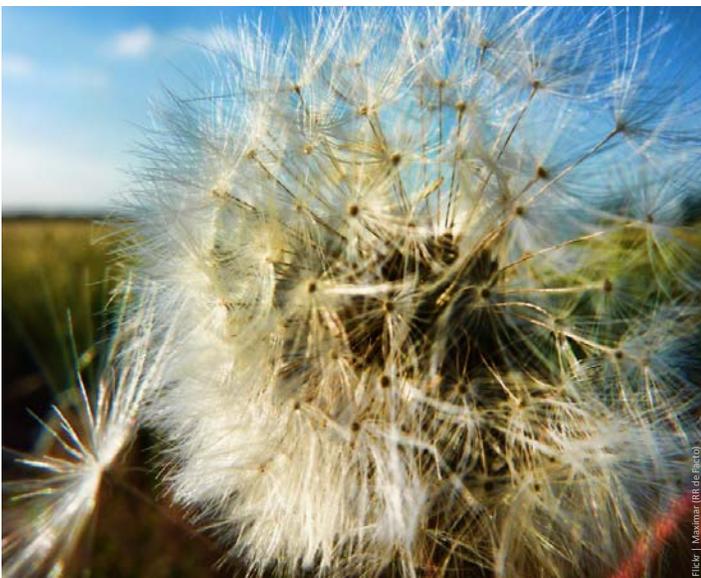


# Document synthèse



Flickr | Zvezdarist



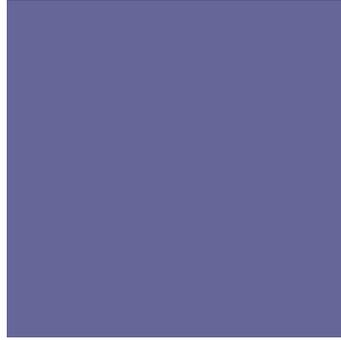
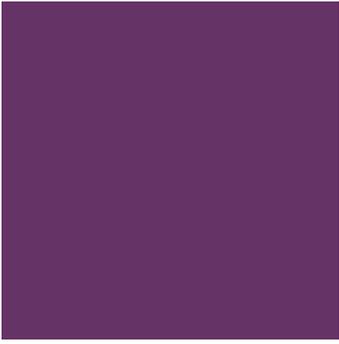
Flickr | Maximilian (Re de Fazio)



Flickr | JemmyVT

## Impacts directs et indirects des changements climatiques sur les ennemis des cultures

Annie-Ève Gagnon, Michèle Roy, Audrey Roy



# Avant-propos

Cette synthèse a été réalisée dans le cadre du projet intitulé : «*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*». Ce projet est soutenu par la mesure 26 du Plan d'action sur les changements climatiques 2006-2012 du gouvernement du Québec et réalisé en collaboration avec Ressources naturelles Canada. Ce document dresse un portrait des impacts probables que les changements climatiques pourraient engendrer sur les ennemis des cultures.

Agriculture, Pêcheries  
et Alimentation  
Québec



Ressources naturelles  
Canada

Ministère des Ressources  
Humaines

Canada

Fondsvert Québec

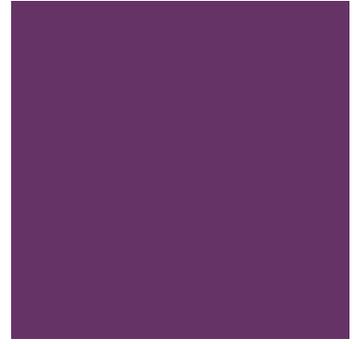


# Table des matières

<b>LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES AU QUÉBEC</b>	<b>6</b>
<b>LA PHYTOPROTECTION</b>	<b>8</b>
<b>LES INSECTES RAVAGEURS</b>	<b>10</b>
<b>Importance des insectes dans le secteur agricole au Québec</b>	<b>11</b>
<b>Impact des changements climatiques sur les insectes ravageurs</b>	<b>12</b>
Température	13
Précipitations et sécheresses	18
Vent	18
CO <sub>2</sub>	18
La capacité d'adaptation des insectes à ces nouvelles conditions	19
<b>Interactions plante-insecte ravageur</b>	<b>20</b>
CO <sub>2</sub>	20
O <sub>3</sub>	27
Température	27
Adaptation	29
<b>Mesures de gestion</b>	<b>29</b>
<b>Modélisation de l'impact des insectes ravageurs dans le futur</b>	<b>30</b>
<b>Orientations de recherche</b>	<b>31</b>
<b>À retenir...</b>	<b>31</b>
<b>LES AGENTS PATHOGÈNES</b>	<b>33</b>
<b>Importance des agents pathogènes dans le secteur agricole au Québec</b>	<b>34</b>
<b>Impacts des changements climatiques sur les agents pathogènes</b>	<b>35</b>
Température	36
Précipitations	37
CO <sub>2</sub>	37
O <sub>3</sub>	38
<b>Impact des changements climatiques sur les ennemis des cultures</b>	<b>3</b>

Principales maladies influencées par les changements climatiques en Ontario	39
<b>Interactions plante-agent pathogène</b>	<b>42</b>
<b>Mesures de gestion</b>	<b>42</b>
<b>Modélisation de l'impact des agents pathogènes dans le futur</b>	<b>44</b>
<b>Orientations de recherche</b>	<b>46</b>
<b>À retenir...</b>	<b>47</b>
<b>LES MAUVAISES HERBES</b>	<b>48</b>
<b>Importance des mauvaises herbes dans le secteur agricole au Québec</b>	<b>49</b>
<b>Impacts des changements climatiques sur les mauvaises herbes</b>	<b>50</b>
CO <sub>2</sub>	51
Température et précipitations	54
Évolution, adaptation et acclimatation	55
<b>Interactions culture -mauvaise herbe</b>	<b>56</b>
<b>Mesures de gestion</b>	<b>58</b>
CO <sub>2</sub>	58
Température	59
<b>Modélisation de l'impact des mauvaises herbes dans le futur</b>	<b>59</b>
<b>Orientations de recherche</b>	<b>61</b>
<b>À retenir...</b>	<b>62</b>
<b>REMERCIEMENTS</b>	<b>63</b>
<b>RÉFÉRENCES</b>	<b>64</b>
<b>ANNEXES</b>	<b>71</b>
<b>MODÈLES CLIMATIQUES</b>	<b>76</b>
<b>SCÉNARIOS D'ÉMISSIONS</b>	<b>77</b>
<b>GLOSSAIRE</b>	<b>78</b>





# Les changements climatiques au Québec

Les changements climatiques se font déjà sentir depuis quelques années tant au niveau mondial (**GIEC**, 2007) que sur le territoire québécois. Au cours du passé récent (1960-2005) la température journalière du sud du Québec a augmentée entre 0,2 et 0,4°C par décennie. Ceci a provoqué un raccourcissement de la durée de la saison de gel et une augmentation du nombre de degrés-jours durant la saison de croissance (Ouranos, 2010). Les précipitations en sont aussi affectées avec une augmentation du nombre de jours avec précipitations de faible intensité, une diminution des précipitations solides

## 6 Impact des changements climatiques sur les ennemis des cultures

dans le sud du Québec alors qu'une augmentation a été observée dans le nord du Québec.

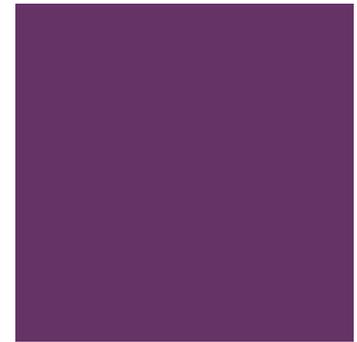
Le climat projeté pour l'**horizon** 2050 prédit un réchauffement climatique plus marqué en hiver ainsi que dans le nord du Québec (Tableau 1). L'augmentation des précipitations hivernales engendrera une accumulation de neige au sol plus marquée dans les régions au nord du Québec alors que dans le sud du Québec, les hausses de températures et le raccourcissement de la saison froide diminueront l'accumulation de neige au sol. Durant la saison estivale, aucun changement des précipitations n'est attendu dans le Sud alors que la hausse des précipitations serait de 3 à 12.1% dans le Nord.

**Tableau 1. Augmentation des températures attendues pour l'horizon 2050**

Région	Hiver	Été
Sud du Québec	2,5 – 3,8 °C	1,9 – 3,0°C
Nord du Québec	4,5 – 6,5°C	1,6 – 2,8°C

---

Source : Ouranos, 2010



# La phytoprotection

Cultiver dans le but de produire des denrées agricoles demande considérablement d'attention, car il faut connaître, surveiller et tenter de contrôler les organismes qui sont en compétition, consomment ou parasitent les cultures agricoles. C'est pour ces raisons que plusieurs personnes et organisations œuvrent en phytoprotection au Québec. L'objectif de la protection des cultures est de mettre en place des actions pour prévenir et minimiser l'impact des problèmes phytosanitaires afin d'assurer la rentabilité et la compétitivité des entreprises agricole. Ainsi, les intervenants travaillant dans ce domaine ont des champs d'expertise possiblement liés aux mesures législatives, à la surveillance phytosanitaire, à la lutte antiparasitaire et/ou à la recherche et l'innovation.

## 8 Impact des changements climatiques sur les ennemis des cultures

Une chaîne de communication reliant les champs agricoles aux édifices à bureaux permet aux producteurs agricoles, conseillers agricoles, fabricants et distributeurs de produits antiparasitaires, centres d'expertises et de recherche, université ainsi qu'aux gouvernements fédéral et provincial de faire progresser la gestion des ennemis des cultures. La nature étant complexe, la découverte d'une panacée pour les problèmes phytosanitaires est fort peu probable surtout sous un avenir teinté par la mondialisation des marchés et les changements climatiques. Néanmoins, plusieurs mesures d'adaptation peuvent être entreprises afin de minimiser les impacts négatifs dus aux changements climatiques. C'est dans ce contexte que l'étude des impacts potentiels des changements climatiques dans le secteur de la phytoprotection prend tout son sens afin de proposer des stratégies d'adaptation à l'image de la réalité agricole du Québec.

# Les insectes ravageurs\*



---

\* Le terme *insecte ravageur*, bien que restreint habituellement aux organismes appartenant à cette classe, est utilisé dans ce texte pour représenter tout organisme arthropode ravageur, incluant donc ainsi les acariens.

10 Impact des changements climatiques sur les ennemis des cultures

# Importance des insectes dans le secteur agricole au Québec

Les cultures agricoles abritent et soutiennent une entomofaune constituée de diverses espèces d'insectes et d'acariens. Certaines espèces sont des alliés des producteurs puisqu'elles assurent une prédation naturelle ou contribuent à une récolte de fruits abondante par la pollinisation. Malgré leur nombre et leur diversité incroyable, seulement quelques espèces sont considérées comme des ravageurs pouvant causer des pertes de rendement justifiant des interventions de la part des producteurs. La plupart de ces espèces ont développé des goûts particuliers pour une ou différentes familles de plantes ainsi que pour un stade ou un organe spécifique. Ainsi, certains ravageurs vivent principalement sous la terre s'attaquant aux racines ou aux plantules tandis que d'autres raffolent de feuilles, de fruits ou de semences.

Pour prévenir une infestation de ravageurs, en plus des ennemis naturels, différents outils s'offrent aux producteurs tels la rotation des cultures, l'utilisation de plantes pièges ou de plantes banques, le choix de cultivars résistants ou génétiquement modifiés (Bt), l'introduction de parasitoïdes, l'utilisation de filets anti-insectes,

l'application d'huile de dormance, l'utilisation de semences traitées avec un insecticide systémique, etc. Toutefois, lorsque la population d'un ravageur dépasse le seuil d'intervention recommandé, l'application d'insecticide peut s'avérer nécessaire, particulièrement s'il s'agit d'un ravageur-clé. Les insecticides viennent au 3<sup>e</sup> rang des produits les plus vendus en terme de volume (12,5 %) dans le secteur de la production agricole, selon le bilan des ventes de pesticides au Québec pour l'année 2008.

# Impact des changements climatiques sur les insectes ravageurs

Les études sur l'impact des changements climatiques chez les insectes portent principalement sur les espèces phytophages puisqu'elles dominent la biodiversité locale, entrent en interaction avec plus d'un niveau trophique (la plante hôte et l'ennemi naturel) et peuvent avoir un impact économique majeur sur l'agriculture (Ladanyi et Horvath, 2010). Les impacts des changements climatiques sur les insectes sont étroitement liés à l'augmentation de la température, un paramètre climatique d'importance régulant leur vitesse de développement. D'autres paramètres bioclimatiques ont également leur rôle à jouer dans les impacts sur la biologie des insectes, tel l'augmentation du CO<sub>2</sub>, les précipitations et le vent.

# Température

La température a un effet indéniable sur le développement des insectes. Ces organismes **poïkilothermes** dépendent directement des conditions climatiques extérieures qui régulent la vitesse de leur métabolisme (Andrewartha et Birch, 1954). L'impact de la température est plus prononcé sur les insectes foliaires que les insectes au sol puisque les variations de température y sont plus grandes (Bale et al., 2002).

Voici un ensemble de modifications pouvant survenir chez les insectes lors d'une augmentation des températures:

## *Modification des taux de croissance des insectes*

La plupart des études démontrent une augmentation du taux de croissance des insectes ravageurs avec l'augmentation des températures (Fuhrer, 2003; Patterson, 1999). D'autres ont observé une diminution de l'impact de certains ravageurs, telle la diminution des populations du pucerons des céréales en Grande-Bretagne en considérant des hausses de températures ainsi que de la concentration en CO<sub>2</sub> atmosphérique? (Newman 2006). Estay et al. (2009) ont modélisé l'influence de la température et des précipitations sur la densité de deux ravageurs des grains *Tribolium confusum* et *Callosobruchus chinensis* dans huit villes du Chili. Les changements climatiques augmenteraient les densités de ces deux ravageurs, engendrant ainsi un impact positif sur les populations d'insectes dans les villes plus au sud, présentement peu affectées par ces espèces. Ainsi, un ravageur secondaire, déjà présent dans une région, peut voir ses populations augmenter avec les changements climatiques et atteindre le seuil de nuisibilité de la culture.

### *Augmentation du nombre de générations par saison de croissance.*

Plusieurs études ont démontré une augmentation du **voltinisme** avec les changements climatiques (Porter et al., 1991). Une des premières études réalisées portait sur la pyrale du maïs, pour laquelle on observait le développement d'une génération additionnelle sous des changements climatiques (Porter et al., 1991). Altermatt (2010) a ensuite appuyé cette constatation avec une démonstration robuste de l'augmentation du **voltinisme** chez plus de 250 espèces de lépidoptères européens, depuis les années 1980 (voir Figure 1). De plus, une autre étude soutient que les populations de la pyrale du maïs supporteront deux générations par année avec les changements climatiques pour un **horizon** aussi proche que 2025 alors qu'une seule génération par année est observée présentement en République tchèque (Figure 2) (Trnka et al., 2007). Le **voltinisme** est sous contrôle génétique et environnemental (accumulation de degrés-jours, longueur du jour, scotophase [partie de la nuit où le soleil est à moins de 6° en dessous de l'horizon] et latitude) (Trnka et al., 2007). Ainsi, chez certaines espèces, les stades **diapausants** sont régis par des signaux découlant de la photopériode et non de la température, ce qui peut limiter le multivoltinisme dans des conditions plus chaudes (Tobin et al., 2008). Il n'est donc pas certain que le réchauffement climatique aura un effet direct et linéaire sur le **voltinisme** bien que plusieurs exemples démontrent cette tendance.

