

Modèles bioclimatiques pour la prévision des risques associés aux ennemis des cultures

dans un contexte de climat variable et en évolution

Dominique Plouffe
Gaétan Bourgeois, Ph.D.



Centre de référence en agriculture
et agroalimentaire du Québec

Commission agrométéorologie

AVERTISSEMENT

Au moment de sa rédaction, l'information contenue dans ce document était jugée représentative du secteur de l'agrométéorologie au Québec. Son utilisation demeure sous l'entière responsabilité du lecteur. Certains renseignements ayant pu évoluer d'une manière appréciable depuis la rédaction, le lecteur est invité à en vérifier l'exactitude avant de les utiliser et de les mettre en application.

Ce feuillet technique a été réalisé grâce à l'appui financier d'Ouranos en partenariat avec Ressources naturelles Canada.



Ressources naturelles
Canada

Natural Resources
Canada

Canada

POUR INFORMATION

Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ)
Édifice Delta 1
2875, boulevard Laurier, 9^e étage
Québec (Québec) G1V 2M2
Téléphone : 418 523-5411
Télécopieur : 418 644-5944
Courriel : client@craaq.qc.ca
Site Internet : www.craaq.qc.ca

© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2012
© Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, 2012

Publication n° PAGR0105
ISBN 978-2-7649-0238-7
Dépôt légal
Bibliothèque et Archives Canada, 2012
Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2012

RÉDACTION

Dominique Plouffe, biologiste, Saint-Jean-sur-Richelieu

Gaétan Bourgeois, Ph.D., Bioclimatologie et modélisation, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Saint-Jean-sur-Richelieu

COLLABORATION ET RÉVISION

Sylvie Bellerose, biologiste, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Saint-Hyacinthe

Diane Lyse Benoit, Ph.D., malherbologiste, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Saint-Jean-sur-Richelieu

Anne Blondlot, agronome, Ouranos, Montréal

Gérald Chouinard, Ph.D., agronome-entomologiste, pomiculture, Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA), Saint-Hyacinthe

Hélène Côté, M.Sc., Ouranos, Montréal

Annie-Ève Gagnon, Ph.D., biologiste-entomologiste, Ouranos, Saint-Jean-sur-Richelieu

Sylvie Rioux, Ph.D., agronome-phytopathologiste, CÉROM, Québec

Michèle Roy, Ph.D., biologiste-entomologiste, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Québec

COORDINATION

Lyne Lauzon, biologiste, chargée de projets aux publications, CRAAQ, Québec

Denise Bachand, M.Sc., chargée de projets, CRAAQ, Québec

ÉDITION

Danielle Jacques, M.Sc., agronome, CRAAQ, Québec

CONCEPTION GRAPHIQUE ET MISE EN PAGE

Nathalie Nadeau, technicienne en infographie, CRAAQ, Québec

PHOTOS

S. Hindson, A. Lefebvre et D.L. Benoit (Agriculture et Agroalimentaire Canada)

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	1
Des cultures et leurs ennemis : un écosystème agricole complexe	1
Les modèles bioclimatiques : des outils précieux.....	1
 GESTION DES INTERVENTIONS PHYTOSANITAIRES	1
Insectes	1
Développement et degrés-jours	1
Des modèles et des insectes	2
Insectes et risques associés aux changements climatiques.....	2
 Maladies.....	3
Épidémiologie et modèles épidémiologiques	3
Maladies et risques associés aux changements climatiques	5
 Mauvaises herbes	6
Les mauvaises herbes dans les cultures.....	6
Le défi des modèles de germination et d'émergence des mauvaises herbes	6
Mauvaises herbes et risques associés aux changements climatiques	7
 CONCLUSION	8
 RÉFÉRENCES	8

INTRODUCTION

Des cultures et leurs ennemis : un écosystème agricole complexe

On ne peut parler d'agriculture sans mentionner les ennemis des cultures. Pour un producteur, tous les organismes qui s'attaquent à la culture ou sont en compétition avec celle-ci sont des ennemis potentiels alors que d'un point de vue écologique, ces interactions entre un milieu et les organismes vivants qui le composent sont naturelles. Un champ cultivé peut être considéré comme un écosystème complexe dont les plantes, culture ou mauvaises herbes constituent l'alimentation, le gîte et le site de reproduction d'un grand nombre d'insectes, qu'ils soient néfastes ou bénéfiques, de même que des prédateurs et parasitoïdes de ces mêmes insectes. Les agents pathogènes qui se développent sur la culture et qui causent différentes maladies font également partie de cet ensemble, au même titre que les mauvaises herbes qui exercent une action défavorable sur la culture en lui faisant concurrence, dépréciant la récolte, entraînant des difficultés de ramassage ou favorisant d'autres ennemis de la culture. De plus, des facteurs abiotiques (non vivants), tel le climat, influencent tous les organismes vivants de cet écosystème. L'importance du climat est majeure puisqu'il détermine en partie si un organisme peut vivre dans un milieu donné ou si une culture peut se rendre à maturité dans une zone géographique particulière.

