricoles et toute la filière devront s'adapter à ces changements importants qui apporteront leur lot de nouveaux ennemis des cultures (insectes et maladies entre autres). Cela aura notamment des impacts sur les prises de décisions en matière de phytoprotection.

Certains de ces ennemis sont indigènes au Québec, mais d'autres sont considérés comme des espèces exotiques envahissantes et seront susceptibles de provenir d'autres régions à travers le monde et de s'établir sous nos latitudes.

Au cours des dernières années, le CÉROM, en collaboration avec OURANOS, le MAPAQ et Agriculture et Agroalimentaire Canada, a mené plusieurs projets visant à évaluer l'impact des changements climatiques sur les ennemis des grandes cultures. Dans cet article, quelques résultats de ces recherches sont présentés.

# Grandes cultures et changements climatiques au Québec

**A**u Québec, à peine 2 % des superficies sont consacrées à l'agriculture. Quand on parle de grandes cultures, on parle généralement de maïs, de soya, de céréales et de canola, qui produisent des grains. Au cours des dernières années, c'est environ un million d'hectares de grandes cultures qui ont été cultivés par an au Québec, par près de 12 500 exploitations agricoles, avec une production annuelle d'environ 5,5 millions de tonnes de grains. Le maïs et le soya sont les deux principales cultures puisqu'elles représentent près de 75 % des superficies et 87 % de la production. Les céréales gagnent également en popularité avec une augmentation des superficies dédiées à ces cultures (MAPAQ, 2020).

Les pratiques agricoles dépendent énormément des conditions climatiques et celles-ci sont une composante essentielle à l'activité des producteurs agricoles. Certaines cultures sont extrêmement sensibles aux variations de températures ainsi qu'aux stress hydriques (manque d'eau). Les variations du climat peuvent cependant avoir des effets à la fois positifs et négatifs sur les cultures et leurs rendements, et ce, en fonction des différentes régions agricoles du Québec. D'autres cultures sont également sensibles aux conditions hivernales, comme le blé, par exemple.

La croissance des cultures est fortement liée aux conditions climatiques, notamment les températures et les précipitations. Au cours des dernières décennies, plusieurs changements ont été observés. Par exemple, entre 1971 et 2000, les températures ont augmenté, les hivers ont été plus courts et plus chauds et la saison de croissance s'est allongée de plusieurs jours à plusieurs semaines selon les régions (OURANOS, 2015). Par conséquent, les semis peuvent être réalisés plus tôt. Les conditions de croissance printanières et estivales sont également plus chaudes (augmentation du nombre de degrés-jours). Les différents scénarios climatiques élaborés indiquent que dans le futur, ces changements devraient se poursuivre et s'intensifier (OURANOS, 2015; Atlas Climatique du Canada, 2020). Les températures pourraient augmenter de plusieurs degrés et on pourrait assister à une augmentation de la fréquence des événements météorologiques extrêmes (tempêtes, inondations, sécheresses, etc.). Tout cela affectera bien évidemment les productions agricoles, ainsi que le calendrier des semis et récoltes.

Des conditions plus chaudes permettront peut-être d'améliorer les rendements de certaines productions agricoles dont la croissance et le développement sont

actuellement limités par la température. De nouvelles variétés et de nouveaux hybrides mieux adaptés verront le jour et certaines cultures pourront être produites dans des régions plus nordiques, où les conditions climatiques ne sont pas favorables actuellement. Enfin, de nouvelles cultures pourraient être introduites au Québec; on parle ici de cultures émergentes (p. ex. : chia, quinoa, etc.) Par contre, tous ces changements viendront également avec un lot de nouveaux défis à relever en matière de phytoprotection. En effet, les cultures pourraient être soumises à une augmentation de la pression des ennemis des cultures (insectes ravageurs, mauvaises herbes et maladies) qui pourraient migrer, s'introduire et s'établir au Québec, puisqu'ils dépendent eux aussi des conditions climatiques et environnementales (Gagnon, Roy et Roy, 2011).