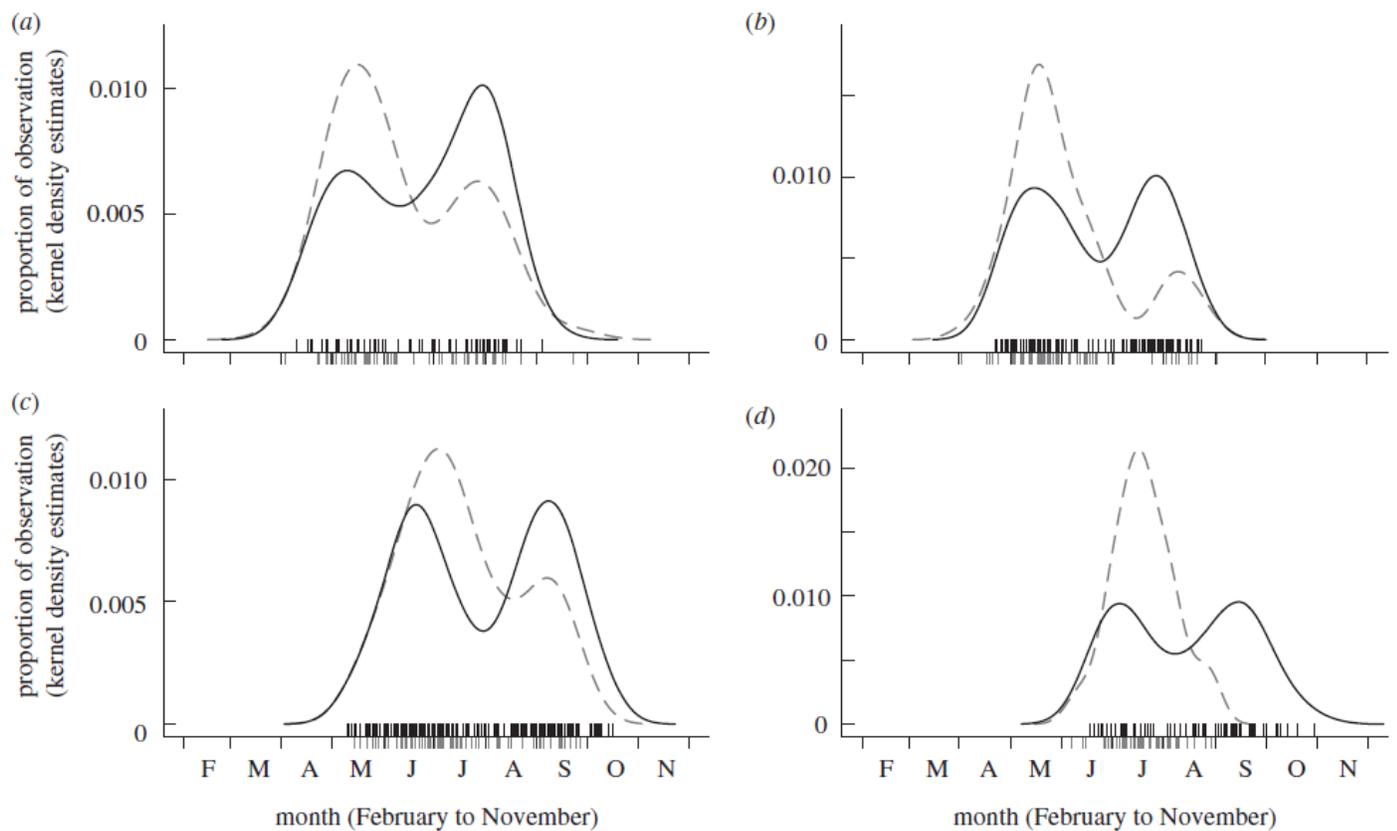


Figure 1. Exemples d'espèces de Lépidoptères ayant une augmentation d'une seconde génération après 1980 (trait plein) comparée à avant 1980 (trait pointillé) : a) *Leptidea sinapis* (Pieridae); b) *Plagodis dolabraria* (Geometridae); c) *Hypena proboscidalis* (Noctuidae); d) *Lithosia quadra* (Arctiidae). (Tiré de Altermatt, 2010)

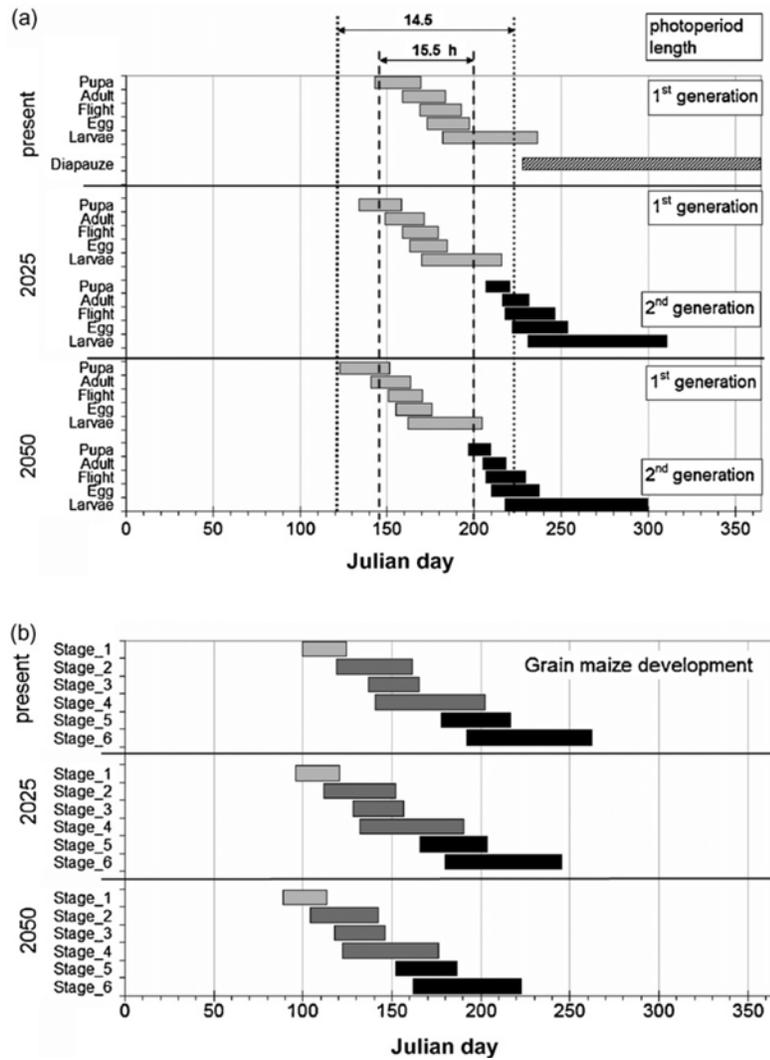


Figure 2. Exemple du a) cycle de vie modifié de la pyrale du maïs et b) du développement du maïs, selon deux projections climatiques (SRES A2, modèle ECHAM). Le développement d'une deuxième génération serait possible dès 2025 en République tchèque. (Tiré de Trnka et al. (2007))

## 16 Impact des changements climatiques sur les ennemis des cultures

### *Meilleure survie hivernale ou survie hivernale possible*

Sous les conditions climatiques des régions tempérées, les insectes doivent faire face à des températures froides durant les mois d'hiver. La survie hivernale serait le facteur dominant affectant la phénologie de cinq espèces de pucerons (*Brachycaudus helichrysi*, *Elatobium abietinum*, *Metopolophium dirhodum*, *Myzus persicae*, *Sitobion avenae*) (Zhou et al., 1995). Ainsi, une augmentation de 1°C de la température moyenne hivernale devancerait le moment de migration de 4 à 19 jours selon l'espèce, due à l'augmentation de la survie hivernale. Cette modification phénologique permettrait aux pucerons de se nourrir sur une plus grande période de temps, augmentant ainsi les dommages causés aux plantes et les risques de transmission de virus. Par ailleurs, d'autres espèces ne peuvent survivre aux conditions extrêmes des hivers actuels et ne peuvent donc pas s'établir sous nos territoires. Les hausses de température pourraient éventuellement permettre l'établissement de ces espèces venant du sud, ou encore celles qui infestent les serres chauffées et qui pourraient s'échapper pour s'établir sous nos conditions climatiques modifiées.

### *Extension de l'aire géographique, migration vers le nord ou en altitude*

Les scénarios climatiques prédisent l'expansion de l'aire de distribution de la pyrale du maïs jusqu'à 1200 km vers le Nord, ou de 165 à 500 km pour chaque augmentation de 1°C (Porter, 1991). Plusieurs modèles mathématiques démontrent également une redistribution (expansion au nord et/ou réduction au sud) de l'aire de répartition des espèces (Jeffree et Jeffree, 1996). Un modèle canadien basé sur des augmentations de température de 3°C prédit une augmentation des risques phytosanitaires associés à trois espèces de ravageurs (*Oulema melanopus*, *Meligethes viridescens*, *Ceutorhynchus obstrictus*) causée par une expansion de l'aire de distribution ainsi que par l'accroissement de l'abondance relative de ces espèces (Olfert et Weiss, 2006b). Néanmoins, alors que la distribution d'une espèce est limitée principalement par le climat, la disponibilité des ressources ainsi que les interactions entre espèces sont aussi

responsables du patron de distribution d'une espèce. Une fois sur place, le potentiel de dispersion d'une espèce se retrouve limité par les propriétés migratrices de cette dernière ainsi que par la fragmentation de l'habitat (Lawton, 1995).

## Précipitations et sécheresses

Les inondations peuvent affecter l'**oviposition** des insectes ainsi que la survie des insectes au sol. Les hausses du régime des pluies peuvent ainsi augmenter l'incidence du ravageur *Agriotes lineatus*, un ver fil-de-fer attaquant, entre autres, la culture de la pomme de terre (Staley et al., 2007). Les sécheresses, quant à elles, concentrent les glucides, rendant la plante plus attrayante pour les insectes (Ziska et Runion, 2007).

## Vent

Le vent peut jouer un rôle au niveau de la dispersion des insectes. Certaines espèces, telles que les pucerons, sont dispersées par le vent et peuvent parcourir ainsi de grandes distances. D'autres insectes, tel que le doryphore de la pomme de terre, peuvent être perturbés dans leurs déplacements lors de grands vents, limitant ainsi la propagation de ces ravageurs (Boiteau, G., *communication personnelle*).

## CO<sub>2</sub>

L'impact direct du CO<sub>2</sub> sur les insectes est peu documenté, mais certaines modifications de leur comportement alimentaire ont été associées aux changements physiologiques

et/ou morphologiques de la plante-hôte en conditions élevées de CO<sub>2</sub> (voir section Interactions plante-insecte ravageur). De façon directe, le CO<sub>2</sub> peut néanmoins stimuler l'**oviposition** chez les insectes, tel que chez la chrysomèle des racines du maïs, lorsque les conditions de CO<sub>2</sub> sont élevées (Schroeder et al., 2006).

L'interaction entre tous ces facteurs devrait être plus fréquemment considérée dans les études puisque dans la nature, plusieurs peuvent varier simultanément (Cannon, 1998).

## La capacité d'adaptation des insectes à ces nouvelles conditions

Des espèces soumises à des conditions climatiques différentes peuvent s'adapter rapidement à ces nouvelles conditions. Les écologistes annoncent une vitesse d'évolution plus rapide chez les insectes, puisque : i) les insectes sont extrêmement diversifiés; ii) leur temps de génération est généralement très court; iii) ils possèdent un niveau élevé d'**hétérozygotie**; iv) ils disposent de nombreuses sous-populations dispersées; v) ils sont adaptés localement à leur environnement et vi) ils sont de petites tailles.

Une augmentation des phénotypes méridionaux, *i.e.* ayant une réponse photopériodique courte, de l'espèce de moustique, *Wyeomyia smithii*, a été observée sur une courte échelle de temps (5 ans), démontrant la présence d'une microévolution due aux changements climatiques (Bradshaw et Holzapfel, 2001). Toutefois, il a été démontré que l'évolution morphologique est improbable sous des changements climatiques et que les preuves démontrant une évolution physiologique ou comportementale sont rares (Lawton, 1995).

La **paléontologie** possède un discours similaire par rapport à l'incapacité des insectes à s'adapter morphologiquement (Coope, 1995). L'inventaire des fossiles observés sur plusieurs milliers d'années (environ 13 000 ans) fait ressortir une constance morphologique exemplaire au niveau des espèces au cours de l'histoire. Les insectes auraient ainsi peu évolué et auraient opté pour la migration vers des milieux optimaux afin de survivre plutôt qu'une adaptation morphologique ou comportementale.

# Interactions plante-insecte ravageur

## CO<sub>2</sub>

L'augmentation du CO<sub>2</sub> accroît le ratio C: N des plantes, ce qui peut créer plusieurs impacts sur l'interaction plante: insecte herbivore : i) modification du comportement alimentaire de l'insecte herbivore, ii) modification de la concentration des composés chimiques de défense des plantes, iii) réponse de compensation des plantes face à l'herbivorie, iv) compétition entre les ravageurs (voir aussi Tableau 2) (Coviella et Trumble, 1999). La diminution de la qualité de la plante (diminution de l'apport en azote) pourrait augmenter le taux de consommation des insectes herbivores pour obtenir suffisamment de nutriments. Par ailleurs, les hausses de concentrations en CO<sub>2</sub> peuvent attirer un plus grand nombre d'herbivores, en augmentant les concentrations de sucre. Ainsi, une augmentation de 57 % des dommages causés par le scarabée japonais et la coccinelle mexicaine des haricots dans la culture du soya a été observée à des concentrations de CO<sub>2</sub> de 550 ppm (équivalent à 2100 selon le scénario B1; voir

Figure 3) par rapport à la concentration ambiante (environ 380 ppm) (Hamilton et al., 2005). Ballhorn et collaborateurs (2010) ont également démontré une hausse de consommation du jeune feuillage des plants de fèves de Lima par la coccinelle mexicaine des haricots en conditions élevées de CO<sub>2</sub>. Cette hausse serait en partie due à la diminution des composés de défense à base d'azote chez les jeunes feuilles.

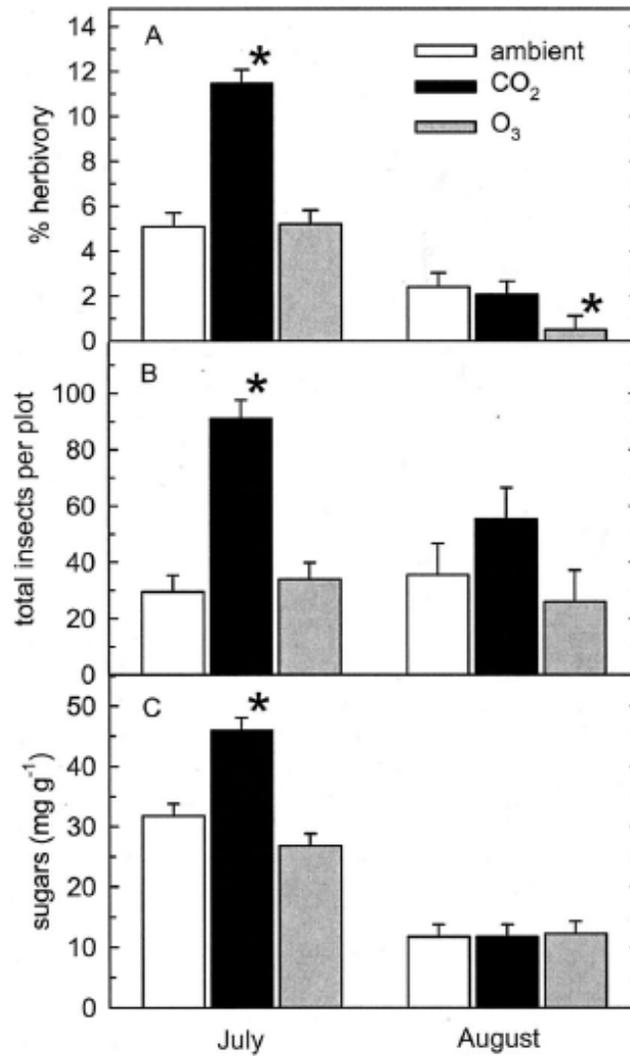


Figure 3. Réponse de deux insectes herbivores du soya, le scarabée japonais et la coccinelle mexicaine des haricots, face à des augmentations de CO<sub>2</sub> et d'O<sub>3</sub>: A) Pourcentage d'aire de feuilles consommées par les insectes herbivores; B) Nombre total d'insectes par parcelle; et C) Concentration en glucides de la feuille. (Tiré de Hamilton et al. (2005))

Par ailleurs, certaines études démontrent que la performance des insectes herbivores se nourrissant sur des plantes en condition de CO<sub>2</sub> atmosphérique élevée serait diminuée (Cannon, 1998; Hunter, 2001). Un ralentissement du développement de l'insecte herbivore augmenterait les risques de parasitisme ou de prédation chez celui-ci (Wolfe, 2008). Contrairement aux insectes herbivores broyeur, les insectes se nourrissant du phloème de la plante, tel que les pucerons, ne seraient pas affectés négativement par l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> atmosphérique (Cannon, 1998; Flynn et al., 2006; Hughes et Bazzaz, 2001). Ainsi, la réponse de l'insecte herbivore face à l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> est variable selon l'espèce d'insecte, mais aussi selon la plante hôte (Cannon, 1998; Fuhrer, 2003).