Les modèles bioclimatiques : des outils précieux

Les modèles bioclimatiques sont des représentations mathématiques et graphiques des relations qui caractérisent le développement de certains organismes vivants et qui dépendent directement du climat. Les simulations effectuées avec ces modèles ont pour but de faciliter la compréhension des mécanismes qui sont observés dans un milieu. Les modèles utilisent des paramètres météorologiques (température, humidité relative, précipitations) pour prédire le développement d'une culture, de ses ravageurs et des mauvaises herbes, l'apparition de certaines maladies ou d'autres phénomènes qui sont directement assujettis au climat. En ce sens, ce sont des outils d'aide à la décision précieux quand il s'agit de protéger une culture par des traitements

phytosanitaires, qu'ils soient de nature chimique, biologique ou physique.

Ce feuillet technique présente un bref survol de ces modèles bioclimatiques et de leur utilité dans un contexte climatique variable et en évolution.

GESTION DES INTERVENTIONS PHYTOSANITAIRES

Insectes

Développement et degrés-jours

Les insectes sont des organismes poïkilothermes, c'est-à-dire des organismes dont la température est déterminée par celle du milieu dans lequel ils vivent. Durant toute leur existence, la température conditionne l'initiation et le déroulement de leurs processus vitaux tels que la croissance, l'alimentation, la mobilité, le développement et la reproduction (Roy, 2002). La température est donc l'indicateur climatique le plus important pour les insectes, comparativement aux autres ennemis des cultures dont le développement dépend d'une combinaison de plusieurs facteurs climatiques. Il existe une température au-dessous de laquelle ils ne peuvent se développer. C'est ce que l'on appelle la température de base et celle-ci est spécifique de chaque insecte ou groupe d'insectes et varie selon les espèces. Au-dessus de cette température, les insectes se développent, se nourrissent et se reproduisent, causant souvent des dommages importants aux cultures. Des expériences en laboratoire permettent de déterminer la température de base de même que le cumul thermique nécessaire à une espèce pour compléter chaque stade de son cycle vital. En effet, les insectes doivent accumuler un certain nombre de degrés-jours (DJ) pour passer d'un stade au suivant. Les degrés-jours quotidiens sont calculés en soustrayant la température de base (T_{base}) de l'insecte de la température moyenne (T_{moy}) de la journée (Équation 1).

$$DJ \text{ quotidien} = T_{moy} - T_{base} \quad \text{Équation 1}$$

où :

$$T_{moy} = (T_{max} + T_{min}) / 2$$

T_{max} = température maximale quotidienne

T_{min} = température minimale quotidienne

Un insecte s'établit dans les régions où les températures lui permettent de compléter son cycle vital. L'aire de distribution géographique, le nombre de générations annuelles d'une espèce d'insecte de même que l'abondance de sa population dépendent donc directement du climat (Roy, 2002).

Des modèles et des insectes

Certains modèles bioclimatiques utilisent les températures quotidiennes de l'air pour prédire le développement d'un insecte dans une région spécifique. Comme la température varie d'une région à l'autre, le stade de développement des populations d'insectes varie donc selon qu'elles se trouvent dans un territoire situé plus au sud ou dans un territoire où les cumuls thermiques (degrés-jours) ne sont pas aussi importants. Les modèles bioclimatiques décrivant le développement des insectes ravageurs des cultures sont des outils précieux lorsque leurs prédictions sont jumelées avec des observations au champ dans le cadre d'un programme de dépistage. À titre d'exemple, Bourgeois *et al.* (2009) ont développé un modèle décrivant le développement du charançon de la carotte. Cet insecte s'attaque aux racines des carottes alors qu'elles sont au tout début de leur développement, entraînant des pertes potentiellement importantes pour les producteurs (Figure 1). Le but du modèle est de prédire l'émergence des adultes au printemps, pour lesquels des insecticides sont couramment utilisés. Des données de capture, combinées à des données météorologiques recueillies sur une période commune de plus de 20 ans, ont permis de développer un modèle basé sur l'approche des cumuls thermiques. Les stades d'évolution de la population de charançons décrits par le modèle représentent trois moments importants, soit 5 % (début du suivi au champ), 50 % (maximum de captures) et 95 % (fin du suivi au champ) des captures cumulées. La comparaison des prédictions de ce modèle et des observations au champ démontre son excellent potentiel de prédiction (Bourgeois *et al.*, 2009). En utilisant ce modèle de prévision associé aux données climatiques, il devient alors plus facile pour le producteur de carottes de bien cibler ses interventions au début du développement de la population d'adultes et de limiter les dégâts causés par cet insecte.