## Grandes cultures et phytoprotection au Québec

**L**a phytoprotection consiste à protéger les plantes contre leurs ennemis, c'est-à-dire les insectes, maladies et autres organismes « nuisibles ». Dans le cadre d'une gestion intégrée des ennemis des cultures, il est possible d'avoir recours à différentes techniques pour réduire les populations d'organismes nuisibles de façon efficace et rentable, dans le respect de la santé et de l'environnement. Ainsi, pour protéger leurs cultures, les producteurs ont par exemple accès à des variétés plus résistantes, issues de la sélection variétale classique ou obtenues par transformation génétique. Il est aussi possible d'implanter les cultures dans des zones adaptées, de choisir entre diverses méthodes de lutte physiques, mécaniques, biologiques ou chimiques. Ces différentes méthodes peuvent être envisagées individuellement ou combinées les unes avec les autres.

Au Québec, en regard des grandes superficies à protéger, la gestion des ennemis des cultures dans le domaine des grains nécessite souvent le recours à des pesticides. Plusieurs de ces pesticides présentent des risques pour la santé et l'environnement ([www.sagepesticides.qc.ca](http://www.sagepesticides.qc.ca)). Les ennemis des cultures peuvent également développer plus ou moins rapidement des résistances aux matières actives présentes dans les pesticides (résistance aux insecticides et herbicides notamment). De plus, ces pesticides affectent également les ennemis naturels (prédateurs, parasitoïdes<sup>1</sup>) et peuvent contaminer l'air, les sols et l'eau. Toutefois, au cours des dernières années, de nombreux efforts ont été réalisés par les producteurs et toute la filière agricole pour réduire l'utilisation de pesticides. Sous l'impulsion du

1. Petites guêpes parasites qui se développent aux dépens de leur hôte.

gouvernement provincial, plusieurs démarches ont été entreprises pour accompagner et responsabiliser les acteurs.rice.s de la filière. Cela a notamment permis de réduire l'utilisation de pesticides tels que l'atrazine (herbicide) ou les néonicotinoïdes (insecticide) utilisés dans les grandes cultures. Ces produits sont lessivables et peuvent contaminer les cours d'eau. Il a également été montré que les néonicotinoïdes sont toxiques pour les abeilles. De plus, le Québec dispose d'un réseau de surveillance bien implanté, le Réseau d'avertissements phytosanitaires (RAP), qui suit l'évolution des populations d'ennemis des cultures à travers la province. Pendant toute la saison de production, ce réseau permet d'informer les agronomes et producteur.rice.s de la présence et de la nécessité d'intervenir lorsqu'un ravageur peut affecter les cultures. Il suit également l'évolution des populations de ravageurs qui pourraient s'introduire au Québec et causer d'importants dommages aux cultures.

## Des ennemis des cultures suivis et à suivre...

**A**u cours des dernières années, le CÉROM a réalisé plusieurs projets visant à identifier les principales espèces d'insectes et maladies des grandes cultures, déjà présentes au Québec ou pouvant potentiellement s'y établir, et qui seront affectées par les changements climatiques. Un autre volet de ces projets était d'évaluer les impacts des changements climatiques sur l'aire de distribution, le développement phénologique ou la capacité d'établissement d'espèces ciblées ainsi que sur les dommages aux cultures. Enfin, ces projets ont aussi permis d'identifier des mesures d'adaptation possibles pour les espèces ciblées, et plus globalement pour la protection des grandes cultures.

La gestion des ennemis des cultures nécessite de bien les connaître, de les dépister efficacement et de cartographier leur distribution afin de bien les contrôler. Le RAP *Grandes cultures* suit annuellement près d'une vingtaine d'ennemis des cultures, dont principalement des insectes. Le réseau suit aussi l'évolution de la distribution d'une mauvaise herbe envahissante (l'amarante tuberculée) et d'un nématode (le nématode à kyste du soya). Des modèles prévisionnels concernant les risques de propagation de certaines maladies, comme la fusariose du blé, sont également disponibles au Québec<sup>2</sup>.

Parmi les ennemis des cultures suivis, certaines espèces sont indigènes et vivent toute l'année au Québec, par exemple les vers fil-de-fer (larves de taupins), les

vers blancs (larves de hannetons et scarabées) ou la chrysomèle des racines du maïs, qui passent l'hiver dans le sol, sous les débris de végétaux ou protégés par la couche de neige. D'autres migrent chaque année, comme plusieurs papillons, dont les chenilles sont des ravageurs, tels la légionnaire uniponctuée ou le ver-gris noir.