L'augmentation du CO<sub>2</sub> peut également modifier le pouvoir de résistance d'une plante face à un insecte herbivore en modifiant sa composition chimique. Par exemple, il a été démontré que chez le soya, les hausses de concentration de CO<sub>2</sub> diminuent la concentration d'inhibiteurs de cystéine protéinase dans la plante, un répulsif spécifique des coléoptères herbivores. Ceci rendrait la plante plus vulnérable aux attaques de deux insectes herbivores communs du soya, le scarabée japonais et la chrysomèle des racines du maïs (Zavala et al., 2008). Dermody et collaborateurs (2008) ont aussi démontré une augmentation du nombre de chrysomèles des racines du maïs ainsi que des pucerons du soya dans le soya cultivé sous de fortes concentrations de CO<sub>2</sub>.

Tableau 2. Quelques cas démontrant des impacts positifs et négatifs de l'augmentation du CO<sub>2</sub> sur les insectes (tiré de Trumble et Butler (2009))

Impact	Description
Augmentation...	Taux de consommation des lépidoptères
	Reproduction chez les pucerons
	Prédation par les coccinelles
	Composés de défenses des plantes à base de carbone (composés phénoliques et tanins; ex : coton)
	Effet de l'application foliaire de <i>Bt</i>
Diminution...	Taux de développement des insectes
	Réponse aux phéromones d'alarme par les pucerons
	Parasitisme
	Effet transgénique du <i>Bt</i>
	Composés de défense des plantes à base d'azote (alcaloïdes et glycosides cyanogéniques; ex : pomme de terre et prune)

L'impact de l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique sur les plantes et les insectes a souvent été critiqué puisque les expériences en milieux contrôlés optimisent les autres paramètres (température, eau), ne reflétant pas de façon juste l'ensemble des variables des changements climatiques. Par ailleurs, certains ont mentionné que le pouvoir d'adaptation des plantes pourrait diminuer l'effet fertilisant à long terme (Coviella et Trumble, 1999; Sage et al., 1989). Plusieurs auteurs prônent maintenant l'utilisation du dispositif **FACE** (Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment) permettant d'observer sur le terrain l'impact de l'élévation de la concentration de ce gaz sur les insectes herbivores (DeLucia et al., 2008). Une méta-analyse de l'utilisation de ce dispositif a permis dans quelques cas de confirmer ou de corriger les conclusions de certains impacts (Tableau 3) (Ainsworth et Long, 2005).

Tableau 3. Comparaison des résultats généraux de la réponse des plantes à l'augmentation du CO<sub>2</sub> à l'aide des expériences de type **FACE** vs les études précédentes d'augmentation de CO<sub>2</sub>. Tiré de Ainsworth et Long, 2005.

Generality	FACE	Prior	Certainty
Order of C <sub>3</sub> functional group responsiveness	Trees > legumes > C <sub>3</sub> grasses	Legumes <sup>1</sup> > grasses <sup>2</sup> > woody plants <sup>3</sup>	Low
C <sub>3</sub> vs C <sub>4</sub> response	C <sub>3</sub> >> C <sub>4</sub> C <sub>3</sub> ≈ C <sub>4</sub> <sup>2</sup>	No difference in functional groups <sup>4</sup> C <sub>3</sub> > C <sub>4</sub> <sup>5</sup>	Low
Sustained increase in carbon uptake	Yes No <sup>5</sup>	Yes <sup>4,8</sup>	High
Acclimation of photosynthesis	V <sub>c,max</sub> /J <sub>max</sub>	No change in V <sub>c,max</sub> /J <sub>max</sub> <sup>4,6</sup>	High
Decrease in leaf N	Specific to and accounted for by Rubisco	Dilution effect <sup>6,8</sup>	Medium
Increase in leaf-area index	Trees only No <sup>8</sup>	Yes <sup>7</sup>	Low
Stimulation in crop yield	Small	Large <sup>9,10</sup>	Medium

<sup>1</sup>Jablonski *et al.* (2002); <sup>2</sup>Wand *et al.* (1999); <sup>3</sup>Curtis & Wang (1998); <sup>4</sup>Nowak *et al.* (2004); <sup>5</sup>Bazzaz (1990); <sup>6</sup>Medlyn *et al.* (1999); <sup>7</sup>Saralabai *et al.* (1997); <sup>8</sup>Drake *et al.* (1997); <sup>9</sup>Kimball (1983); <sup>10</sup>Kimball *et al.*, 2002).

General level of certainty of our findings is based on sample sizes and confidence intervals around our meta-analytic results.

# Changements physiologiques de la plante hôte

Les volatiles contenus dans les plantes, tel que le 2-hexenal, permettent aux insectes herbivores de localiser leur hôte et de s'y rassembler. L'augmentation du CO<sub>2</sub> favorise la production de ces volatiles et pourrait accentuer les épidémies d'insectes (O'Neill et al., 2010a). L'augmentation du CO<sub>2</sub> peut également modifier la composition des substances de défenses de la plante, modifiant ainsi les interactions plante : insectes herbivores (O'Neill et al., 2010b). Par ailleurs, une étude a observé, à l'aide de micro-puce d'ADN, la réponse du soya face à l'herbivorie par *Popillia japonica* en conditions élevées de CO<sub>2</sub>. La résistance de la plante y était diminuée lorsque la concentration de CO<sub>2</sub> était élevée et rendait ainsi le soya plus vulnérable à l'herbivorie (Casteel et al., 2008).

## L'hypothèse de la balance carbone-nutriment

Cette hypothèse soutient que les types de défense d'une plante dépendent des variations de nutriments disponibles dans l'environnement. Ainsi, dans un milieu plus riche en carbone, des composés de défense à base de carbone seront produits alors qu'un environnement riche en azote prédisposera les plantes à synthétiser des composés de défenses à base d'azote. Selon cette hypothèse, une augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique provoquerait une élévation, de façon générale, des composés de défense à base de carbone chez les plantes. Ainsi, une diminution des composés de défense à base d'azote, tel que les protéines Bt chez les cultivars de coton Bt en conditions élevées de CO<sub>2</sub> suite à l'attaque par la noctuelle *Helicoverpa armigera*, alors que les tannins et le gossypol, deux

composés de défense à base de carbone, y sont produits plus abondamment (Wu et al., 2011). Une méta-analyse soutient également cette hypothèse (Massad et Dyer, 2010).

## O<sub>3</sub>

Alors que l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> tend à diminuer la quantité d'azote dans la plante, l'ozone (O<sub>3</sub>) a exactement l'effet opposé. Malgré tout, quelques études ont observé une augmentation de l'abondance des insectes herbivores ou un temps de développement plus court de ceux-ci sous des conditions d'O<sub>3</sub> élevées (Hummel et al., 1998).

## Température

Le synchronisme entre les plantes et le ravageur résulte d'un ajustement évolutif maintenu depuis de nombreuses années. De façon générale, les œufs de pucerons émergeant durant le débourrement des feuilles de l'hôte ont un meilleur **fitness** que ceux qui éclosent plus tôt ou plus tard en saison (Dixon, 2003). Selon Dixon (2003), le fait que les insectes soient bien synchronisés avec leur hôte indique que l'adaptation est possible.

Le taux de développement d'un insecte est fortement lié à celui de la plante. À basse température, la plante hôte croît trop lentement pour supporter le développement de l'insecte, alors qu'à températures élevées, la plante se développe trop rapidement (Figure 4) (Bale et al., 2002). Aurambout et al. (2009) ont démontré la pertinence de s'attarder à ces deux niveaux trophiques en évaluant le risque

d'introduction du ravageur *Diaphorina citri* dans les vergers d'agrumes en Australie. Les augmentations de température prévues prédisent une augmentation du nombre de générations du ravageur provoquant ainsi un impact négatif sur les vergers d'agrumes. Néanmoins, la température raccourcira la période durant laquelle la plante hôte sera sensible au ravageur et donc l'impact final devrait être moindre que si l'on considérait uniquement la biologie de l'insecte.

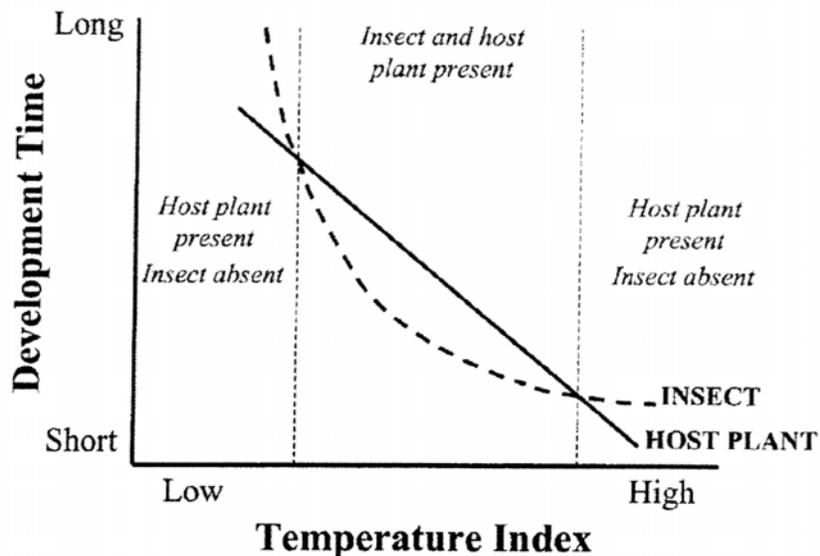


Figure 4. Modèle démontrant le taux de développement relatif d'un insecte par rapport à sa plante hôte à différentes températures (Tiré de Bale (2002)).

# Adaptation

L'adaptation aux modifications du climat peut se faire à différentes échelles selon l'insecte herbivore et sa plante hôte. De façon générale, l'expansion de l'aire de distribution des espèces d'arbres se fait de l'ordre de 20 à 40 km sur 100 ans (Davis et Shaw, 2001), alors qu'au niveau des insectes, des migrations vers les pôles pouvant aller jusqu'à 240 km sur une période de 30 ans ont été répertoriées (Parmesan et al., 1999). Ainsi, les insectes pourraient migrer au nord, mais se retrouver face à des hôtes non-optimaux, réduisant ainsi leur **fitness**. Par exemple, une espèce de papillon *Erynnis propertius*, s'est adaptée localement aux différentes espèces de chêne (Pelini et al., 2010). Les changements climatiques pourraient promouvoir l'expansion des populations de ce papillon du sud vers le nord, où une espèce différente de chêne croît. Or, la mortalité du papillon est accrue lorsqu'elle consomme l'hôte du nord, limitant ainsi sa progression vers ces régions.

# Mesures de gestion

Les changements climatiques risquent d'avoir un impact sur l'efficacité de certaines plantes modifiées génétiquement (voir Tableau 2). L'augmentation du CO<sub>2</sub> diminuerait la production des protéines Bt chez les plants de maïs Bt. Cet effet pourrait être amoindri par l'ajout d'un fertilisant azoté, qui pourrait néanmoins avoir des effets néfastes sur l'environnement. Plusieurs autres considérations ont été notées : i) l'augmentation du CO<sub>2</sub> augmenterait l'efficacité des insecticides puisque les insectes consommeraient plus de feuillage, permettant ainsi une plus grande ingestion de composés chimiques; ii) au niveau des insecticides systémiques, une diminution de leur efficacité serait envisagée puisque l'augmentation de CO<sub>2</sub> diminue l'entrée du pesticide

dans la plante (par la fermeture des stomates); iii) les seuils d'intervention devront être diminués puisque le développement des insectes sera accéléré et iv) le dépistage des ravageurs au champ devra être renforcé et réalisé plus tôt en saison.

# Modélisation de l'impact des insectes ravageurs dans le futur

Les études d'impact se font principalement à des échelles de temps relativement courtes (entre 20 et 50 ans). On peut observer des changements au niveau du taux de renouvellement des populations et des mouvements locaux après 1 à 10 générations alors qu'il faudrait entre 10 à 100 générations pour observer des modifications de populations dues à la **compétition intra- ou interspécifique** (Lawton, 1995). La majorité des modélisations climatiques projettent un accroissement de l'aire de répartition des insectes ravageurs, une augmentation du nombre de générations par année ainsi qu'une densité des populations des insectes ravageurs plus élevée (Aurambout et al., 2009; Bergant et al., 2006; Bergant et al., 2005; Estay et al., 2009; Hallett et al., 2009; Jeffrey et Jeffrey, 1996; Newman, 2006; Olfert et Weiss, 2006a; Olfert et Weiss, 2006b; Porter et al., 1991; Trnka et al., 2007) (Annexe 1).

# Orientations de recherche

En considérant les changements climatiques, les études font souvent référence à la température et au CO<sub>2</sub>, mais bien d'autres facteurs peuvent intervenir tel que le vent, les extrêmes climatiques, l'ozone et les autres polluants (Lawton, 1995). Ces facteurs devraient également être pris en considérant, en plus de leurs interactions, afin de connaître leur impact sur le cycle de vie complet de l'insecte. Outre ces observations, Mondor et collaborateurs (2010) ont récemment fait ressortir la variabilité de la réponse au CO<sub>2</sub> selon les différents génotypes de pucerons, mettant ainsi en doute la généralisation des résultats au sein d'une même espèce. Certes, l'accumulation de telles connaissances diminuerait notre niveau d'incertitude, mais la complexité du modèle ainsi engendrée serait telle que les données ne seraient que difficilement utilisables. Il importe donc de cibler pour chaque système, les facteurs les plus déterminants, afin de trouver l'effet net des changements climatiques (Lawton, 1995).

## À retenir...

- Les insectes, des organismes poïkilothermes, sont extrêmement influencés par les variations de température.
- Les augmentations de température peuvent mener à une augmentation de la densité des populations, un accroissement du nombre de générations par année, une extension de l'aire de répartition de l'espèce ainsi qu'à un meilleur taux de survie hivernale.

- L'incertitude plane toujours sur la capacité des insectes à s'adapter aux nouvelles conditions climatiques puisque la qualité de la plante, ainsi que la possibilité de migration de l'insecte sont des facteurs à considérer conjointement.
- L'augmentation de la concentration atmosphérique du CO<sub>2</sub> modifiera la physiologie de la plante en élevant, par exemple, le ratio C : N de ses tissus.
- De par leurs besoins en azote, les insectes consommeront plus de feuillage en conditions élevées de CO<sub>2</sub> afin de compenser la diminution de concentration en azote des tissus de la plante.
- La production de composés de défenses à base d'azote des plantes peut se retrouver altérée avec l'augmentation du CO<sub>2</sub>.
- Les insectes herbivores et leur plante hôte ont leurs cycles vitaux fortement synchronisés et une simple modification de température pourrait altérer cette relation en augmentant ou en diminuant les dommages causés à la plante.
- Les cultivars transgéniques produisant des protéines toxiques pour certains insectes pourraient s'avérer moins efficaces dans des conditions de températures et de CO<sub>2</sub> élevés.
- Les changements climatiques ont déjà laissé leur trace dans le monde entomologique où un accroissement de l'aire de répartition, une arrivée plus hâtive et une augmentation du **voltinisme** ont déjà été observés dans plusieurs régions du monde.
- La plupart des modélisations climatiques projettent un accroissement de l'aire de répartition des insectes ravageurs, une augmentation du nombre de générations par année ainsi qu'une densité de populations d'insectes ravageurs plus élevée.

# Les agents pathogènes



# Importance des agents pathogènes dans le secteur agricole au Québec

Les champignons, bactéries, virus et nématodes peuvent causer des infections chez les plantes. Puisqu'ils ont le potentiel d'attaquer les cultures agricoles et de se développer en proportion épidémique et de réduire les rendements, les producteurs agricoles ont dû s'armer de stratégies de lutte diversifiées. L'approche préventive la plus efficace et largement répandue demeure l'utilisation de cultivars résistants à la maladie, limitant ainsi au minimum les dommages causés à la plante. L'approche préventive vise également à minimiser les risques d'infections en cultivant des plantes saines sous des conditions de croissance optimales, tout en diminuant au maximum les sources potentielles d'inoculum. Ainsi, les pratiques culturales telles que l'implantation d'une rotation des cultures, le travail au sol, le choix de cultivars recommandés et adaptés, l'utilisation de semences certifiées ou traitées, sont tous des moyens qui réduisent les risques d'établissement d'une maladie. La récolte et la destruction des résidus de culture, le contrôle des populations d'insectes vecteurs de maladie ainsi que l'utilisation de fongicides, font aussi partie des stratégies de prévention. Par ailleurs, lorsqu'une

infection survient, un producteur utilisera une approche curative en éliminant les plants ou organes infectés, ou en utilisant les pesticides appropriés. Selon le bilan des ventes de pesticides au Québec de l'année 2007, les fongicides occupaient le 2<sup>e</sup> rang en terme de volume (16,9 %) dans le secteur des productions végétales agricoles.