D'autres modèles, tous basés sur des cumuls de température, ont été développés à partir de données de capture recueillies dans les régions agricoles du



FIGURE 1. CHARANÇON DE LA CAROTTE (*LISTRONOTUS OREGONENSIS*, LECONTE) ET GALERIES CREUSÉES PAR CELUI-CI

Photos : S. Hindson, Agriculture et Agroalimentaire Canada

Québec, et ce, pour un grand nombre d'espèces de ravageurs dans plusieurs cultures (Tableau 1).

Insectes et risques associés aux changements climatiques

Il est de plus en plus question des changements climatiques et des effets potentiels de ceux-ci sur l'agriculture. Les scénarios climatiques sont unanimes à prédire une augmentation des températures dans les années à venir. Ainsi, selon le rapport du consortium Ouranos (DesJarlais *et al.*, 2010), à l'horizon 2050, les températures estivales augmenteront de 1,9 à 3,0 °C dans le sud du Québec. Quant aux précipitations, le centre et le sud du Québec verront une diminution de l'accumulation de la neige au sol en hiver, mais aucun changement significatif dans les précipitations n'est attendu en été dans le sud. L'augmentation des températures aura une influence directe sur les insectes ravageurs des cultures, car la température

TABEAU 1. QUELQUES MODÈLES BIOCLIMATIQUES POUR DIFFÉRENTS INSECTES RAVAGEURS ET CULTURES AUXQUELLES ILS S'ATTAQUENT, DISPONIBLES DANS LE LOGICIEL CIPRA¹ DÉVELOPPÉ AU QUÉBEC

Culture	Ravageur
Canneberge	Cécidomyie de la canneberge, pyrale de l'atoca
Carotte	Charançon de la carotte, mouche de la carotte
Crucifères	Fausse teigne des crucifères, piéride du chou
Fraisier	Anthonome de la fleur du fraisier
Gazon	Charançon du pâturin, scarabée noir, ver gris
Maïs sucré	Pyrale du maïs
Oignon	Mouche de l'oignon
Poireau	Teigne du poireau
Pomme de terre	Doryphore de la pomme de terre
Pommier	Carpocapse de la pomme, charançon de la prune, hoplocampe de la pomme, mineuse marbrée, mouche de la pomme, noctuelle du fruit vert, punaise terne, sésie du cornouiller, tétranyque rouge, tordeuse à bandes obliques, tordeuse à bandes rouges, tordeuse du pommier, tordeuse orientale du pêcher
Vigne	Cicadelles, punaise terne

1. Centre Informatique de Prévisions des Ravageurs en Agriculture

Source : Bourgeois *et al.*, 2008

joue un rôle déterminant en ce qui concerne la distribution géographique, le nombre de générations annuelles, la survie hivernale et l'abondance des insectes présents dans les écosystèmes agricoles (Roy, 2002). Non seulement la température détermine-t-elle les cycles vitaux des insectes (croissance, alimentation, mobilité, développement et reproduction), mais ces derniers ont développé des mécanismes (diapause, migration, etc.) qui leur permettent de survivre aux froids de l'hiver. Une augmentation de la température estivale pourra favoriser certaines espèces qui compléteront un plus grand nombre de générations par année (la pyrale du maïs par exemple), causant davantage de dégâts aux cultures auxquelles elles s'attaquent. Des hivers plus doux et une saison de croissance prolongée permettront à certaines espèces qui, à ce jour, ne survivent pas dans nos régions faute de ne pouvoir accumuler suffisamment de degrés-jours pour compléter leur cycle vital, de faire leur apparition. D'ailleurs, des études montrent que de nombreuses espèces des régions tempérées ont modifié leur aire de distribution en réponse à l'évolution récente du climat (Régnière, 2009). Aussi, des changements dans les caractéristiques des masses d'air et de leurs déplacements pourraient entraîner des migrations des populations d'insectes se déplaçant