Parmi les ennemis des cultures actuellement suivis, plusieurs d'entre eux ont également fait leur apparition au Québec au cours des deux dernières décennies. C'est notamment le cas du puceron du soya. Cet insecte, arrivé dans les années 2000, est un ravageur qui peut potentiellement causer des maladies virales et des pertes de rendement dans le soya. Toutefois, il est actuellement bien contrôlé par ses ennemis naturels présents en abondance au Québec en raison d'un synchronisme adéquat entre les périodes d'activité du puceron et de ses ennemis naturels. On trouve aussi, parmi les récents ravageurs, le nématode à kyste du soya qui affecte, comme son nom le dit, le soya, ainsi que le ver-gris occidental du haricot qui attaque le maïs. Pour ce dernier, l'aire de répartition s'est fortement agrandie et on sait désormais que l'espèce est capable de survivre aux hivers québécois, probablement en raison des changements climatiques et d'une adaptation de l'insecte aux conditions locales. Les changements climatiques pourraient aussi avoir un impact sur d'autres insectes dont la chrysomèle du haricot qui affecte le soya, pour laquelle les populations sont également en augmentation et dont l'aire de répartition s'agrandit progressivement. On pourrait aussi assister à des déplacements de populations d'insectes vers des régions plus au nord, ce qui pourrait être le cas pour le méligèthe des crucifères qui s'attaquent au canola.

D'autres ravageurs encore absents du Québec sont également sous surveillance. On parle alors d'espèces exotiques envahissantes. Plusieurs insectes, maladies et mauvaises herbes sont actuellement présents dans des régions du monde qui présentent des conditions climatiques analogues ou similaires aux conditions prédites pour le Québec dans un futur soumis aux changements climatiques. À l'avenir, avec l'intensification des échanges commerciaux et les changements climatiques, certains de ces ennemis des cultures pourraient être introduits au Québec et pourraient y trouver des conditions favorables à leur établissement (notamment la présence de leur plante hôte) et leur développement. Si certains devront toujours migrer annuellement pour compléter leur cycle de développement, d'autres pourraient le compléter sous nos latitudes et pourraient même compléter plusieurs générations par année au Québec. Au cours des dernières années, plusieurs projets ont permis de dresser des listes d'ennemis des cultures qui pourraient affecter les grains à l'horizon 2050 (Mimee *et al.*, 2014, Gagnon *et al.*, 2013; Saguez *et al.*, 2017).

2. Voir [http://www.agrometeo.org/indices/category/grandes\\_cultures](http://www.agrometeo.org/indices/category/grandes_cultures)

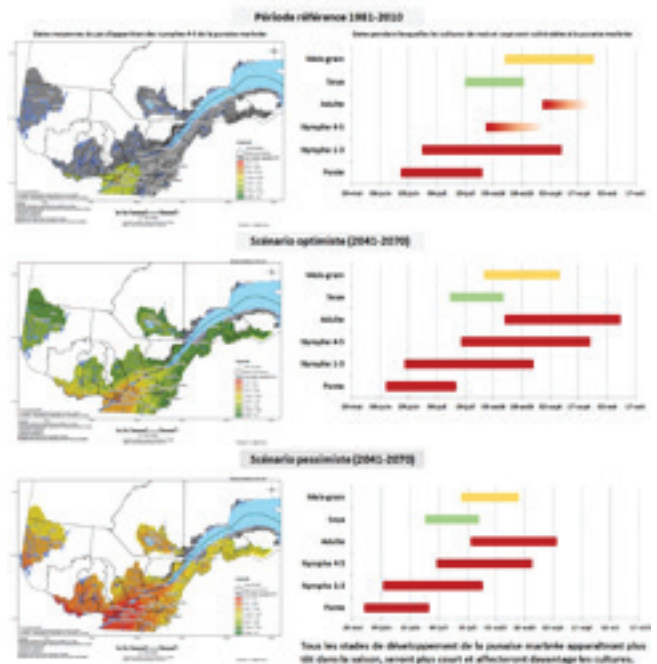
Lors d'une récente étude, nous avons constitué une base de données comprenant 230 insectes ravageurs et 267 maladies (fongiques, bactériennes, virales, phytoplasmiques et liées aux nématodes) associés aux grandes cultures, à savoir le soya, le maïs, le blé, l'orge, l'avoine et le canola. Cette base de données a été réalisée à partir de différents sites internet (p. ex. : Plantwise, CABI, EPPO) et guides de référence. Nous avons ensuite catégorisé ces espèces en fonction de leur distribution géographique (présence au Québec contre espèce exotique envahissante) puis nous avons tenu compte de leur potentiel d'introduction et d'établissement au Québec dans le futur. Une quarantaine d'espèces a ensuite été sélectionnée pour réaliser une revue de littérature approfondie (Saguez *et al.*, 2017). Cette synthèse bibliographique a permis d'approfondir les connaissances sur chacune des espèces et de déterminer si des modèles phénologiques existaient déjà. Par la suite, quelques espèces ont fait l'objet d'une étude de cas approfondie (Saguez *et al.* 2019) pour évaluer l'impact des changements climatiques à l'horizon 2050. Les études de cas ont permis de réaliser des modèles phénologiques adaptés au Québec et de modéliser les dates d'apparition des différents stades de développement des ennemis des cultures en fonction de différents scénarios climatiques.