Bien que les agents pathogènes englobent plusieurs types d'organismes, cette section se concentrera principalement sur les infections fongiques. La rareté des études traitant des changements climatiques pour les espèces de bactéries, virus et nématodes ainsi que la dominance des agents fongiques au Québec justifient ce choix.

# Impacts des changements climatiques sur les agents pathogènes

Les principaux impacts que les changements climatiques pourraient avoir sur les agents pathogènes sont des modifications au niveau de la croissance, le taux de reproduction et la survie de l'espèce, la sensibilité de la plante hôte, la distribution géographique de l'hôte ou de l'agent pathogène et l'efficacité des méthodes de lutte contre les agents pathogènes (Chakraborty et al., 2000; Harvell et al., 2002; Rillig, 2007). Les principaux facteurs bioclimatiques influençant le développement des maladies sont la température et l'humidité alors que le CO<sub>2</sub> et l'O<sub>3</sub> ont un effet indirect sur les agents pathogènes via la physiologie de la plante (Boland et al., 2004).

# Température

L'adoucissement des hivers assurera, de façon générale, une meilleure conservation des agents pathogènes, augmentant ainsi la quantité d'inoculum au sol le printemps suivant (Fuhrer, 2003). Toutefois, les maladies hivernales des céréales sont favorisées par le couvert nival et la diminution de ce dernier dans le sud du Québec pourrait être néfaste à la survie de ces maladies. Par ailleurs, les temps chauds accompagnés de sécheresses risquent de réduire l'intensité de certains agents pathogènes. Par ailleurs, nous pourrions penser que certaines maladies, telles que les mildious, qui se développent à des températures plutôt fraîches (entre 10° et 24°C selon les espèces) pourraient être défavorisées par le réchauffement climatique. Toutefois, une étude menée par Salinari et collaborateurs (2006) prévoit une augmentation de l'intensité des infections causées par le mildiou de la vigne avec les changements climatiques projetés, c'est-à-dire une augmentation des températures et une diminution des précipitations.

Plusieurs plantes cultivées à la limite de leurs températures de développement peuvent se retrouver exemptes de maladies puisque ces dernières ne parviennent pas à croître, pour l'instant, sous ces conditions plus fraîches. L'augmentation des températures permettrait une expansion de l'aire de répartition des agents pathogènes causant ces maladies ainsi qu'une augmentation des risques phytosanitaires sur ces cultures (Coakley et al., 1999). Par ailleurs, l'extension de la durée de la saison de croissance permettrait une plus grande production d'inoculum pour certaines espèces et augmenterait la fréquence et l'intensité des infections. Toutefois, certaines espèces d'agents pathogènes sont aussi sensibles à la photopériode, qui elle ne sera pas modifiée par les changements climatiques (Coakley et al., 1999).

# Précipitations

L'humidité, qu'elle soit sous forme de précipitations, de rosée ou d'humidité relative, représente un facteur essentiel au développement de la plupart des infections fongiques. L'augmentation des précipitations favoriserait la dispersion des spores de certaines espèces, entraînant une meilleure dissémination des agents pathogènes (Fuhrer, 2003). Néanmoins, les quantités de précipitations accumulées au sud du Québec ne devraient pas varier énormément d'ici 2050 pendant la période estivale (Ouranos, 2010). Puisque des hausses de températures, variant entre 2 et 3°C, sont prévues pour 2050, des stress hydriques pourraient même survenir en lien avec l'augmentation de la transpiration chez les plantes. De façon générale, les stress hydriques diminuent l'impact ou les symptômes des maladies durant la saison chaude, mais peuvent également réduire la résistance des plantes face aux maladies (Gregory, 2009). De plus, certaines espèces bénéficient des climats plus secs et chauds telles que les genres *Podosphaera*, *Sphaerotheca*, *Uncinula* et *Ustilago* (Boland et al., 2004).

## CO<sub>2</sub>

Selon Chakraborty et collaborateurs (2000), les effets du CO<sub>2</sub> sur les agents pathogènes peuvent être soit positifs soit négatifs pour les cultures, mais en moyenne, l'incidence de la maladie tend à augmenter avec l'augmentation du CO<sub>2</sub>. Le Tableau 5 dresse un portrait des principaux effets indirects de l'augmentation du CO<sub>2</sub> sur l'interaction plante-agent pathogène. Dans les éléments les plus souvent cités, notons l'accroissement de la biomasse et de la densité de la canopée des plantes, augmentant ainsi l'humidité relative provoquant une hausse du pouvoir de dispersion et du taux de fécondité de l'agent pathogène. Les effets directs du CO<sub>2</sub> sur les agents pathogènes sont moins étudiés, mais pourraient néanmoins avoir un impact non négligeable sur la plante. Par exemple, une étude menée par Melloy et collaborateurs (2010) a démontré

que l'augmentation du CO<sub>2</sub> augmentait la biomasse du champignon *Fusarium pseudograminearum* chez le blé. La réponse de l'agent pathogène au CO<sub>2</sub> est toutefois très spécifique selon l'interaction plante-maladie. Eastburn et collaborateurs (2010) ont observé à forte concentration de CO<sub>2</sub> (550 ppm), une augmentation de la gravité/intensité de la tache brune dans le soya (*Septoria glycines*) alors que l'incidence du mildiou (*Peronospora manshurica*) dans cette même culture serait diminuée.

## O<sub>3</sub>

L'ozone, lorsque retrouvé dans la troposphère (la couche d'ozone se trouve plutôt dans la stratosphère), est considéré comme un polluant. Il est principalement produit par la réaction des hydrocarbures et des oxydes d'azote des gaz d'échappement des véhicules avec l'oxygène de l'air sous l'influence de la lumière solaire (Villeneuve et Richard, 2001). L'ozone n'a peu de chance d'affecter directement les agents pathogènes (Manning et Tiedemann, 1995), mais peut avoir un impact en augmentant ou diminuant la susceptibilité d'une plante face à l'ennemi (Fuhrer, 2003). L'interaction entre l'ozone et l'agent pathogène dépend essentiellement du moment où la plante sera exposée à l'ozone, du stade phénologique de la plante et de d'autres facteurs prédisposant à l'infection (Fuhrer, 2003; Manning et Tiedemann, 1995). Alors que l'ozone est perçue négativement, certains auteurs la considère comme un allié pouvant prémunir la plante d'une attaque contre un agent pathogène en élicitant les réactions de défense de la plante (Sandermann et al., 1998).

# Principales maladies influencées par les changements climatiques en Ontario

Une étude ontarienne menée par Boland et collaborateurs (2004) a répertorié les effets anticipés des changements climatiques sur les infections fongiques, bactériennes et virales pouvant affecter les secteurs agricoles et forestiers de cette province. Les menaces les plus sérieuses dans le secteur agricole, identifiées par leur pouvoir d'établissement, leur taux de croissance et la durée de l'épidémie, sont : le charbon commun du maïs (*Ustilago maydis*), le nématode à kyste du soya (*Heterodera glycines*), la maladie de Stewart (*Erwinia stewartii*) et les virus BYMV (Mosaique jaune du haricot), PLRV (Enroulement de la pomme de terre) et CMV (Mosaique du concombre). L'intensité des agents pathogènes a aussi été associée à certaines conditions climatiques (voir Tableau 4).

Tableau 4. Exemples d'impact du climat sur l'intensité des infections fongiques (adapté de Patterson et al. (1999)).

Impact	Conditions climatiques	Agents pathogènes
Favorise	Hivers doux	Oïdium ( <i>Blumeria graminis</i> ); Rouille naine de l'orge ( <i>Puccinia hordei</i> ); Rouille jaune du blé ( <i>Puccinia striiformis</i> )
	Hivers doux et étés chauds	Cercosporose ( <i>Cercospora beticola</i> ); Oïdium ( <i>Erysiphe betae</i> )
	Étés chauds et humides	Brûlure tardive de la pomme de terre ( <i>Phytophthora infestans</i> )
	Précipitations estivales plus fréquentes	Rhynchosporiose de l'orge ( <i>Rhynchosporium secalis</i> ); Septorioses ( <i>Septoria tritici</i> et <i>S. nodorum</i> )
Défavorise	Étés chauds et secs	La plupart des infections fongiques puisque la plante devient plus résistante (voir Tableau 5)
	Sécheresse printanière	Rhynchosporiose de l'orge ( <i>Rhynchosporium secalis</i> ); Taches foliaires du blé ( <i>Septoria tritici</i> et <i>S. nodorum</i> )

On pourrait penser que les agents pathogènes du sol sont moins influencés par les changements climatiques puisque les variations de température et de CO<sub>2</sub> y sont moins importantes. Toutefois, selon le type d'agents pathogènes (champignon, bactérie ou nématode) et la biologie des microorganismes (survie en hiver au sol ou sur les débris), certains pourraient être influencés.

*Agents fongiques* : Les espèces d'agents fongiques du sol (Exemples: *Botrytis*, *Fusarium*, *Phytophthora*, *Pythium*, *Rhizoctonia*, *Sclerotinia*, *Sclerotium*, *Verticillium*) survivent aux extrêmes de températures grâce à des structures telles que des **sclérotés** ou **microsclérotés**, des spores à parois épaisses (par exemple : chlamydospores ou oospores) (Boland et al., 2004), voir des **hyphes**. La diminution du couvert nival prévue dans le sud du Québec (pouvant diminuer les températures au sol) n'affecterait donc pas de façon significative ces genres d'agent pathogènes.

*Bactéries* : Les hivers plus cléments ne devraient pas avoir d'effet considérable sur les bactéries pathogènes du sol (exemples : *Rhizobium radiobacter*, syn. *Agrobacterium tumefaciens* – tumeur du collet), alors que celles survivant sur l'hôte ou les débris (exemple : *Erwinia amylovora*) ou transmises par des organismes vecteurs (exemple : *Erwinia stewartii*, transmise par une espèce de coléoptère) risquent d'être avantagées (Boland et al., 2004).

*Nématodes* : La hausse des températures pourrait accroître la vitesse de développement des nématodes et ainsi entraîner des générations supplémentaires. La conservation hivernale des nématodes ne devrait pas être affectée par les changements climatiques, bien que pour certaines espèces, telles que le nématode à kyste du soya, les redoux hivernaux pourraient diminuer la viabilité des œufs (Boland et al., 2004). La diminution de la surface racinaire d'une plante infectée par les nématodes provoquerait une aggravation des symptômes de stress hydriques en conditions de sécheresse (Boland et al., 2004).

# Interactions plante-agent pathogène

Les changements climatiques auront un effet sur la physiologie des plantes, pouvant par ricochet modifier le pouvoir de résistance passive de ces dernières face aux maladies. De plus, les stress climatiques provoqués par des événements extrêmes et la présence de polluants, tels que l’ozone, diminuent le pouvoir de résistance d’une plante. Le Tableau 5 dresse un portrait des principaux impacts des changements climatiques à l’échelle de la relation plante-agent pathogène.

## Mesures de gestion

Les modifications physiologiques ou physiques de la plante, en lien avec les changements climatiques pourraient diminuer ou augmenter sa sensibilité aux agents pathogènes (Boland et al., 2004; Chakraborty et Datta, 2003; Coakley et al., 1999; Fuhrer, 2003; Lake et Wade, 2009; Rillig, 2007; Ziska et Runion, 2007) (Tableau 5). Certains cultivars peuvent s’avérer plus sensibles que d’autres aux agents pathogènes et une bonne sélection permettrait de diminuer la sensibilité de la plante.

La flexibilité des systèmes agricoles peut aider à minimiser les impacts négatifs des changements climatiques en utilisant des cultivars mieux adaptés aux stress biotiques ainsi qu’en adoptant des pratiques culturales adaptées. Malgré les améliorations significatives de la technologie pour le développement de nouveaux cultivars et de nouvelles techniques culturales, des pertes de rendement importantes liées aux maladies continuent de survenir à l’heure actuelle (Chakraborty et al., 2000). Il ne faut

donc pas croire que l'adaptation aux changements climatiques du secteur agricole, en utilisant les avenues technologiques comme unique stratégie, pourra tamponner l'effet de ces derniers. Une augmentation de l'incidence des maladies et de la sensibilité de la plante pourrait éventuellement limiter la gamme de cultures/cultivars disponibles dans le futur.

Pour terminer, l'efficacité des intrants chimiques pour lutter contre les agents pathogènes risque d'être modifiée. Pensons aux hausses de températures diminuant l'action de certains pesticides ou lorsque les précipitations sont fréquentes et lessivent les fongicides de contact ou les fongicides systémiques avant leur pénétration dans la plante (Chakraborty et al., 2000; Rosenzweig et al., 2000). Ces conditions (températures extrêmes et fortes pluies) pourraient être devenir beaucoup plus fréquentes dans le climat futur et engendrer des coûts supplémentaires pour les producteurs (Chen et McCarl, 2001).

# Modélisation de l'impact des agents pathogènes dans le futur

Tout comme pour les mauvaises herbes, peu d'études se sont penchées sur la modélisation des impacts des changements climatiques sur les agents pathogènes (voir annexe 2). Une des particularités des agents pathogènes réside dans leur grand besoin d'humidité tout au long de leur cycle de vie. Or, la modélisation des précipitations et de l'humidité relative pour le futur arbore une plus grande plage d'incertitude que la modélisation de la température. Cette incertitude se traduit par une gamme de réponses biologiques potentielles beaucoup plus variables puisque les conditions climatiques probables peuvent varier d'un extrême à l'autre. D'autre part, les agents pathogènes ont une biologie très différenciée d'une espèce à l'autre quant à leurs réponses aux paramètres bioclimatiques. Il est donc extrêmement difficile d'énoncer des généralités au niveau de l'impact des changements climatiques sur les espèces phytopathogènes.

Tableau 5. Liste non-exhaustive de l'impact de l'augmentation du CO<sub>2</sub> et de la température sur l'interaction entre la plante hôte et un agent pathogène

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

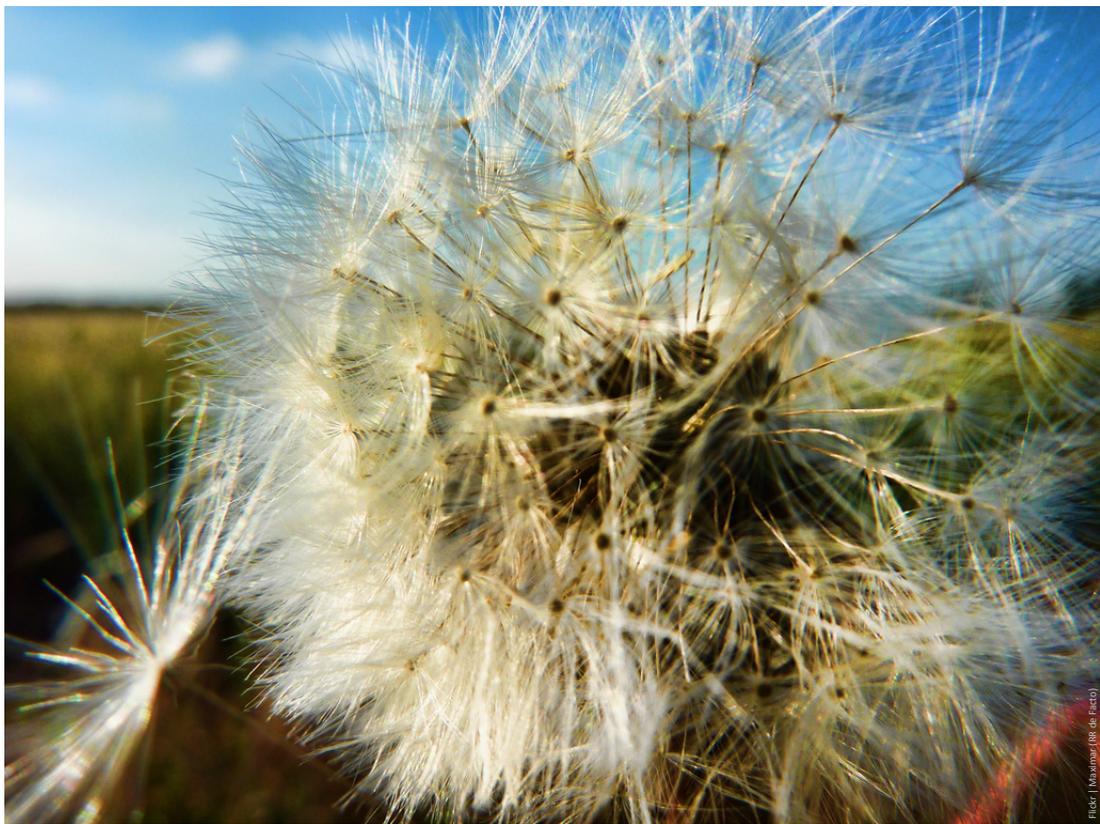
# Orientations de recherche

La réponse non-linéaire des systèmes biologiques aux paramètres environnementaux et la capacité imprévisible des organismes à s'adapter génétiquement aux nouvelles conditions environnementales constituent les deux principales limites pour l'étude de l'impact des changements climatiques sur les organismes vivants (Scherf, 2004). Quel sera le pouvoir d'adaptation des agents pathogènes sous l'influence des changements climatiques? Par ailleurs, les modifications dans la dynamique des populations peuvent être provoquées par diverses causes autres que le climat, tel que l'impact anthropique (Luck et al., 2011; Rohr et al., 2010). Ces autres facteurs ne sont généralement pas considérés dans les projections à long terme et il serait pratiquement impossible de les estimer. Quant aux facteurs climatiques tels la température, les précipitations, le CO<sub>2</sub> et l'O<sub>3</sub>, ils ont tous un impact sur les agents pathogènes, et ces derniers devraient également être considérés en interaction (Luck et al., 2011). Par ailleurs, plusieurs autres facteurs devraient être considérés dans les études portant sur les agents pathogènes et les changements climatiques (Garrett et al., 2006; Garrett et al., 2011; Pautasso et al., 2010): i) l'effet du pathogène sur la survie, la physiologie, le comportement et la reproduction de l'hôte; ii) les stades de croissance où l'hôte est vulnérable au pathogène; iii) la proportion d'individus/biomasse infectés à un site; iv) l'extension spatiale et la distribution de l'infection; v) les seuils environnementaux pour la réponse de la population; vi) la fréquence et la durée de l'impact du pathogène et vii) l'effet des interactions indirectes. Une meilleure connaissance des interactions plantes-agents pathogènes s'avère nécessaire pour mettre en place des mesures d'adaptation aux changements climatiques afin d'assurer une sécurité alimentaire (Chakraborty et Newton, 2011).