par les vents, comme les pucerons, les cicadelles et certaines espèces de lépidoptères, qui autrement ne se retrouveraient pas sous nos latitudes. Inversement, d'autres insectes tels que le doryphore de la pomme de terre peuvent se retrouver limités dans leurs déplacements lors de grands vents, réduisant ainsi la propagation de ces ravageurs (Gagnon *et al.*, 2011).

Maladies

Épidémiologie et modèles épidémiologiques

Les plantes produisent tant et aussi longtemps que le sol leur fournit suffisamment d'humidité et d'éléments nutritifs, qu'elles reçoivent assez de lumière et que la température demeure dans leur limite de tolérance. Lorsqu'une plante est atteinte d'une maladie, sa croissance et sa productivité en sont affectées. Des symptômes se développent allant jusqu'à causer la mort de la plante, en tout ou en partie. Les maladies peuvent être causées par différents types d'organismes pathogènes tels les champignons, les bactéries, les virus, les nématodes, etc. Les paramètres météorologiques qui affectent le développement des maladies incluent la température, les précipitations, l'humidité relative, la radiation solaire et la vitesse des vents. Aussi, certains agents pathogènes peuvent

être transmis aux plantes par les insectes. L'approche préventive la plus efficace et la plus largement répandue auprès des producteurs demeure l'utilisation de cultivars résistants à la maladie, limitant ainsi au minimum les dommages causés à la plante et à son environnement. De même, la rotation des cultures, le travail du sol, l'utilisation de semences certifiées ou traitées sont tous des moyens qui contribuent à diminuer les risques d'établissement d'une maladie (Gagnon *et al.*, 2011).

L'épidémiologie étudie le développement des maladies dans le temps et l'espace. En agriculture, cette discipline s'intéresse à la fréquence, à la distribution géographique et à l'évolution des maladies qui s'attaquent aux plantes. De nombreux modèles ont été développés dans le domaine de la phytopathologie. Ils sont souvent liés à la compréhension et à la prédiction du développement d'une maladie spécifique et sont généralement utilisés pour aider les producteurs à prendre des décisions éclairées dans la gestion des interventions contre les maladies des cultures. Il existe des modèles prévisionnels pour les maladies dans les grandes cultures (blé, orge), les cultures maraîchères (oignon, carotte, pomme de terre) et les cultures fruitières (pommier, vigne). Au Québec, les conseillers agricoles ont accès à plusieurs modèles qui peuvent les aider quotidiennement

dans le choix du meilleur moment pour effectuer des traitements phytosanitaires (Tableau 2).

Comme les maladies se développent sous l'effet de facteurs météorologiques bien précis et facilement mesurables (température, humidité relative, précipitations), ces derniers servent d'intrants à la majorité des modèles prévisionnels. Un modèle basé sur l'accumulation des degrés-jours a été développé pour prédire l'initiation d'un programme d'application de fongicides contre le blanc de la vigne causé par *Erysiphe necator*, une des maladies les plus communes des vignes cultivées au Québec (Carisse *et al.*, 2009) (Figure 2). Les infections primaires de cette maladie sont causées par les ascospores qui se déposent sur les jeunes feuilles à la suite d'une pluie. Six à 30 jours plus tard, selon les températures, des lésions se forment sur les feuilles infectées. De nombreuses conidies se développeront à leur tour dans ces lésions et seront disséminées par les vents pour causer les infections secondaires. Des épidémies sévères peuvent diminuer la vigueur des plants, leur rendement et la qualité des vins qui seront produits. Le modèle, développé sous forme de chiffrier électronique, utilise le cumul des degrés-jours à partir du stade 2-3 feuilles et permet d'initier un programme d'application de fongicides 30 à 40 jours plus tard que le programme conventionnel, tout en conservant un contrôle adéquat du mildiou.