**Figure 1.** Stades de développement de la punaise marbrée. Photos et montage: Julien Saguez - CÉROM

Parmi les ennemis des cultures qui ont fait l'objet d'études de cas, on trouve la punaise marbrée (Figure 1), parfois nommée punaise diabolique. Il s'agit d'un insecte qui est activement suivi et sera à suivre dans les prochaines années. Il est présent à Montréal depuis quelques années (Chouinard *et al.*, 2018) et n'a été capturé qu'à de rares occasions dans les grandes cultures au Québec. Cet insecte, originaire d'Asie, a été introduit accidentellement aux États-Unis à la fin des années 1990 et son aire de répartition ne cesse d'augmenter chaque année. Comme cette punaise s'attaque à une grande variété de plantes cultivées et ornementales, elle pourrait causer d'importantes pertes de rendement et une diminution de la qualité des grains et des aliments. Actuellement, son aire de distribution est limitée. Selon les différents scénarios de changements climatiques, elle s'agrandira en raison des changements climatiques qui seront favorables à l'établissement de l'espèce dans plusieurs régions agricoles et les pics

d'apparition des différents stades seront devancés, car la croissance de l'insecte sera accélérée. Par conséquent, les cultures seront exposées à cet insecte pendant plus longtemps durant leur période de croissance (Saguez, 2019; Saguez *et al.*, 2019 et figure 2). Un autre exemple est le papillon *Helicoverpa armigera*, très problématique à travers le monde, mais pas encore présent au Québec. Il pourrait, dans un futur proche, s'établir sous nos latitudes, puisqu'une espèce très proche (*Helicoverpa zea*) est présente et s'attaque déjà à la culture de maïs au Canada. *Helicoverpa armigera* pourrait aussi affecter le blé, le maïs et le soya. Les changements climatiques favoriseront le développement phénologique de cet insecte qui pourrait avoir jusqu'à trois générations sous nos latitudes (Saguez, 2019). Il est également possible que plusieurs nouvelles maladies s'implantent au Québec, comme la rouille asiatique du soya (Saguez *et al.*, 2017). Portés par les vents, les spores de ce champignon pathogène pourraient trouver des conditions propices au développement de la maladie sur leur hôte végétal. Les maladies actuellement présentes pourraient aussi évoluer puisqu'elles dépendent grandement des conditions climatiques (température, précipitation, humidité, temps d'humectation du feuillage, etc.). Dans le cas des maladies et des mauvaises herbes, les vents et les déplacements des masses d'air sont des facteurs importants pour la dispersion des spores et des graines. Il faudra tenir compte de ces facteurs dans le futur.



**Figure 2.** Dates moyennes du pic d'apparition des nymphes N4-5 de punaise marbrée dans les différentes régions du Québec et périodes de vulnérabilité du maïs et du soya aux différents stades de développement de la punaise marbrée, selon des différents scénarios climatiques pour le futur (cartes produites par Agriculture et Agroalimentaire Canada – St Jean sur Richelieu) – Voir Saguez, 2019 pour plus de détails.

# Comment l'agriculture devra-t-elle s'adapter pour contrôler les ennemis des cultures ?

**D**ans les prochaines années, le monde agricole devra faire face et s'adapter aux changements climatiques qui affecteront la croissance des plantes, mais aussi celles des ennemis des cultures. Il faut donc outiller la filière agricole pour qu'elle y soit préparée. Les différents projets menés au cours des dernières années ont permis de mettre en évidence plusieurs pistes pour assurer une bonne gestion intégrée des ennemis des cultures dans le futur.