# À retenir...

- L'humidité et la température représentent les deux facteurs bioclimatiques d'importance pour prédire la réponse biologique d'un agent pathogène.
- Le CO<sub>2</sub> peut modifier la physiologie ou la morphologie de la plante hôte et ainsi altérer positivement ou négativement l'interaction plante-agent pathogène.
- D'autres paramètres, tel que l'ozone, peuvent avoir un impact sur la relation plante-agent pathogène.
- Les modélisations climatiques projettent des impacts variables sur les agents pathogènes, rendant la généralisation des réponses aux changements climatiques pratiquement impossible.

# Les mauvaises herbes



# Importance des mauvaises herbes dans le secteur agricole au Québec

La lutte aux mauvaises herbes est un aspect important de la protection des cultures. Diverses stratégies de lutte autant préventives que curatives sont employées par les producteurs agricoles afin qu'elles ne mettent pas en péril leurs rendements. Les mesures préventives, telles que la rotation des cultures ou un drainage adéquat, favorisent une culture saine qui croît rapidement, augmentant ainsi sa concurrence avec les mauvaises herbes. Les mesures répressives visent le contrôle ou la diminution des populations de mauvaises herbes : le faux semis, le sarclage ou l'application d'herbicide sont des méthodes de lutte fréquemment utilisées. D'un autre côté, la concurrence potentielle d'une culture avec les mauvaises herbes est variable. Par exemple la capacité du soya et du maïs à concurrencer les mauvaises herbes est plus faible que celle du canola et des céréales (Figure 5).

Ainsi, pour éviter des pertes de rendement, une répression adéquate par des méthodes de lutte efficaces s'impose dans les cultures durant leur période critique. Selon le bilan des ventes de pesticides au Québec pour l'année 2007, les herbicides représentent 59,6 % (en terme de volume) de tous les produits vendus dans le secteur de la production agricole.

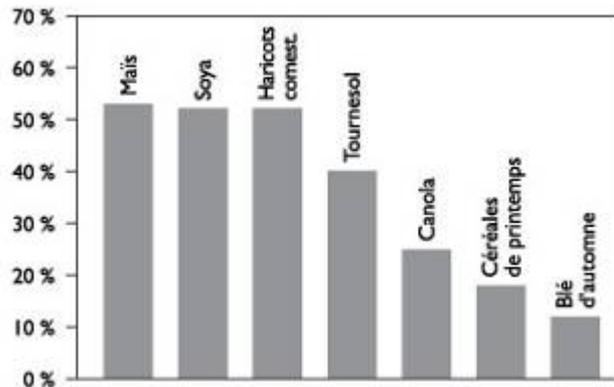


Figure 5. Pertes de rendement types des grandes cultures attribuables à la concurrence avec les mauvaises herbes (source : OMAFRA, 2009)

# Impacts des changements climatiques sur les mauvaises herbes

Les changements climatiques peuvent engendrer différents impacts sur les mauvaises herbes. Les hausses de concentration de CO<sub>2</sub> risquent de modifier la physiologie des plantes et ainsi altérer la **compétition interspécifique** entre la culture et les mauvaises herbes. La température et les précipitations représentent deux paramètres bioclimatiques d'importance quant à la distribution de l'espèce sur un territoire.

# CO<sub>2</sub>

De façon générale, l'augmentation du CO<sub>2</sub> engendrera une augmentation du taux photosynthétique, du taux de croissance, de la biomasse, du ratio C : N et des composés de défense à base de carbone chez la plante (Hunter, 2001; Patterson, 1999). Toutefois, l'augmentation du CO<sub>2</sub> affectera de façon différente les plantes selon leur processus photosynthétique, *i.e.* si elles sont de type C3 ou C4 (voir encadré 1).

Encadré 1. Description de différents mécanismes de fixation du carbone chez les plantes au cours de la photosynthèse

<b>C3</b> (la plupart des plantes)	Le CO <sub>2</sub> atmosphérique diffuse dans la plante par les stomates et est fixé par la RubisCO. En condition de photorespiration, la RubisCO fixe l'O <sub>2</sub> .
<b>C4</b> (ex : maïs)	Évite la photorespiration en augmentant la pression partielle en CO <sub>2</sub> autour de la RubisCO. Le CO <sub>2</sub> est capté par la PEP-carboxylase (dans le mésophylle) qui le concentre, permettant ainsi un meilleur rendement. Pour limiter les pertes en eau, les plantes C4 ferment leurs stomates plus longtemps que les C3.
<b>CAM</b> (ex : Crassulacées)	La fixation du carbone n'est pas séparée dans l'espace comme les C4 (mésophylle/gaine périvasculaire) mais dans le temps (nuit/jour). L'ouverture de stomates s'effectue la nuit, où un stock de malate est produit, puis stocké. Au cours de la journée, ce stock de malate est retransformé en CO <sub>2</sub> permettant la photosynthèse. Ceci limite les pertes d'eau dû à la transpiration.

Source : (Taiz et Zeiger, 2002)

Les plantes de type C4 sont capables de photosynthétiser à des teneurs atmosphériques de CO<sub>2</sub> bien inférieures à celles qui sont nécessaires pour les plantes de type C3, mais aussi, elles répondent plus mal que ces dernières à une augmentation des teneurs en CO<sub>2</sub>. Ceci implique que globalement, dans un scénario d'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique, les plantes de type C3 seront avantagées par rapport au type C4.

Les plantes C3 seraient avantagées par l'augmentation de dioxyde de carbone puisqu'elles en sont beaucoup plus limitées que celles ayant un mécanisme C4. L'augmentation du CO<sub>2</sub> a également un effet fertilisant sur la plante, c'est-à-dire qu'il y aura accélération de sa croissance et de son taux photosynthétique (Fuhrer, 2003). Cette augmentation du CO<sub>2</sub> permet aussi une meilleure efficacité de la plante à utiliser les ressources en eau et une plus grande tolérance à la sécheresse (moins grand besoin d'ouverture des stomates puisque le CO<sub>2</sub> est abondant). En considérant uniquement l'effet de l'augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub>, des hausses de rendement de l'ordre de 10 à 30% pour les plantes C3 et de 0 à 10% pour les plantes C4, seraient prévues (Figure 6) (Ainsworth et Long, 2005; Seguin, 2007).

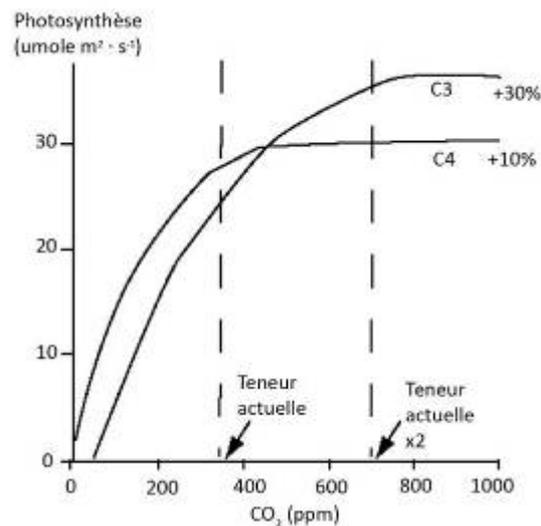


Figure 6. Impact de l'augmentation du CO<sub>2</sub> sur le taux photosynthétique des plantes C3 et C4 (Tiré de Seguin, 2007).

Au niveau des mauvaises herbes, des 18 espèces les plus problématiques mondialement, 14 sont de type C4 (Fuhrer, 2003). Néanmoins, en Amérique du Nord, 9 des 15 espèces de mauvaises herbes les plus problématiques sont de type C3, alors que

les cultures sont majoritairement de type C4 (maïs, millet, sorgho et canne à sucre) (Fuhrer, 2003). Ces cultures seraient donc plus vulnérables aux mauvaises herbes avec des hausses de concentration atmosphérique de CO<sub>2</sub>.

En plus d'agir sur le taux de croissance de la plante, l'augmentation du CO<sub>2</sub> peut engendrer une hausse des efforts de reproduction chez cette dernière. Ceci peut se traduire par une augmentation de la production de pollen, tel que démontré chez la petite herbe à poux (

Figure 7) (Ziska et Caulfield, 2000) et permet ainsi d'améliorer le pouvoir d'établissement de la plante par une production accrue de semences.

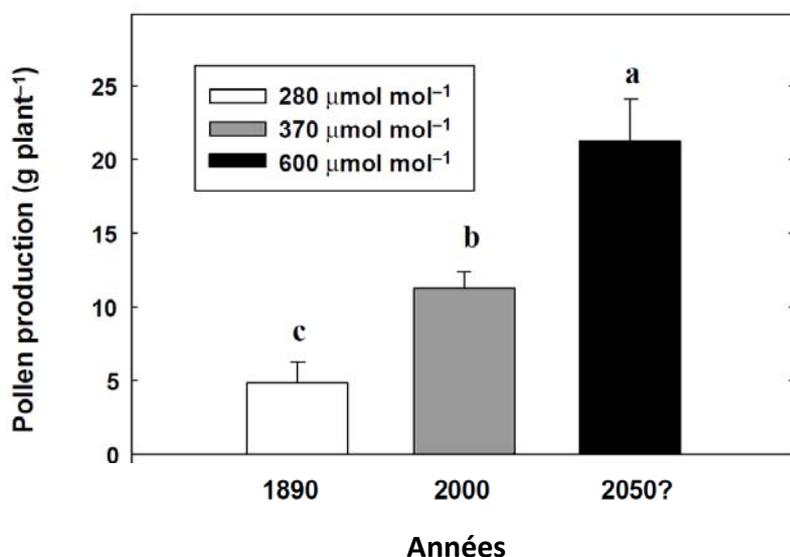


Figure 7. Production de pollen par plante de petite herbe à poux à des concentrations de CO<sub>2</sub> ( $\mu\text{mol/mol}$ ) équivalentes en 1890, 2000 et 2050 (Tiré de Ziska et Caulfield, 2000)

# Température et précipitations

Une augmentation de la température va favoriser les plantes de type C4. La température et les précipitations affectent la distribution géographique des mauvaises herbes (Patterson et al., 1999). Les températures plus clémentes permettront une migration des espèces, qui sont présentement à leur limite de distribution, vers les pôles et en altitude. Une simulation des habitats favorables pour le développement des espèces de mauvaises herbes limitées par les hivers froids, tel que le Kudzu (*Pueraria montana*), sous des conditions climatiques aux **horizons** 2020, 2050 et 2080, prévoit un accroissement vers le nord de l'aire de répartition de ces espèces en assurant une meilleure survie hivernale (Wolfe et al., 2008). Par ailleurs, lorsque l'humidité du sol est élevée, la concurrence exercée par les mauvaises herbes engendre moins de répercussions négatives sur les rendements. La Figure 8 démontre un accroissement des pertes de rendement chez le maïs et le soya lorsque les précipitations sont faibles.

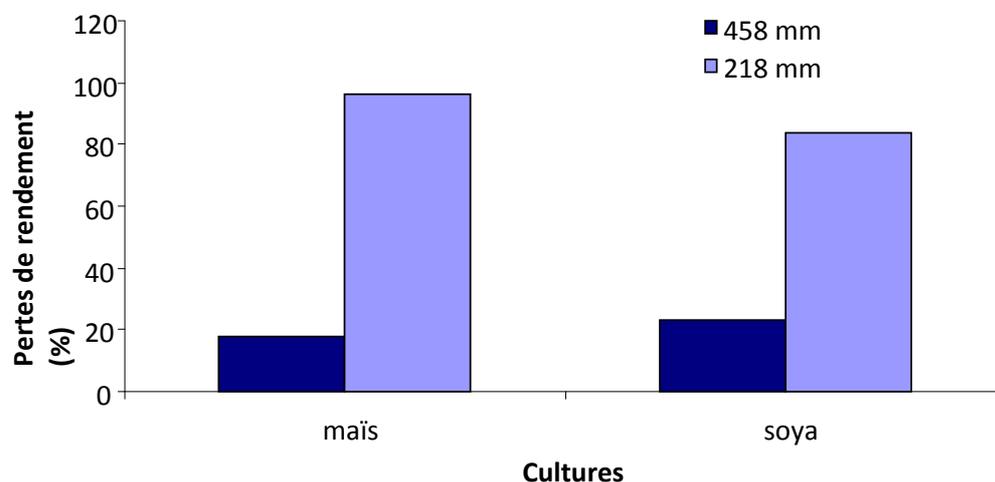


Figure 8. Pertes de rendement du maïs et du soya dues aux mauvaises herbes dans deux conditions d'humidité (cumul de précipitation en mm, de mai à août) (source : OMAFRA, 2009).

# Évolution, adaptation et acclimatation

Depuis des décennies, nous diminuons délibérément la diversité génétique des cultures en sélectionnant des attributs ayant pour résultat des hausses sur le rendement, et tout cela, au détriment du pouvoir d'adaptation de ces cultures (Fernandez-Quintanilla et al., 2008). Par contre, le bagage génétique des mauvaises herbes demeure très diversifié et donc, ces dernières possèdent une **plasticité phénotypique** beaucoup plus grande que celle des cultures (Ziska et Runion, 2007). Cette grande plasticité leur donne un avantage certain sur leur pouvoir d'adaptation face à des modifications climatiques (Wolfe et al., 2008). Les mauvaises herbes possèdent des attributs faisant d'elles des espèces difficilement contrôlables puisque leur succès reproducteur est souvent très efficace. Ces mêmes attributs leur confèrent un avantage compétitif en s'acclimatant plus aisément aux variations climatiques (Hovenden, 2007) et en s'adaptant à des conditions arides et extrêmes dues aux changements climatiques (Edwards et Newton, 2007).

# Interactions culture - mauvaise herbe

L'augmentation du CO<sub>2</sub> peut accroître la compétition entre les mauvaises herbes et la culture, pouvant compromettre le rendement de cette dernière en favorisant la croissance de la mauvaise herbe et en diminuant l'efficacité des herbicides. Par exemple, dans la culture du soya, une diminution des rendements serait engendrée par l'augmentation du CO<sub>2</sub> qui contribue à l'accroissement de la biomasse du chardon des champs (*Cirsium arvense*) et à la diminution de l'efficacité du glyphosate (Ziska, 2010).