TABEAU 2. QUELQUES MODÈLES BIOCLIMATIQUES POUR DIFFÉRENTES MALADIES ET CULTURES AUXQUELLES ELLES S'ATTAQUENT, DISPONIBLES DANS LE LOGICIEL CIPRA¹ DÉVELOPPÉ AU QUÉBEC

Culture	Maladie
Blé et orge	Fusariose de l'épi
Carotte	Brûlure alternarienne, brûlure cercosporéenne
Melon	Alternariose et anthracnose (MELCAST)
Oignon	Brûlure de la feuille
Pomme de terre	Mildiou
Pommier	Tavelure du pommier, brûlure bactérienne
Tomate	Alternariose, septoriose et anthracnose (TOMcast TM)
Vigne	Blanc de la vigne

1. Centre Informatique de Prévisions des Ravageurs en Agriculture
Source : Bourgeois *et al.*, 2008



FIGURE 2. BLANC DE LA VIGNE CAUSÉ PAR *ERYSIPHE NECTATOR* SUR GRAPPE ET SUR FEUILLE

Photos : A. Lefebvre, Agriculture et Agroalimentaire Canada

Des modèles plus complexes sont également utilisés dans d'autres cultures. Le logiciel RIMpro, développé en Europe, est évalué au Québec depuis plusieurs années pour la gestion des infections primaires de la tavelure du pommier (Phillion et Trapman, 2005) (Figure 3). Il sert à mieux cerner les infections et à cibler les traitements par rapport aux périodes importantes d'éjection d'ascospores. La température, l'humidité relative et les précipitations, entre autres, sont les paramètres météorologiques utilisés pour ces calculs.



FIGURE 3. TAVELURE SUR FEUILLES DE POMMIER

Photo : A. Lefebvre, Agriculture et Agroalimentaire Canada

Maladies et risques associés aux changements climatiques

Les changements climatiques auront certainement une influence sur l'apparition, la sévérité et la distribution géographique des maladies qui affectent les cultures. Des températures plus élevées et des précipitations plus importantes entraîneraient une propagation des maladies puisque le feuillage mouillé favorise la germination des spores et la prolifération des bactéries et des champignons. Toutefois, les scénarios climatiques publiés à ce jour par Ouranos ne mettent pas en évidence de changement significatif des précipitations estivales pour le sud du Québec. Par contre, tout comme pour les insectes, le développement des maladies sera perturbé et des maladies envahissantes ou exotiques pourraient faire leur apparition sous ces nouvelles conditions. Il est également possible que l'augmentation des concentrations de CO₂ à l'origine des changements climatiques modifie la structure biochimique des plantes hôtes et ait un effet indirect sur la sensibilité de celles-ci aux organismes pathogènes, mais cette hypothèse reste à prouver (Rosenzweig et Hillel, 1998).

L'augmentation des températures durant la saison hivernale pourrait avoir un impact important sur les agents pathogènes. En effet, des hivers plus doux permettraient à certains organismes pathogènes de survivre à l'hiver et augmenteraient l'inoculum présent au printemps suivant. Toutefois certaines maladies, telles les maladies hivernales des céréales, ont besoin du couvert de neige pour survivre et sa diminution attendue pour le sud du Québec pourrait être néfaste

à la survie de l'inoculum de ces maladies. De même, certaines maladies qui se développent à des températures estivales plutôt fraîches, telles les mildious, pourraient être défavorisées par le réchauffement climatique (Gagnon *et al.*, 2011).

Mauvaises herbes

Les mauvaises herbes dans les cultures

Les mauvaises herbes, aussi appelées plantes adventices, sont des plantes nuisibles qui poussent là où elles ne sont pas désirées et qui peuvent entraîner des effets négatifs sur le plan économique ou environnemental dans un champ cultivé. La concurrence exercée par les mauvaises herbes peut causer des pertes importantes de rendement surtout dans les circonstances suivantes : 1) elles émergent avant ou en même temps que la culture; 2) les infestations de mauvaises herbes sont fortes; 3) le sol est plutôt sec; 4) les mauvaises herbes à feuilles larges (dicotylédones) sont présentes et exercent une concurrence encore plus vive à l'égard de la culture (MAAARO, 2009). Dans un champ cultivé, les mauvaises herbes partagent le même niveau trophique que la culture. Elles entrent donc en compétition avec celle-ci pour l'eau, les éléments nutritifs et la lumière, réduisant ainsi la disponibilité de tous les éléments pour la culture et limitant sa croissance et sa productivité. L'utilisation d'herbicides, du pyrodés herbicide, du sarclage mécanique ou manuel et des travaux culturaux primaires illustre l'importance des efforts fournis pour lutter contre les mauvaises herbes qui affectent les cultures.