L'acquisition de connaissances sur les ennemis des cultures est importante afin de bien connaître leur biologie, reconnaître les différents stades phénologiques, déterminer quels sont leurs ennemis naturels, les plantes qui les attirent ou les repoussent. Analyser comment se comportent les espèces actuellement présentes dans des régions analogues possédant des conditions bioclimatiques similaires à ce que nous estimons avoir dans le futur au Québec aide aussi à comprendre comment les ennemis des cultures pourraient se comporter dans nos régions si elles venaient à y être introduites. Tout cela permet, par exemple, de réaliser des fiches d'identification et de planifier les périodes critiques de dépistage.

La surveillance est aussi une étape clé. Le travail important de dépistage et de diffusion de l'information réalisé par le RAP *Grandes cultures* est essentiel pour déterminer les périodes propices aux infestations et aux interventions phytosanitaires si besoin. Le RAP permet aussi d'assurer un suivi de plusieurs ennemis des cultures et leurs ennemis naturels. Pour cela, on utilise des pièges à phéromones qui attirent les insectes. Les décomptes hebdomadaires permettent de déterminer l'évolution des populations de ravageurs. Ces pièges peuvent aussi être utilisés pour suivre l'arrivée d'espèces exotiques envahissantes sur le territoire, comme c'est le cas pour la punaise marbrée. Les dépistages permettent de mieux prédire les aires de répartition, les dates auxquelles les cultures peuvent être endommagées et les meilleurs moments pour intervenir. Les observations au champ effectuées par les agronomes, les conseillers et techniciens agricoles sont également des

éléments clés de la surveillance et de la phytoprotection. Leur rôle est essentiel, tout comme celui des citoyens impliqués dans des projets participatifs pour rapporter la présence de nouvelles espèces par le biais de diverses applications numériques<sup>3</sup>. Les modèles prédictifs, de plus en plus précis, permettent aussi d'envisager les zones favorables au développement et à l'établissement d'une espèce.

Depuis quelques années, plusieurs outils novateurs ont été développés, comme des applications numériques capables de reconnaître des insectes, des mauvaises herbes ou des maladies. Plusieurs types de pièges et capteurs automatisés et connectés, faisant appel à l'intelligence artificielle, ont été développés et permettent de compiler des données plus rapidement et plus précisément, favorisant ainsi les suivis de populations. Des réseaux de surveillance pancanadien et nord-américain se mettent en place pour mieux comprendre la dispersion des ennemis des cultures comme le « Prairie Pest Monitoring Network » ou le « Great Lakes and Maritime Pest Monitoring Network ».

Avec les changements climatiques, il faudra inévitablement s'adapter et modifier ou diversifier les méthodes de lutte. Certains ennemis des cultures ne pourront peut-être plus être contrôlés efficacement par leurs ennemis naturels (perte de synchronisme des cycles de développement, absence de prédateurs pour une espèce exotique envahissante - Brodeur *et al.*, 2013) et cette situation pourrait conduire à une augmentation de l'utilisation de pesticides. Pour s'adapter, la filière agricole devra probablement trouver de nouvelles méthodes de lutte (p. ex. : filet de protection, variétés plus résistantes) ou introduire des ennemis naturels.

Les travaux effectués au cours des dernières années au Québec pour évaluer l'impact des changements climatiques sur les ennemis des grandes cultures montrent que les productions agricoles évolueront et seront soumises à plusieurs défis en termes de phytoprotection, mais ceux-ci sont loin d'être insurmontables. Il faudra démontrer de la vigilance et poursuivre les efforts de dépistage et de maillage pour éviter que les ennemis des cultures ne mettent en péril nos précieuses cultures de grains au Québec. Les méthodes de contrôle utilisées dans d'autres pays devraient nous servir de modèles pour assurer une bonne adaptation aux changements climatiques et une gestion intégrée adéquate des ennemis des cultures.