Un sommaire décrivant l'impact du CO<sub>2</sub> sur la compétition entre les cultures et les mauvaises herbes de type C3 ou C4 est présenté à la Figure 9. Tel que mentionné plus haut, les mauvaises herbes de types C3 sont grandement favorisées, et ce, qu'elles soient en présence d'une culture C4 ou C3 (Ziska et Runion, 2007).

Crop	Weed	Increasing [CO <sub>2</sub> ] Favors?	Environment	Reference
<b>A. C<sub>3</sub> Crops/C<sub>3</sub> Weeds</b>				
Soybean	<i>Chenopodium album</i>	Weed	Field	Ziska 2000
Lucerne	<i>Taraxacum officinale</i>	Weed	Field	Bunce 1995
Pasture	<i>Taraxacum and Plantago</i>	Weed	Field	Potvin & Vasseur 1997
Pasture	<i>Plantago lanceolata</i>	Weed	Chamber	Woodward 1988
Sugarbeet	<i>Chenopodium album</i>	Crop*	Chamber	Houghton & Thomas 1996
<b>B. C<sub>4</sub> Crops/C<sub>4</sub> Weeds</b>				
Sorghum	<i>Amaranthus retroflexus</i>	Weed	Field	Ziska 2003b
<b>C. C<sub>3</sub> Crops/C<sub>4</sub> Weeds</b>				
Fescue	<i>Sorghum halapense</i>	Crop	Glasshouse	Carter & Peterson 1983
Soybean	<i>Sorghum halapense</i>	Crop	Chamber	Patterson et al. 1984
Rice	<i>Echinochloa glabrescens</i>	Crop	Glasshouse	Alberto et al. 1996
Pasture	<i>Paspalum dilatatum</i>	Crop	Chamber	Newton et al. 1996
Lucerne	Various grasses	Crop	Field	Bunce 1995
Soybean	<i>A. retroflexus</i>	Crop	Field	Ziska 2000
<b>D. C<sub>4</sub> Crops/C<sub>3</sub> Weeds</b>				
Sorghum	<i>Xanthium strumarium</i>	Weed	Glasshouse	Ziska 2001b
Sorghum	<i>Albutilon theophrasti</i>	Weed	Field	Ziska 2003b

*Notes:* *Favored* indicates whether elevated [CO<sub>2</sub>] produced significantly more crop or weed biomass. *Pasture* refers to a mix of C<sub>3</sub> grass species. The asterisk (\*) refers to earlier emergence of the crop relative to weeds at elevated [CO<sub>2</sub>].

Figure 9. Impact de l'augmentation du CO<sub>2</sub> sur la compétition entre les plantes de types C<sub>3</sub> et C<sub>4</sub> (Tiré de Ziska et Runion 2007).

# Mesures de gestion

## CO<sub>2</sub>

L'augmentation du CO<sub>2</sub> peut avoir un effet négatif sur l'efficacité des herbicides. Une étude réalisée par Ziska et collaborateurs (1999) a démontré une tolérance au glyphosate supérieure chez le chénopode blanc (*Chenopodium album*), une plante de type C3, dans des conditions atmosphériques à forte concentration de CO<sub>2</sub>. Aucune différence n'a toutefois été observée chez l'amarante à racine rouge (*Amaranthus retroflexus*), une plante de type C4. Des résultats similaires ont été observés avec l'usage du fluazifopbutyl + fenoxyprop pour lutter contre la folle avoine (*Avena fatua*) de type C3, et la sétaire verte (*Setaria viridis*) de type C4 (Archambault, 2007). De façon générale, les plantes de type C3 seraient donc moins sensibles aux herbicides que les plantes de type C4, en conditions de CO<sub>2</sub> élevées.

Quatre autres impacts négatifs sur les mesures de gestion des mauvaises herbes, dus à l'augmentation du CO<sub>2</sub>, ont été rapportés par Patterson et collaborateurs (1999): i) effet anti-transpirant de la plante (en saturant les stomates) en présence d'une concentration élevée en CO<sub>2</sub> et diminuant ainsi les capacités d'absorption de l'herbicide par la plante; ii) une plus grande concentration de CO<sub>2</sub> modifie également l'anatomie et les caractéristiques de la feuille, en épaississant sa cuticule par exemple, et diminue ainsi le pouvoir d'entrée de l'herbicide; iii) une plus grande concentration en amidon est retrouvée chez les plantes de type C3 cultivées en conditions élevées de CO<sub>2</sub>, pouvant interférer avec l'activité de l'herbicide et iv) une plus grande croissance des rhizomes et des tubercules (chez les plantes C3) rendra le contrôle des plantes pérennes plus difficile.

# Température

Une hausse des températures entraînera une augmentation de l'activité métabolique et donc une fois l'herbicide entré dans la plante, sa translocation ainsi que son efficacité en seront augmentées (Archambault, 2007).

## Modélisation de l'impact des mauvaises herbes dans le futur

Les études portant sur l'impact des changements climatiques sur les mauvaises herbes en milieu agricole sont peu nombreuses. Les espèces de plantes invasives menaçant les milieux naturels font couler beaucoup plus d'encre dans les revues scientifiques que ces espèces, pourtant fortement problématiques dans certaines cultures. Néanmoins, plusieurs des espèces invasives, tel que le kudzu, sont aussi problématiques pour l'agriculture. Par ailleurs, le kudzu pourrait permettre l'établissement de la rouille du soya en servant d'hôte secondaire à l'agent pathogène. Les changements climatiques risquent fort bien de procurer un habitat favorable dans les régions du nord-est des États-Unis à cette vigne, surnommée par nos voisins du sud « the mile-a-minute vine » (Figure 10).

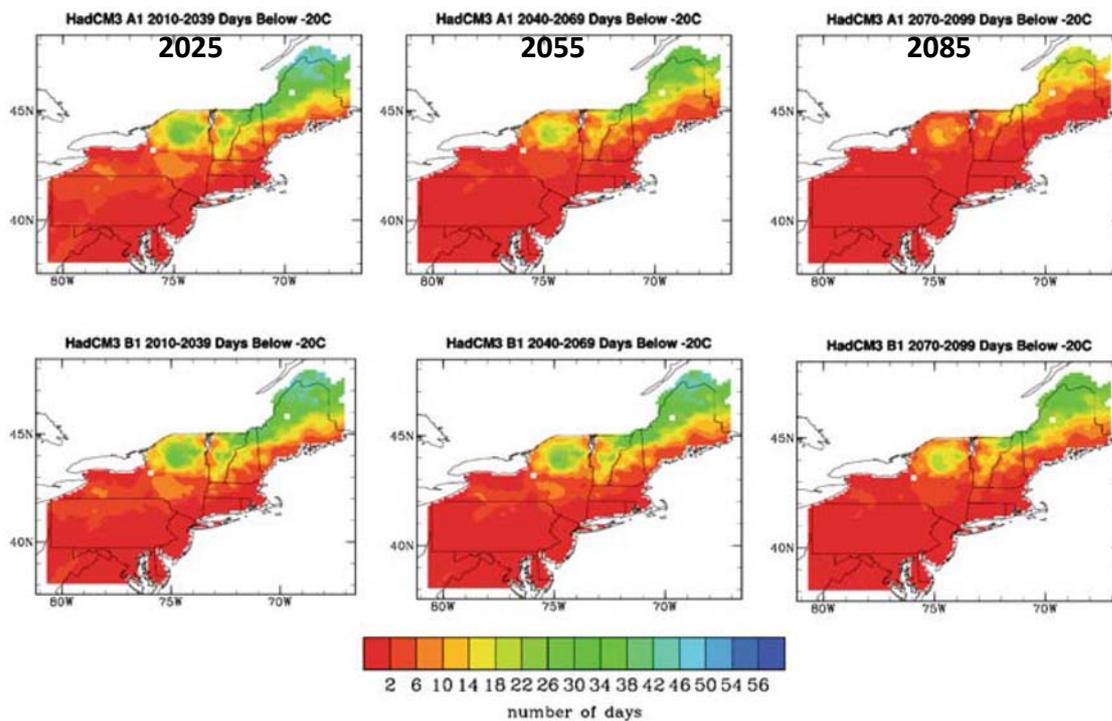


Figure 10. Projection du nombre de jours par année ayant une température minimale en dessous de  $-20^{\circ}\text{C}$ . Les zones orangées représentent les habitats potentiels pour l'expansion du Kudzu (Tiré de Wolfe et al. 2008)

Certaines espèces seront également avantagées par les changements climatiques en renforçant leur production de graines (Edwards et Newton, 2007), en augmentant leur survie hivernale (Wolfe et al., 2008), en modifiant les périodes propices à la germination et l'émergence (Thompson et Naeem, 1996) ou en augmentant leur pouvoir compétitif (Ziska et Runion, 2007). Les simulations climatiques utilisées démontrent toutes une augmentation de l'aire de répartition des espèces vers le nord (Figure 10), ou une redistribution de ces espèces en diminuant les populations du sud (voir annexe 3) (Bradley, 2009; Bradley et al., 2010; Jarnevich et Stohlgren, 2009; Jeffree et Jeffree, 1996).

# Orientations de recherche

À la différence des insectes et des agents pathogènes, les risques associés aux mauvaises herbes reposent davantage sur l'augmentation des échanges commerciaux provoquant l'introduction de nouvelles espèces que sur les changements climatiques à proprement parler. Bien que l'augmentation de la température ou le changement des autres facteurs climatiques pourraient permettre un meilleur succès d'établissement de ces espèces, leur aire de distribution est principalement limitée par une bonne gestion des cultures (ex : l'usage de semences exemptes de mauvaises herbes) que par une limitation thermique. La problématique est donc multifactorielle et nécessiterait une étude approfondie des divers facteurs promouvant la dispersion et l'établissement des espèces de mauvaises herbes.

L'étude des mauvaises herbes représente une des solutions d'adaptation des cultures aux changements climatiques. En observant les mécanismes d'acclimatation et d'adaptation des mauvaises herbes, il serait possible d'élaborer des approches de production agricoles différentes pour modifier ou créer des environnements qui ne permettent pas l'établissement ou la reproduction des mauvaises herbes. Il serait aussi possible d'utiliser le bagage génétique des mauvaises herbes pour créer des cultivars portant ce gène d'intérêt. Il pourrait être intéressant d'insérer un gène codant pour une résistance à la sécheresse afin de limiter les pertes de rendements des cultures dues aux événements extrêmes. Par ailleurs, plusieurs mauvaises herbes offrent des solutions d'atténuation des changements climatiques en procurant une biomasse intéressante pour limiter l'utilisation des énergies fossiles.

# À retenir...

- Les changements climatiques ont un effet fertilisant sur les plantes (cultures et mauvaises herbes), et ce, principalement par l'augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'air.
- Cet effet positif est plus marqué chez les plantes de type C3 que les plantes de type C4.
- En Amérique du Nord, la plupart des cultures sont de type C4 (ex : maïs) alors que les mauvaises herbes sont principalement des C3, conférant ainsi un avantage aux plantes indésirables dans le contexte des changements climatiques.
- Les mauvaises herbes possèdent des cycles de vie très variables et une grande diversité génétique. Ceci leur permet de mieux s'acclimater aux environnements changeants et de mieux s'adapter aux variations climatiques que les cultures qui sont plutôt homogènes dans leur diversité génétique.
- L'aire de distribution des mauvaises herbes est limitée par le climat, mais est aussi d'origine anthropique par les transports accidentels ou volontaires des plantes indésirables pour l'agriculture et l'environnement.
- Toutes les simulations climatiques projettent une augmentation de l'aire de distribution des espèces de mauvaises, stipulant ainsi une élévation des risques phytosanitaires pour ces espèces. Néanmoins, l'impact risque d'être beaucoup plus grand si l'on considère également la globalisation des marchés, en favorisant la dispersion des **propagules**.

# Remerciements

Nous tenons à remercier Benjamin Mimee (AAC) et Daniel Dostaler (Université Laval) pour la révision scientifique de la section des agents pathogènes ainsi que Diane Lise Benoît (AAC) et Maryse L. Leblanc (IRDA) pour la section des mauvaises herbes. Merci également à Jean-Philippe Légaré (MAPAQ) pour la révision linguistique et Anne Blondlot (Ouranos) pour la révision finale.

# Références

- Ainsworth, E.A., Long, S.P.** (2005) What have we learned from 15 years of Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy. *New Phytologist* **165**, 351-371.
- Altermatt, F.** (2010) Climatic warming increases voltinism in European butterflies and moths. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences* **277**, 1281-1287.
- Andrewartha, H.G., Birch, L.E.** (1954). *The distribution and abundance of animals*. University of Chicago Press, Chicago.
- Archambault, D.J.** (2007). Efficacy of herbicides under elevated temperature and CO<sub>2</sub>. Dans: Newton, P.C.D., Carran, R.A., Edwards, G.R., Niklaus, P.A. (Éds.), *Agroecosystems in a changing climate*. Taylor & Francis Group, New York, pp. 333-336.
- Aurambout, J.P., Finlay, K.J., Luck, J., Beattie, G.A.C.** (2009) A concept model to estimate the potential distribution of the Asiatic citrus psyllid (*Diaphorina citri* Kuwayama) in Australia under climate change-A means for assessing biosecurity risk. *Ecological Modelling* **220**, 2512-2524.
- Bale, J., Masters, G.J., Hodkinson, I.D., Awmack, C., Martijn, B., Brown, V.K., Butterfield, J., Buse, A., Coulson, J.C., Farrar, J., Good, J.E., Harrington, R., Hartley, S., Jones, T.J., Lindroth, R.L., Press, M.C., Symrnioudis, I., Watt, A.D., Whittaker, J.B.** (2002) Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores. *Global Change Biology* **8**, 1-16.
- Ballhorn, D.J., Schmitt, I., Fankhauser, J.D., Katagiri, F., Pfanz, H.** (2010) CO<sub>2</sub>-mediated changes of plant traits and their effects on herbivores are determined by leaf age. *Ecological Entomology* **36**, 1-13.
- Bergant, K., Bogataj, L.K., Trdan, S.** (2006) Uncertainties in modelling of climate change impact in future: an example of onion thrips (*Thrips Tabaci* Lindeman) in Slovenia. *Ecological Modelling* **194**, 244-255.
- Bergant, K., Trdan, S., Znidarcic, D., Crepinsek, Z., Kajfez-Bogataj, L.** (2005) Impact of climate change on developmental dynamics of *Thrips tabaci* (Thysanoptera : Thripidae): can it be quantified? *Environmental entomology* **34**, 755-766.
- Boland, G.J., Melzer, M.S., Hopkin, A., Hihhins, V., Nassuth, A.** (2004) Climate change and plant disease in Ontario. *Canadian Journal of Plant Pathology* **26**, 335-350.
- Bourgeois, G., Bourque, A., Deaudelin, G.** (2004) Modelling the impact of climate change on disease incidence: a bioclimatic challenge. *Canadian Journal of Plant Pathology* **26**, 284-290.
- Bradley, B.A.** (2009) Regional analysis of the impacts of climate change on cheatgrass invasion shows potential risk and opportunity. *Global Change Biology* **15**, 196-208.