Le défi des modèles de germination et d'émergence des mauvaises herbes

Pour réprimer les mauvaises herbes, les producteurs font appel à tout un arsenal de produits chimiques, mais les efforts environnementaux pour réduire l'usage des herbicides exigent une optimisation du moment des applications et de la quantité de produit utilisée. La recherche de moyens non chimiques et durables est également importante. L'arrachage manuel requiert plus d'énergie au champ que tout autre travail agricole (Rosenzweig et Hillel, 1998). Pour répondre à ces défis, la prédiction, à l'aide de modèles, de la germination et de l'émergence des mauvaises herbes en relation avec les cultures et la météorologie présente un défi auquel s'intéressent de plus en plus de chercheurs (Grundy, 2003). Lorsqu'une application unique d'herbicide en postlevée est

effectuée, la précision du moment d'application est extrêmement importante afin de maximiser l'effet du produit et d'éviter des applications subséquentes. De la même façon, il est crucial de pouvoir prédire la quantité de mauvaises herbes qui émergeront dans une période de temps sous différentes conditions environnementales. Certains modèles de simulation de l'émergence des mauvaises herbes décrivent le processus d'émergence comme un événement unique alors que d'autres modèles décomposent ce processus en termes de perte de dormance, de germination et de prélevée (Grundy, 2003). Dans la majorité de ces approches cependant, la température et l'humidité du sol sont les principaux paramètres météorologiques utilisés.

Quoiqu'il en existe quelques-uns, les modèles de croissance des mauvaises herbes sont plutôt rares. L'évaluation quantitative des populations de mauvaises herbes est très difficile à réaliser. Le développement des plantes adventices varie selon l'espèce, la culture présente, le synchronisme d'émergence entre la culture et les mauvaises herbes, la présence de maladies et d'insectes ravageurs, la régie culturale employée et les facteurs abiotiques qui influencent la dynamique des populations. Malgré tout, il existe un certain nombre de modèles utilisés un peu partout dans le monde, mais bien peu ont été évalués sous les conditions climatiques du Québec (Bourgeois et Benoit, 2005). Deux modèles retiennent tout de même l'attention. Le premier est basé sur le cumul des degrés-jours, de la même façon que les modèles prévisionnels utilisés pour certains insectes et discutés précédemment. Dans ce modèle bioclimatique, on utilise les températures enregistrées dans une région pour prédire le développement végétatif de la petite herbe à poux (Benoit et Bourgeois, 2007) (Figure 4). Il a permis d'établir que la croissance de cette plante nuisible commence lorsque la température ambiante oscille autour de 5 °C et atteint son optimum autour de 31 °C. Au-delà de cet optimum, son taux de développement chute radicalement. D'après l'étude, il est estimé que la plantule produit une feuille tous les deux jours à une température moyenne de 18 °C.

Le deuxième modèle appliqué au Québec prédit l'émergence du chénopode blanc (Figure 5) dans des champs de maïs en relation avec le cumul des températures de l'air, dans différents types de sol (Leblanc *et al.*, 2004). Ce modèle tient compte non seulement de la texture du sol, mais aussi de la date

de semis. Dans cette étude, on estime que la température de base du chénopode augmente à mesure que la date de semis est retardée et que la texture du sol devient plus lourde, ce qui implique un changement dans les propriétés thermiques quand la texture du sol change. La validation du modèle a permis de prédire l'émergence de 80 % de la population; d'un point de vue pratique, les premières cohortes de chénopodes sont les plus critiques puisqu'elles ont le plus grand potentiel d'impact sur la culture. Ce modèle peut être considéré comme un outil fiable qui peut être utilisé pour prédire efficacement l'émergence du chénopode blanc dans des sols différents. Il a été développé et validé sous des conditions de champ où des populations naturelles de chénopode existaient.