3. Par exemple : iNaturalist, eButterfly, eTick, Spotteron, Great Lakes and Maritimes Pest Monitoring Network

## Tableau 1. Quelques impacts potentiels des changements climatiques sur l'agriculture

- ✓ Augmentation des températures
- ✓ Hivers plus courts et plus chauds
- ✓ Évènements météorologiques extrêmes (tempêtes, inondations, ...) plus fréquents
- ✓ Allongement de la saison de croissance (plusieurs jours à plusieurs semaines selon les régions)
- ✓ Modification des calendriers de semis et de récolte
- ✓ Augmentation des stress biotiques et abiotiques chez certaines cultures
- ✓ Amélioration des rendements de certaines productions agricoles
- ✓ Développement de nouvelles variétés et de nouveaux hybrides mieux adaptés
- ✓ Déplacement de la production de certaines cultures vers des régions plus nordiques
- ✓ Augmentation de la pression des ennemis des cultures
- ✓ Migration, introduction et établissement d'espèces exotiques envahissantes
- ✓ Augmentation de l'utilisation des pesticides pour contrôler les ennemis des cultures

## RÉFÉRENCES

**Atlas climatique du Canada. (2020).** Cartes sur les changements climatiques et agriculture. Repéré à <https://atlasclimatique.ca/cartes-sur-les-changements-climatiques-et-agriculture>

**Brodeur, J., Boivin, G., Bourgeois, G., Cloutier, C., Doyon, J., Grenier, P. et Gagnon, A.-È. (2013).** *Impacts des changements climatiques sur le synchronisme entre les ravageurs et leurs ennemis naturels : conséquences sur la lutte biologique en milieu agricole au Québec.* Repéré à <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportBrodeur2013.pdf>

**Chouinard, G., Larose, M., Légaré, J.-P., Bourgeois, G., Racette, G. et Barrette M. (2018).** Interceptions and captures of *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) in Quebec from 2008 to 2018. *Phytoprotection*. 98(1), 46-50.



Crédit photo : Polina Rytova

**Gagnon, A.-È., Arsenault-Labrecque, G., Bourgeois, G., Bourdages, L., Grenier, P., Roy, M. (2013).** *Études de cas pour faciliter une gestion efficace des ennemis des cultures dans le contexte de l'augmentation des risques phytosanitaires liés aux changements climatiques.* Repéré à [https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/FicheGagnon2013\\_FR.pdf](https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/FicheGagnon2013_FR.pdf)

**Gagnon, A.-È., Roy, M., Roy, A. (2011).** Document synthèse : *Impacts directs et indirects des changements climatiques sur les ennemis des cultures.* Repéré à [https://agriclimat.ca/wp-content/uploads/2018/10/2.-Impacts-directs-et-indirects-des-CC-sur-les-ennemis-des-cultures\\_Gagnon-et-al.pdf](https://agriclimat.ca/wp-content/uploads/2018/10/2.-Impacts-directs-et-indirects-des-CC-sur-les-ennemis-des-cultures_Gagnon-et-al.pdf)

**MAPAQ. (2020).** *Portrait diagnostic de l'industrie des grains au Québec.* Repéré à <https://www.mapaq.gouv.qc.ca/fr/Publications/Monographiegrain.pdf>

**Mimee, B., Brodeur, J., Bourgeois, G., Moiroux, J., Gendron St-Marseille, A.-F. et Gagnon, A.-È. (2014).** *Quels enjeux représentent les changements climatiques en lien avec les espèces exotiques envahissantes pour la culture du soya au Québec ?* Repéré à <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportMimee2014.pdf>

**OURANOS. (2015).** *Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec.* Repéré à <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/SyntheseRapportfinal.pdf>

**Saguez, J., Gagnon, A.-È., Kichou, D., Brodeur, J., Rioux, S., Zogh-lami, S. et Blondlot, A. (2017).** Impact des changements climatiques et mesures d'adaptations pour les ravageurs présents et potentiels en grandes cultures au Québec. Synthèse bibliographique. Repéré à <https://www.agrireseau.net/agroclimatologie/documents/96147/impact-des-changements-climatiques-et-mesures-d-adaptations-pour-les-ravageurs-presents-et-potentiels-en-grandes-cultures-au-quebec>

**Saguez, J., Boquel, S., Légaré, J.-P., St-Laurent, M., Gagnon, A.-È. (2019).** Punaise marbrée ou Punaise diabolique. Fiche technique. Identification, Biologie, Impact des changements climatiques, stratégies d'intervention. Repéré à <https://www.agrireseau.net/grandescultures/documents/100798/punaise-marbrée-ou-punaise-diabolique-fiche-technique-identification-biologie-impact-des-changements-climatiques-strategies-d-intervention>

**Saguez, J. (2019).** *Impact des changements climatiques et mesures d'adaptations pour les ravageurs présents et potentiels en grandes cultures au Québec.* Repéré à <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportSaguez2019.pdf>