- Bradley, B.A., Wilcove, D.S., Oppenheimer, M.** (2010) Climate change increases risk of plant invasion in the Eastern United States. *Biological Invasions* **12**, 1855-1872.
- Bradshaw, W.E., Holzapfel, C.M.** (2001) Genetic shift in photoperiodic response correlated with global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **98**, 14509-14511.
- Butterworth, M.H., Semenov, M.A., Barnes, A., Moran, D., West, J.S., Fitt, B.D.L.** (2010) North-South divide: contrasting impacts of climate change on crop yields in Scotland and England. *Journal of the Royal Society Interface* **7**, 123-130.
- Cannon, R.J.C.** (1998) The implications of predicted climate change for insect pest in the UK, with emphasis on non-indigenous species. *Global Change Biology* **4**, 785-796.
- Casteel, C.L., O'Neill, B.F., Zavala, J.A., Bilgin, D.D., Berenbaum, M.R., DeLucia, E.H.** (2008) Transcriptional profiling reveals elevated CO<sub>2</sub> and elevated O<sub>3</sub> alter resistance of soybean (*Glycine max*) to Japanese beetles (*Popillia japonica*). *Plant Cell and Environment* **31**, 419-434.
- Chakraborty, S., Datta, S.** (2003) How will plant pathogens adapt to host plant resistance at elevated CO<sub>2</sub> under a changing climate? *New Phytologist* **159**, 733-742.
- Chakraborty, S., Newton, A.C.** (2011) Climate change, plant diseases and food security: an overview. *Plant Pathology* **60**, 2-14.
- Chakraborty, S., Tiedemann, A.V., Teng, P.S.** (2000) Climate change: potential impact on plant diseases. *Environmental Pollution* **108**, 317-326.
- Chen, C.-C., McCarl, B.** (2001) An investigation of the relationship between pesticide usage and climate change. *Climatic Change* **50**, 475-487.
- Coakley, S.M., Scherm, H., Chakraborty, S.** (1999) Climate change and plant disease management. *Annual Review of Phytopathology* **37**, 399-426.
- Coope, G.R.** (1995). The effects of quaternary climatic changes on insect populations: lessons from the past. Dans: Harrington, R., Stork, N.E. (Éds.), *Insects in a changing environment, volume 17*. Academia Press, London, pp. 29-47.
- Coviella, C.E., Trumble, J.T.** (1999) Effects of elevated atmospheric carbon dioxide on insect-plant interactions. *Conservation Biology* **13**, 700-712.
- Davis, M.B., Shaw, R.G.** (2001) Range shifts and adaptive responses to Quaternary climate change. *Science* **292**, 673-679.
- DeLucia, E.H., Casteel, C.L., Nabity, P.D., O'Neill, B.F.** (2008) Insects take a bigger bite out of plants in a warmer, higher carbon dioxide world. *PNAS* **105**, 1781-1782.
- Dermody, O., O'Neill, B.F., Zangerl, A.R., Berenbaum, M.R., DeLucia, E.H.** (2008) Effects of elevated CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> on leaf damage and insect abundance in a soybean agroecosystem. *Arthropod-Plant Interactions* **2**, 125-135.
- Dixon, A.F.G.** (2003) Climate change and phenological asynchrony. *Ecological Entomology* **28**, 380-381.
- Eastburn, D.M., Degennaro, M.M., DeLucia, E.H., Dermody, O., McElrone, A.J.** (2010) Elevated atmospheric carbon dioxide and ozone alter soybean diseases at SoyFACE. *Global Change Biology* **16**, 320-330.
- Edwards, G.R., Newton, P.C.D.** (2007). Plant performance and implications for plant population dynamics and species composition in a changing climate. Dans:

- Newton, P.C.D., Carran, R.A., Edwards, G.R., Niklaus, P.A. (Éds.), *Agroecosystems in a changing climate*. Taylor & Francis Group, New York, pp. 189-210.
- Estay, S.A., Lima, M., Labra, F.A.** (2009) Predicting insect pest status under climate change scenarios: combining experimental data and population dynamics modelling. *Journal of Applied Entomology* **133**, 491-499.
- Evans, N., Baierl, A., Semenov, M.A., Gladders, P., Fitt, B.D.L.** (2008) Range and severity of a plant disease increased by global warming. *Journal of the Royal Society Interface* **5**, 525-531.
- Fernandez-Quintanilla, C., Quadranti, M., Kudsk, P., Bàrberi, P.** (2008) Which future for weed science? *Weed Research* **48**, 297-301.
- Flynn, D.F.B., Sudderth, E.A., Bazzaz, F.A.** (2006) Effects of aphid herbivory on biomass and leaf-level physiology of *Solanum dulcamara* under elevated temperature and CO<sub>2</sub>. *Environmental and Experimental Botany* **56**, 10-18.
- Fuhrer, J.** (2003) Agroecosystem responses to combinations of elevated CO<sub>2</sub>, ozone, and global climate change. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **97**, 1-20.
- Garrett, K.A., Dendy, S.P., Frank, E.E., Rouse, M.N., Travers, S.E.** (2006) Climate change effects on plant disease: genomes to ecosystems. *Annual Review of Phytopathology* **44**, 489-509.
- Garrett, K.A., Forbes, G.A., Savary, S., Skelsey, P., Sparks, A.H., Valdivia, C., van Bruggen, A.H.C., Willocquet, L., Djurle, A., Duveiller, E., Eckersten, H., Pande, S., Vera Cruz, C., Yuen, J.** (2011) Complexity in climate-change impacts: an analytical framework for effects mediated by plant disease. *Plant Pathology* **60**, 15-30.
- Gregory, P.J., Johnson, S.N., Newton, A.C., Ingram, J.S.I.** (2009) Intergrating pest and pathogens into the climate change/food security debate. *Journal of Experimental Botany* **60**, 2827-2838.
- Hallett, R.H., Goodfellow, S.A., Weiss, R.M., Olfert, O.** (2009) MidgEmerge, a new predictive tool, indicates the presence of multiple emergence phenotypes of the overwintered generation of swede midge. *Entomologia Experimentalis et Applicata* **130**, 81-97.
- Hamilton, J.G., Dermody, O., Aldea, M., Zangerl, A.R., Rogers, A., Berenbaum, M.R., DeLucia, E.** (2005) Anthropogenic changes in tropospheric composition increase susceptibility of soybean to insect herbivory. *Environmental entomology* **34**, 479-485
- Harvell, C.D., Mitchell, C.E., Ward, J.R., Altizer, S., Dobson, A.P., Ostfeld, R.S., Samuel, M.D.** (2002) Climate warming and disease risks for terrestrial and marine biota. *Science* **296**, 2158-2162.
- Hovenden, M.J.** (2007) Distinguishing between acclimation and adaptation. Dans: Newton, P.C.C., Carran, R.A., Edwards, G.R., Niklaus, P.A. (Éds.), *Agroecosystems in a changing climate*. Taylor & Francis group, New York, pp. 291-308.
- Hughes, L., Bazzaz, F.A.** (2001) Effects of elevated CO<sub>2</sub> on five plant-aphid interactions. *Entomologia Experimentalis et Applicata* **99**, 87-96.
- Hummel, R.L., Brandenburg, R.L., Heagle, A.S., Arellano, C.** (1998) Effects of ozone on reproduction of twospotted spider mite (Acari : Tetranychidae) on white clover. *Environmental entomology* **27**, 388-394.

- Hunter, M.D.** (2001) Effects of elevated atmospheric carbon dioxide on insect-plant interactions. *Agricultural and Forest Entomology* **3**, 153-159.
- Jarnevich, C., Stohlgren, T.** (2009) Near term climate projections for invasive species distributions. *Biological Invasions* **11**, 1373-1379.
- Jeffree, C.E., Jeffree, E.P.** (1996) Redistribution of the potential geographical ranges of Mistletoe and Colorado Beetle in Europe in response to the temperature component of climate change. *Functional Ecology* **10**, 562-577.
- Kriticos, D.J., Watt, M.S., Potter, K.J.B., Manning, L.K., Alexander, N.S., Tallent-Halsell, N.** (2011) Managing invasive weeds under climate change: considering the current and potential future distribution of *Buddleja davidii*. *Weed Research* **51**, 85-96.
- Ladanyi, M., Horvath, L.** (2010) A review of the potential climate change impact on insect populations - general and agricultural aspects. *Applied Ecology and Environmental Research* **8**, 143-152.
- Lake, J.A., Wade, R.N.** (2009) Plant-pathogen interactions and elevated CO<sub>2</sub>: morphological changes in favour of pathogens. *Journal of Experimental Botany* **60**, 3123-3131.
- Lawton, J.H.** (1995). The response of insects to environmental change. Dans: Harrington, R., Stork, N.E (Éds.) *Insects in a changing environment: symposium of the Royal Entomological Society*. Academic Press, San Diego, USA, pp. 3-26.
- Luck, J., Spackman, M., Freeman, A., Trebicki, P., Griffiths, W., Finlay, K., Chakraborty, S.** (2011) Climate change and diseases of food crops. *Plant Pathology* **60**, 113-121.
- Manning, W.J., Tiedemann, A.V.** (1995) Climate change: Potential effects of increased atmospheric Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>), ozone (O<sub>3</sub>), and ultraviolet-B (UV-B) radiation on plant diseases. *Environmental Pollution* **88**, 219-245.
- Massad, T.J., Dyer, L.A.** (2010) A meta-analysis of the effects of global environmental change on plant-herbivore interactions. *Arthropod-Plant Interactions* **4**, 181-188.
- Melloy, P., Hollaway, G., Luck, J.O., Norton, R.O.B., Aitken, E., Chakraborty, S.** (2010) Production and fitness of *Fusarium pseudograminearum* inoculum at elevated carbon dioxide in FACE. *Global Change Biology* **16**, 3363-3373.
- Mondor, E.B., Awmack, C.S., Lindroth, R.L.** (2010) Individual growth rates do not predict aphid population densities under altered atmospheric conditions. *Agricultural and Forest Entomology* **12**, 293-299.
- Newman, J.A.** (2006) Using the output from global circulation models to predict changes in the distribution and abundance of cereal aphids in Canada: a mechanistic modeling approach. *Global Change Biology* **12**, 1634-1642.
- O'Neill, B.F., Zangerl, A.B., Delucia, E.H., Berenbaum, M.R.** (2010a) Olfactory preferences of *Popillia japonica*, *Vanessa cardui*, and *Aphis glycines* for *Glycine max* grown under elevated CO<sub>2</sub>. *Environmental entomology* **39**, 1291-1301.
- O'Neill, B.F., Zangerl, A.R., Dermody, O., Bilgin, D.D., Casteel, C.L., Zavala, J.A., DeLucia, E.H., Berenbaum, M.R.** (2010b) Impact of elevated levels of atmospheric CO<sub>2</sub> and herbivory on flavonoids of soybean (*Glycine max* Linnaeus). *Journal of Chemical Ecology* **36**, 35-45.

- Olfert, O., Weiss, R.M.** (2006a) Bioclimatic model of *Melanoplus sanguinipes* (Fabricius) (Orthoptera: Acrididae) populations in Canada and the potential impacts of climate change. *Journal of Orthoptera Research* **15**, 65-77.
- Olfert, O., Weiss, R.M.** (2006b) 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.
- Ouranos** (2010) *Savoir s'adapter aux changements climatiques*. Rédaction: DesJarlais, C., Allard, M., Bélanger, D., Blondlot, A., Bouffard, A., Bourque, A., Chaumont, D., Gosselin, P., Houle, D., Larrivée, C., Lease, N., Pham, A.T., R. Roy, Savard, J.-P., Turcotte, R., Villeneuve, C. Montréal, Qc.
- Parmesan, C., Ryrholm, N., Stefanescu, C., Hill, J.K., Thomas, C.D., Descimon, H., Huntley, B., Kaila, L., Kullberg, J., Tammaru, T., Tennent, W.J., Thomas, J.A., Warren, M.** (1999) Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming. *Nature* **399**, 579-583.
- Patterson, D.T., Westbrook, J.K., Joyce, R.J.V., Lingren, P.D., Rogasik, J.** (1999) Weeds, insects, and diseases. *Climatic Change* **43**, 711-727.
- Pautasso, M., Dehnen-Schmutz, K., Holdenrieder, O., Pietravalle, S., Salama, N., Jeger, M.J., Lange, E., Hehl-Lange, S.** (2010) Plant health and global change – some implications for landscape management. *Biological Reviews* **85**, 729-755.
- Pelini, S.L., Keppel, J.A., Kelley, A.E., Hellmann, J.J.** (2010) Adaptation to host plants may prevent rapid insect responses to climate change. *Global Change Biology* **16**, 2923-2929.
- Porter, J.H., Parry, M.L., Carter, T.R.** (1991) The potential effects of climatic change on agricultural insects pests. *Agricultural and Forest Meteorology* **57**, 221-240.
- Rillig, M.C.** (2007). Climate change effects on fungi in agroecosystems. Dans: Newton, P.C.D., Carran, R.A., Edwards, G.R., Niklaus, P.A.(Éds.), *Agroecosystems in a changing climate*. Taylor & Francis group, New York, pp. 211-226.
- Rohr, J.R., Moreno, D.H.R., Thomas, M.B., Paull, S.H., Dobson, A.P., Marm, K.A., Pascual, M., Raffel, T., R.** (2010) Toward a general theory for how climate change will affect infectious disease. *Bulletin of the Ecological Society of America* **91**, 467-473.
- Rosenzweig, C., Iglesias, A., Yang, X.B., Epstein, P.R., Chivian, E.** (2000) *Climate change and U.S. agriculture: the impacts of warming and extreme weather events on productivity, plant diseases, and pests*. Center for Health and the Global Environment, Boston.
- Sage, R.F., Sharkey, T.D., Seemann, J.R.** (1989) Acclimation of photosynthesis to elevated CO<sub>2</sub> in five C<sub>3</sub> species. *Plant Physiology* **89**, 590-596.
- Salinari, F., Giosuè, S., Tubiello, F.N., Rettori, A., Rossi, V., Spanna, F., Rosenzweig, C., Gullino, M.L.** (2006) Downy mildew (*Plasmopara viticola*) epidemics on grapevine under climate change. *Global Change Biology* **12**, 1299-1307.
- Sandermann, H.J., Ernst, D., Heller, W., Langebartels, C.** (1998) Ozone: an abiotic elicitor of plant defence reactions. *Trends in Plant Science* **3**, 47-50.
- Scherm, H.** (2004) Climate change: can we predict the impacts on plant pathology and pest management? *Canadian Journal of Plant Pathology* **26**, 267-273.

- Schroeder, J.B., Gray, M.E., Ratcliffe, S.T., Estes, R.E., Long, S.P.** (2006) Effects of elevated CO<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> on a variant of the western corn rootworm (Coleoptera : Chrysomelidae). *Environmental entomology* **35**, 637-644.
- Seguin, B.** (2007) *Impact du changement climatique et adaptation de l'agriculture*. INRA, Avignon.
- Staley, J.T., Hodgson, C.J., Mortimer, S.R., Morecroft, M.D., Masters, G.J., Brown, V.K., Taylor, M.E.** (2007) Effects of summer rainfall manipulations on the abundance and vertical distribution of herbivorous soil macro-invertebrates. *European Journal of Soil Biology* **43**, 189-198.
- Taiz, L., Zeiger, E.** (2002). *Plant physiology, third edition*. Sinauer Associates, inc, Sunderland, Massachusetts.
- Thompson, L.J., Naeem, S.** (1996) The effects of soil warming on plant recruitment. *Plant and Soil* **182**, 339-343.
- Tobin, P.C., Nagarkatti, S., Loeb, G., Saunders, M.C.** (2008) Historical and projected interactions between climate change and insect voltinism in a multivoltine species. *Global Change Biology* **14**, 951-957.
- Trnka, M., Muska, F., Semerádová, D., Dubrovský, M., Kocmánková, E., Zalud, Z.** (2007) European Corn Borer life stage model: regional estimates of pest development and spatial distribution under present and future climate. *Ecological Modelling* **207**, 61-84.
- Trumble, J., Butler, C.** (2009) Climate change will exacerbate California's insect pest problems. *California Agriculture* **63**, 73-78.
- Villeneuve, C., Richard, F.** (2001). *Vivre les changements climatiques: l'effet de serre expliqué*. Éditions MultiMondes, Québec.
- Wolfe, D.W., Ziska, L., Petzoldt, C., Seaman, A., Chase, L., Hayhoe, K.** (2008) Projected change in climate thresholds in the Northeastern U.S.: implications for crops, pests, livestock, and farmers. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* **13**, 555-575.
- Wu, G., Chen, F.J., Ge, F., Xiao, N.-W.** (2011) Impacts of elevated CO<sub>2</sub> on expression of plant defensive compounds in Bt-transgenic cotton in response to infestation by cotton bollworm. *Agricultural and Forest Entomology* **13**, 77-82.
- Zavala, J.A., Casteel, C.L., DeLucia, E.H., Berenbaum, M.R.** (2008) Anthropogenic increase in carbon dioxide compromises plant defense against invasive insects. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **105**, 5129-5133.
- Zhou, X.L., Harrington, R., Woiwod, I.P., Perry, J.N., Bale, J.S., Clark, S.J.** (1995) Effects of temperature on aphid phenology. *Global Change Biology* **1**, 303-313.
- Ziska, L.H.** (2010) Elevated carbon dioxide alters chemical management of Canada thistle in no-till soybean. *Field Crops Research* **119**, 299-303.
- Ziska, L.H., Caulfield, F.A.** (2000) Rising CO<sub>2</sub> and pollen production of common ragweed (*Ambrosia artemisiifolia*), a known allergy-inducing species: implications for public health. *Australian Journal of Plant Physiology* **27**, 893-898.
- Ziska, L.H., Runion, B.** (2007). Future weed, pest, and disease problems for plants. Dans: Newton, P.C.C., Carran, R.A., Edwards, G.R., Niklaus, P.A. (Éds.), *Agroecosystems in a changing climate*. Taylor & Francis group, New York, pp. 261-279.