FIGURE 4. JEUNES PLANTS D'HERBE À POUX (*AMBROSIA ARTEMISIFOLIA*) (A) ET PLANTS ADULTES EN FLEUR (B)

Photos : D.L. Benoit, Agriculture et Agroalimentaire Canada



FIGURE 5. PLANT DE CHÉNOPODE BLANC (*CHENOPODIUM ALBUM*)

Photo : D.L. Benoit, Agriculture et Agroalimentaire Canada

Mauvaises herbes et risques associés aux changements climatiques

Avant de mentionner les effets associés aux changements climatiques pour les mauvaises herbes, il importe de fournir un bref aperçu des types de plantes. Ces dernières peuvent être classées selon qu'elles sont de type C3, C4 ou CAM. La différence apparaît au moment de la photosynthèse (processus utilisé par les plantes pour transformer l'énergie lumineuse en énergie chimique nécessaire à la plante) selon le type d'enzyme que la plante utilise pour fixer le CO₂ présent dans l'air. Ainsi, la première molécule organique produite par la photosynthèse a 3 atomes de carbone (C3) ou 4 atomes de carbone (C4). Les plantes de type C3 représentent la plupart des plantes dites de pays tempérés (blé, orge, soya, pomme de terre, tomate, betterave, etc.) alors que les plantes C4 sont les graminées d'origine tropicale comme le maïs, la canne à sucre et le sorgho. Quant aux plantes CAM, il s'agit d'un mode de photosynthèse spécialisé que l'on rencontre généralement chez les plantes vivant sous des conditions arides, comme les orchidées et les plantes grasses, et qui leur permet de limiter leurs pertes d'eau. Les plantes C4 fixent plus de CO₂ que les plantes C3, donc leur production de biomasse est plus importante.

Tout comme les cultures, les mauvaises herbes sont des producteurs primaires et elles seront directement influencées autant par les changements du climat que par les changements des niveaux de CO₂ (Rosenzweig et Hillel, 1998). Des expériences ont été menées

pour tester l'effet de l'augmentation de la concentration en CO_2 sur les mauvaises herbes, tant de type C3 que de type C4. Il existe une grande variabilité dans la réponse des plantes maïs, généralement, les plantes C3 tendent à avoir une réponse plus importante que les plantes C4 en produisant plus de biomasse. Cependant, la réponse peut différer selon les concentrations de CO_2 , ce qui amène différentes prédictions selon les scénarios climatiques. En Amérique du Nord, 9 des 15 espèces de mauvaises herbes les plus problématiques sont de type C3. Plusieurs cultures de type C4, comme le maïs ou le millet, seraient donc plus vulnérables aux mauvaises herbes sous des conditions de concentration de CO_2 plus élevées, du fait d'une compétition accrue. Une augmentation des concentrations de CO_2 atmosphérique pourrait également induire un accroissement de la production de pollen, aggravant les effets néfastes sur la santé humaine dans le cas des mauvaises herbes allergènes, telle l'herbe à poux (Gagnon *et al.*, 2011).

Par ailleurs, le climat peut exercer une très forte influence sur la distribution géographique des mauvaises herbes autant que des cultures, entraînant ainsi des changements au niveau de l'écosystème au complet (Rosenzweig et Hillel, 1998). Une augmentation des températures et un régime hydrologique plus sec, ce qui risque de survenir dans les régions continentales, pourraient favoriser les mauvaises herbes et les autres plantes de type C4. Puisque ces dernières ont évolué originellement dans les régions subtropicales semi-arides, elles sont fondamentalement mieux adaptées à ce type de conditions.

CONCLUSION

Comme on peut le constater, il existe des modèles bioclimatiques pour prédire autant le développement des insectes que des maladies et la croissance des plantes adventices. Il importe toutefois de souligner l'importance de la qualité des données météorologiques utilisées comme intrants dans tous ces modèles. De plus, les prédictions d'un modèle seront d'autant plus précises que ce dernier aura été évalué dans la région où il est utilisé. La validation d'un modèle, ou son évaluation, représente plus qu'une simple vérification de la concordance entre les résultats prédits et l'observation. L'évaluation est aussi cruciale que le processus de construction du modèle. Elle implique la comparaison des résultats du modèle avec des données indépendantes, la détermination des conditions dans lesquelles le modèle peut être

utilisé, l'étendue de l'erreur de prédiction ainsi que l'énoncé des mises en garde concernant l'utilisation du modèle (Freckleton et Stephens, 2008).

Les changements climatiques auront une influence certaine sur les cultures et leurs ennemis. Quoiqu'on ne puisse prédire avec certitude les effets spécifiques qui affecteront l'agriculture au Québec, nul doute que les producteurs devront se préparer à affronter ces changements. Dans ce contexte de climat variable et en évolution, les modèles prévisionnels font partie des outils à leur disposition pour gérer les ennemis des cultures.

Par ailleurs, d'autres outils leur sont facilement accessibles, notamment le Réseau d'avertissements phytosanitaires (RAP) et le Laboratoire de diagnostic en phytoprotection du ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ), ou encore le dépistage effectué par plusieurs clubs-conseils. Ces derniers effectuent la surveillance du territoire québécois et sont en mesure d'informer les producteurs et autres intervenants du secteur agricole et agroalimentaire de la présence et de l'évolution des ennemis des cultures et des stratégies d'intervention les plus appropriées.

Enfin, les changements climatiques font l'objet de recherches très actives et d'un intérêt croissant pour tous les intervenants du milieu. Mentionnons, à titre d'exemple, l'initiative d'Ouranos, du MAPAQ et d'Agriculture et Agroalimentaire Canada pour le 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*, dont le document synthèse est cité en référence (Gagnon *et al.*, 2011).

RÉFÉRENCES

- Benoit, D.L. et G. Bourgeois. 2007. *Un modèle bioclimatique pour prédire le développement végétatif de l'herbe à poux*. Le Flash Herbe à poux, 8(3): 1-2.
- Bourgeois, G. et D.L. Benoit. 2005. *Predicting early phenological stages of six major weeds*. Présenté à la réunion annuelle de la CWSS/SCM, Niagara Falls, Ont., 27 novembre - 1 décembre.
- Bourgeois, G., G. Boivin et A.J. Rhéaume. 2009. *Mise à jour des modèles de prévision pour le charançon et la mouche de la carotte*. Résumé de conférence, Journées horticoles 2008, Saint-Rémi.

- Bourgeois, G., D. Plouffe, G. Chouinard, N. Beaudry, D. Choquette, O. Carisse et J. DeEll. 2008. *The Apple CIPRA Network in Canada: Using Real-Time Weather Information to Forecast Apple Phenology, Insects, Diseases and Physiological Disorders*. Acta Hort. 803, ISHS 2008: 29-34.
- Carisse, O., R. Bacon, A. Lefebvre et K. Lessard. 2009. *A degree-day model to initiate fungicide spray programs for management of grape powdery mildew [Erysiphe necator]*. Can. J. Plant Pathol. 31: 186-194.
- DesJarlais, C., M. Allard, D. Bélanger, A. Blondlot, A. Bouffard, A. Bourque, D. Chaumont, P. Gosselin, D. Houle, C. Larrivée, N. Lease, A.T. Pham, R. Roy, J.-P. Savard, R. Turcotte et C. Villeneuve. 2010. *Savoir s'adapter aux changements climatiques*. Ouranos, Montréal. 128 p.
- Freckleton, R.P. et P.A. Stephens. 2009. *Predictive models of weed population dynamics*. Weed Research 49: 225-232.
- Gagnon, A.E., M. Roy et A. Roy. 2011. *Impacts directs et indirects des changements climatiques sur les ennemis des cultures*. Document synthèse créé 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 ». 80 p. http://www.agrireseau.qc.ca/lab/documents/Revue%20de%20litt%c3%a9rature%20CC_phyto.pdf
- Grundy, A.C. 2003. *Predicting weed emergence: a review of approaches and future challenges*. Weed Research 43: 1-11.
- Leblanc, M.L., D.C. Cloutier, K.A. Stewart et C. Hamel. 2004. *Calibration and validation of a common lambsquarters (Chenopodium album) seedling emergence model*. Weed Science 52(1): 61-66.
- MAAARO. 2009. *Guide agronomique des grandes cultures*. Chapitre 12 - Lutte contre les mauvaises herbes. Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Affaires rurales, Ontario, Publication 811F.
- Philion, V. et M. Trapman. 2005. *Validation du logiciel RIMpro pour faciliter la gestion des infections primaires de la tavelure du pommier*. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement inc. (IRDA), fiche synthèse.
- Régnière, J. 2009. *Prédire la répartition continentale des insectes à partir de leur physiologie. Adaptation au changement climatique*. Unasyva No. 231/232, Vol. 60, 2009/1-2. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- Rosenzweig, C. et D. Hillel. 1998. *Effects on Weeds, Insects, and Diseases*. Dans : Climate Change and the Global Harvest: Potential Impacts of the Greenhouse Effect on Agriculture. Chapitre 4, p.101-122.
- Roy, M. 2002. *Impact potentiel des changements climatiques sur l'entomofaune agricole au Québec*. Résumé de conférence, 65^e Congrès de l'Ordre des agronomes du Québec, « Changements climatiques : comprendre pour mieux agir ».