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

# Annexes

Annexe 1. Prévisions des impacts des changements climatiques sur les insectes ravageurs à partir de simulations climatiques.

Organismes	Modèles	Paramètres bioclimatiques	Localisation	Horizons temporels	Principales conclusions	Auteurs
<b>Cécidomyie du chou-fleur</b> ( <i>Contarinia nasturtii</i> ) [Diptera: Cecidomyiidae]	<i>Bioclimatique</i> : MidEmerge, DYMEX <i>Climatique</i> : aucun	Température Précipitations Humidité relative	Ontario, Québec CANADA	Non mentionné	Cet insecte possède 4.5 générations par année en Ontario et au Québec. Le réchauffement climatique permettra certainement le développement d'une 5 <sup>e</sup> génération.	(Hallett et al., 2009)
<b>Thrips de l'oignon</b> ( <i>Thrips tabaci</i> ) [Thysanoptera : Thripidae]	<i>Bioclimatique</i> : Régression linéaire <i>Climatique</i> : 4GCM: Mk2 (CSIRO); HadCM3 (UKMO); PCM (DOE-NCAR); OPYC3 (ECHAM4) [A1 à B2]	Température	SLOVÉNIE	Continue 1951-2100	Augmentation du nombre de générations du ravageur avec les hausses de température.	(Bergant et al., 2005)
<b>Ravageurs des grains d'entreposage</b> ( <i>Tribolium confusum</i> ) [Coleop. : Tenebrionidae] et ( <i>Callosobruchus chinensis</i> ) [Coleopt. : Chrysomelidae]	<i>Bioclimatique</i> :Ricker's classic equation (modèle de <b>compétition intra-spécifique</b> ) <i>Climatique</i> : 1 RCM : CONAMA (PRECIS) [A2 & B2]	Température Précipitations	CHILI	2071-2100	Augmentation des densités de population de ces deux ravageurs, passant au statut d'insectes nuisibles pour les régions plus au sud du Chili.	(Estay et al., 2009)
<b>Psylle asiatique des agrumes</b> ( <i>Diaphorina citri</i> ) [Hemiptera : Psyllidae]	<i>Bioclimatique</i> : STELLA (enveloppe bioclim.) et SME (dynamique hôte-ravageur) <i>Climatique</i> : 2 GCM : CSIRO et DARLAM [A2]	Température Précipitations	AUSTRALIE	2030 2070	Diminution du risque d'établissement de ce ravageur avec l'augmentation des températures, en raison de la diminution des intervalles où l'insecte est capable de se nourrir sur les nouvelles pousses de l'hôte.	(Aurambout et al., 2009)
<b>Pyrale du maïs</b> ( <i>Ostrinia nubilalis</i> ) [Lepidoptera : Crambidae]	<i>Bioclimatique</i> : ECAMON (modèle phénologique) <i>Climatique</i> : 4 GCM :CSIRO-Mk2; ECHAM4; HadCM3; NCAR-PCM [A2]	Température Évapotranspiration Précipitations Humidité	République tchèque	2010; 2015; 2020; 2025; 2030; 2040; 2050; 2075	Extension de l'aire de répartition de la race bivoltine, augmentation de la race bivoltine.	(Trnka et al., 2007)

<b>Doryphore de la pomme de terre</b> <i>(Leptinotarsa decemlineata)</i> [Coleoptera : Chrysomelidae]	<i>Bioclimatique</i> : Relation entre la localisation et la température <i>Climatique</i> : 2 GCM : UKHI; UKTR [CO <sub>2</sub> x2]	Température	EUROPE	Pas d'horizon de temps mais CO <sub>2</sub> x2	Extension de l'aire de répartition du Doryphore de la pomme de terre jusqu'au nord de l'Angleterre. Régression des populations localisées plus au Sud.	(Jeffree et Jeffree, 1996)
<b>Puceron bicolor des céréales</b> <i>Rhopalosiphum padi</i> [Hemiptera : Aphididae] et variantes	<i>Bioclimatique</i> : Modèle d'interaction plante-ravageur <i>Climatique</i> : 2 GCM : HadCM3; CGCM2 [A1 à B2]	Température	CANADA	2080	La température à elle seule explique bien les changements. Effet variable selon le modèle choisi (expansion vers le nord) mais variations également selon la longitude.	(Newman, 2006)
<b>Criocère des céréales</b> <i>(Oulema melanopus)</i> [Coleoptera : Chrysomelidae]; <b>Méligèthe des crucifères</b> <i>(Meligethes viridescens)</i> [Coleoptera : Nitidulidae], <b>Charançon de la silique</b> <i>(Ceutorhynchus obstrictus)</i> [Coleoptera : Curculionidae] <b>Criquet</b> <i>(Melanoplus sanguinipes)</i> [Orthoptera : Acrididae]	<i>Bioclimatique</i> : CLIMEX <i>Climatique</i> : incrémentation de 1 à 7°C et de -60% à +60% de précipitations	Température Précipitations	CANADA	Autour de 2100 selon le scénario d'émission de GES	Changement dans la distribution des ravageurs et extension de leur aire de répartition totale ainsi que leur abondance relative.	(Olfert et Weiss, 2006a; Olfert et Weiss, 2006b)
<b>Pyrale du maïs</b> <i>(Ostrinia nubilalis)</i>	<i>Bioclimatique</i> : base sur les cumuls de D-J <i>Climatique</i> : GISS [2xCO <sub>2</sub> ]	Température	EUROPE	Pas d'horizon de temps mais 2xCO <sub>2</sub> +1°C	Les simulations climatiques prédisent l'expansion de l'aire de distribution de la pyrale du maïs jusqu'à 1200 km vers le Nord, ou 165 à 500 km pour chaque augmentation de 1°C.	(Porter et al., 1991)

## Annexe 2. Prévisions des impacts des changements climatiques sur les agents pathogènes à partir de simulations climatiques.

Organismes	Modèles	Paramètres bioclimatiques	Localisation	Horizons temporels	Principales conclusions	Auteurs
<b>Jambe noire</b> (chancre du collet) des crucifères ( <i>Leptosphaeria</i> <i>maculans</i> )	<i>Bioclimatique</i> : Modèle élaboré par Evans et al. 2008 <i>Climatique</i> : 1 GCM : HadCM3-UKCIP02. [LO & HI]	Température Précipitations	ANGLETERRE ET ÉCOSSE	2020 2050	Impact positif dans les régions du nord avec une augmentation de 15% de rendement. Impact négatif dans les régions du sud avec une diminution du rendement de 50%.	(Butterworth et al., 2010)
<b>Mildiou de la vigne</b> ( <i>Plasmopara viticola</i> )	<i>Bioclimatique</i> : modèle basé sur des données historiques <i>Climatique</i> : 2 GCM : GISS; HadCM3. [A2]	Température Précipitations	ITALIE	2030 2050 2080	Augmentation de la pression de la maladie, épidémies plus graves principalement dues à la hausse de température.	(Salinari et al., 2006)
<b>Brûlure tardive de la pomme de terre</b> ( <i>Phytophthora</i> <i>infestans</i> ), <b>Tavelure du pommier</b> ( <i>Venturia inaequalis</i> ), <b>Brûlure cercosporéenne de la carotte</b> ( <i>Cercospora carotae</i> )	<i>Bioclimatique</i> : CIPRA <i>Climatique</i> : 5 GCM: CGCM1; ECHAM4; CSIRO-Mk2; CCSR/NIES; HadCM3. [+1%/an]	Température Précipitations Humidité relative Humectation (T° de l'air, HR, vent et précip.)	Québec, CANADA	2025 2050 2075 2099	<i>Brûlure tardive</i> : pas de tendance en ce qui concerne le nombre de périodes favorables à l'infection. <i>Tavelure</i> : apparition plus hâtive et augmentation du nombre de périodes favorables à l'infection (sans calculer la conservation hivernale). <i>Brûlure cercosporéenne</i> : augmentation du nombre de périodes d'infection avec une décroissance pour les années 2075 et 2099, dues aux températures élevées.	(Bourgeois et al., 2004)
<b>Phoma du colza</b> ( <i>Leptosphaeria</i> <i>maculans</i> )	<i>Bioclimatique</i> : Modèle développé par les auteurs <i>Climatique</i> : 1 GCM : HadCM3; 1 RCM : HadRM3. [LO & HI]	Température Précipitations	ANGLETERRE	2020 2050	Augmentation de l'intensité de la maladie dans sa distribution spatiale actuelle, ainsi qu'une progression de son aire de distribution vers le nord.	(Evans et al., 2008)

### Annexe 3. Prévisions des impacts des changements climatiques sur les mauvaises herbes à partir de simulations climatiques.

Organismes	Modèles	Paramètres bioclimatiques	Localisation	Horizons temporels	Principales conclusions	Auteurs
<b>Kudzu</b> ( <i>Pueraria montana</i> )	<i>Bioclimatique</i> : GARP <i>Climatique</i> : Utilisation des données historiques (112 ans) et régression linéaire	Température Précipitations	ÉTATS-UNIS	2035	Augmentation de l'aire de distribution au nord et diminution dans certaines régions plus au sud.	(Jarnevich et Stohlgren, 2009)
<b>Buddleia de David</b> ( <i>Buddleja davidii</i> )	<i>Bioclimatique</i> : CLIMEX <i>Climatique</i> : 3 GCM : CSIRO, NCAR-CCSM;MIROC-H [A1B & A2]	Température Humidité	MONDE ENTIER	2080	Expansion des habitats favorables pour : le nord-est américain, le sud du Canada, le nord et l'est de l'Europe et le sud-ouest de la Nouvelle-Zélande.	(Kriticos et al., 2011)
<b>Brôme des toits</b> ( <i>Bromus tectorum</i> )	<i>Bioclimatique</i> : Relation entre le climat et présence/absence <i>Climatique</i> : 10 GCM : CGCM3; CNRM CM3; GFD; GISS, HAD CM3; INM CM3; IPSL CM4; MIROC; MPI echam5; NCAR ccs3 [A1B]	Précipitations Température	OUEST DES ÉTATS-UNIS	2100	L'espèce est fortement influencée par les précipitations. Si ces dernières augmentent, une réduction de l'habitat est anticipée, et ce, jusqu'à 70%. Si elles diminuent, un accroissement de 45% de zone favorable pourrait être observée.	(Bradley, 2009)
<b>Kudzu</b> ( <i>Pueraria montana</i> ), <b>Troène de Chine</b> et <b>Troène commun</b> ( <i>Ligustrum sinense</i> ; <i>L. vulgare</i> ) et <b>Pailote</b> ( <i>Imperata cylindrica</i> )	<i>Bioclimatique</i> : Relation entre le climat et présence/absence <i>Climatique</i> : 11 GCM: CGCM3; CNRM CM3; GFD; GISS, HAD CM3; INM CM3; IPSL CM4; MIROC; MPI echam5; NCAR; CSIRO MK3 [A1B]	Précipitations Température	SUD-EST DES ÉTATS-UNIS	2100	Risque d'invasion augmenté vers le nord pour les trois espèces (de façon graduelle pour le kudzu et la pailote et plus spontanée pour les espèces de troène puisqu'il y a déjà présence de graines dans les sols).	(Bradley et al., 2010)
<b>Gui</b> ( <i>Viscum album</i> )	<i>Bioclimatique</i> : Relation entre la localisation et la température <i>Climatique</i> : 2 GCM : UKHI; UKTR [2xCO <sub>2</sub> ]	Température	EUROPE	Pas d'horizon de temps mais CO <sub>2</sub> x2	Expansion de l'aire de répartition au nord et à l'est de l'Europe, mais pas au nord de l'Angleterre.	(Jeffree et Jeffree, 1996)

# Modèles climatiques

Modèles Climatiques	Description	Pays
CCCma (CGCM)	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canada
CNRM CM3	Centre National de Recherches Météorologiques	France
GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	États-Unis
GISS	Goddard Institute for Space Studies	États-Unis
HAD	Hadley Centre for Climate Prediction	Royaume-Uni
INM	Institute for Numerical Mathematics	Russie
IPSL	Institut Pierre Simon Laplace	France
MIROC	Model for Interdisciplinary Research on Climate	Japon
MPI	Max Planck Institute for Meteorology	Allemagne
NCAR	National Center for Atmospheric Research	États-Unis
CSIRO	Commonwealth Scientific & Industrial Research Organisation	Australie
UKCIP02	UK Climate Impacts Programme	Royaume-Uni

# Scénarios d'émissions

Familles de scénarios	Descriptions
<b>A1</b>	<p>Croissance économique très rapide</p> <p>Augmentation de la population mondiale atteignant son maximum au milieu du siècle pour ensuite décliner</p> <p>Apparition de nouvelles technologies plus efficaces</p> <p>Interactions culturelles et sociales accrues diminuant les différences régionales</p> <p>Monde très hétérogène avec une préservation des identités locales</p>
<b>A2</b>	<p>Accroissement continu de la population mondiale</p> <p>Croissance économique et évolution technologique plus fragmentées et plus lentes que dans les autres familles</p> <p>Augmentation de la population mondiale atteignant son maximum au milieu du siècle pour ensuite décliner</p> <p>Changements rapides dans les structures économiques vers une économie de services et d'information</p>
<b>B1</b>	<p>Réduction dans l'intensité des matériaux, utilisation des ressources de manière plus efficace et introduction de technologies propres</p> <p>Solutions mondiales orientées vers une viabilité économique, sociale et environnementale</p> <p>Solutions locales pour la viabilité économique, sociale et environnementale</p> <p>Augmentation continue de la population mondiale (rythme plus faible que dans A2)</p>
<b>B2</b>	<p>Niveaux intermédiaires de développement économique</p> <p>Évolution technologique moins rapide et plus diverse que dans les scénarios B1 et A1</p> <p>Protection de l'environnement et équité sociale</p>

# Glossaire

**CLIMEX:** Logiciel permettant de combiner les informations climatiques d'un territoire donné avec les paramètres biologiques d'une espèce et de sa distribution afin de définir son enveloppe climatique. Les changements dans la distribution de l'espèce peuvent ainsi être visualisés en modifiant le climat selon les scénarios climatiques utilisés.

**Compétition intraspécifique :** Compétition entre des individus appartenant à la même espèce.

**Compétition interspécifique :** Compétition entre des individus appartenant à différentes espèces.

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

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

**FACE :** Free-Air CO<sub>2</sub> Enrichment. Dispositif au champ (ensemble de tuyaux de 8 à 30 m de diamètre relâchant le CO<sub>2</sub>) permettant de modifier les concentrations de CO<sub>2</sub> sans confiner les plantes dans des chambres de croissance.

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

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

**Hétérozygotie :** État d'un organisme qui possède deux allèles différents de ce gène sur un même locus pour chacun de ses chromosomes homologues.

**Horizon :** Périodes de 20 ou 30 ans utilisées pour définir le climat afin de représenter la variabilité interannuelle d'un climat.

**Hyphe :** Filament plus ou moins ramifié des champignons, représentant le principal mode de croissance végétative et appelés collectivement mycélium.

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

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

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

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

**Polyphénisme** : Ce cas particulier de plasticité phénotypique est décrit lorsqu'un seul génotype produit deux ou plusieurs phénotypes discrets suite à un signal environnemental. Ces phénotypes "discrets" sont induits soit par un environnement discontinu soit par le dépassement d'un seuil.

**Propagule** : Terme utilisé pour décrire la structure d'une plante (par exemple : graine, bulbe, kyste) d'où un nouvel individu émergera.

**SRES** : **S**pecial **R**eport on **E**missions **S**cenarios. Scénarios d'émissions de gaz à effet de serre publiés par le GIEC allant du plus pessimiste A2 au plus optimiste B2 (voir section *Scénarios d'émissions*)

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

# Liste des sigles et acronymes

<b>AAC</b>	Agriculture et Agroalimentaire Canada
<b>FACE</b>	Free-Air CO <sub>2</sub> Enrichment (voir glossaire)
<b>GCM</b>	Modèle de climat global
<b>IRDA</b>	Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement
<b>MAPAQ</b>	Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec
<b>MRC</b>	Modèle régional du climat
<b>OMAFRA</b>	Ontario Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs
<b>SRES</b>	Special Report on Emissions Scenarios (voir glossaire)