

Modèles bioclimatiques pour la prédiction de la phénologie, de la croissance, du rendement et de la qualité des cultures

Marie-Pier Lepage, M.Sc.
Gaétan Bourgeois, Ph.D.



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° PAGR0104

ISBN 978-2-7649-0237-0

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives Canada, 2012

Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2012

RÉDACTION

Marie-Pier Lepage, M.Sc., biologiste, Saint-Jean-sur-Richelieu

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

COLLABORATION ET RÉVISION

Gilles Bélanger, D.Sc., Écophysiologie et agronomie, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Québec

Danielle Choquette, B.Sc., assistante de recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Saint-Jean-sur-Richelieu

Isabelle Duchesne, Ph.D., agente de recherche, La Financière agricole du Québec, Saint-Romuald

Guillaume Jégo, D.Sc., Modélisation de l'agrosystème, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Québec

Élizabeth Pattey, Ph.D., chercheure scientifique, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa

Dominique Plouffe, B.Sc., assistante de recherche, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Saint-Jean-sur-Richelieu

Gilles Tremblay, M.Sc., agronome, Régie des cultures, Centre de recherche sur les grains (CÉROM), Saint-Mathieu-de-Beloeil

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

F. Lambert (La Financière agricole du Québec), M. Lachapelle (Agriculture et Agroalimentaire Canada)

Page couverture : S. Hindson (Agriculture et Agroalimentaire Canada)

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	1
Importance de la phénologie, de la croissance et du rendement des cultures dans la prise de décisions à la ferme	1
Importance du suivi des cultures à l'échelle régionale	1
Importance des modèles bioclimatiques en agriculture : recherche scientifique et applications.....	1
PHÉNOLOGIE.....	1
Description et applications pour l'agriculture	1
Prédictions fondées sur les cumuls thermiques.....	2
Modélisation dynamique de l'évolution phénologique	3
CROISSANCE ET RENDEMENT	4
Description et applications pour l'agriculture	4
Prédictions à partir de modèles empiriques.....	5
Simulateurs dynamiques de croissance et de rendement des cultures	5
QUALITÉ DE LA RÉCOLTE	7
Description et applications pour l'agriculture	7
Valeur nutritive.....	7
Prédiction des risques de montaison.....	8
Prédiction des risques de désordres physiologiques au champ et en entrepôt	8
CONCLUSION	9
RÉFÉRENCES	10

INTRODUCTION

Importance de la phénologie, de la croissance et du rendement des cultures dans la prise de décisions à la ferme

L'exploitation de toute ressource végétale amène inévitablement les producteurs agricoles à prendre de nombreuses décisions à la ferme. Afin de pratiquer une gestion efficace, les intervenants en agriculture peuvent s'appuyer sur plusieurs notions liées à la physiologie des cultures pour les aider à sélectionner les meilleures opportunités qui s'offrent à eux. Parmi ces notions, la phénologie (étude des relations entre le développement des plantes et les facteurs du milieu) permet de mieux cibler les interventions au champ en déterminant les stades de développement critiques selon divers paramètres météorologiques. De plus, étant donné que chaque culture possède des particularités spécifiques en termes de besoins nutritionnels ou de temps de développement, une bonne connaissance des notions de croissance est essentielle afin de comprendre les exigences de la culture au champ et de planifier les périodes de semis et de récolte. Finalement, l'évaluation et la prédiction du rendement, c'est-à-dire la quantité récoltée par surface exploitée, ainsi que la qualité de la récolte permettent d'orienter les producteurs dans leurs décisions concernant, par exemple, le choix des cultivars, les pratiques culturales et les dates de récolte.

Importance du suivi des cultures à l'échelle régionale

Les espèces végétales cultivées sont influencées par les conditions environnementales et les caractéristiques spécifiques de leur milieu de croissance. L'apport en eau sous forme de précipitations ou par l'irrigation, la composition et le type de sol n'en sont que quelques exemples. À l'échelle d'une parcelle, les producteurs agricoles peuvent évaluer les besoins nutritionnels et hydriques spécifiques d'un site ainsi que les soins particuliers à fournir à la culture en tenant compte des particularités du milieu. Il est aussi pertinent d'examiner ces caractéristiques sur une plus grande superficie, soit à l'échelle d'une région. La demande en eau peut être estimée pour une région donnée afin d'évaluer les besoins en irrigation selon les précipitations reçues. De plus, le suivi des cultures permet d'obtenir une vue d'ensemble des pertes et des gains survenus sur le territoire. Il est également possible d'évaluer l'impact des surfaces cultivées sur l'environnement et ainsi minimiser les conséquences négatives de la production agricole sur le milieu environnant.

Importance des modèles bioclimatiques en agriculture : recherche scientifique et applications

Afin de faciliter la prise de décision au champ, les intervenants agricoles bénéficient de plusieurs outils, dont les modèles bioclimatiques permettant la prédiction de la phénologie, de la croissance, du rendement et, dans certains cas, de la qualité de la récolte. Ces modèles établissent des liens entre les conditions météorologiques et les processus biologiques à l'aide de relations mathématiques. Ils sont habituellement fondés sur plusieurs années d'observations au champ et en milieu contrôlés (cabinets de croissance, serres) afin de bien comprendre les particularités de certains processus physiologiques. Ils sont surtout utilisés en recherche scientifique, notamment dans les études sur les impacts de la variabilité et des changements climatiques et les études sur les interactions entre les plantes, le sol et l'atmosphère. Les modèles peuvent également aider les chercheurs à mieux comprendre les processus physiologiques ou encore leur permettre de prédire les rendements de cultures sélectionnées à l'échelle d'une parcelle ou d'une région. Au fil des années, l'ensemble de ces études scientifiques ont permis d'améliorer des modèles existants et d'en développer de nouveaux plus performants, souvent plus complexes, qui reflètent encore mieux la réalité observée. Aujourd'hui, ils sont utilisés par les conseillers et intervenants agricoles comme outils d'aide à la décision dans le cadre de programmes de gestion intégrée des cultures.

L'objectif de ce feuillet est de présenter les modèles bioclimatiques élaborés en agriculture pour évaluer et prédire la phénologie, la croissance, le rendement et la qualité des cultures.

PHÉNOLOGIE

Description et applications pour l'agriculture

Le terme « phénologie » décrit l'apparition de stades importants dans le développement d'une espèce végétale. Cette phénologie est prédéterminée par son bagage génétique et modulée par les conditions de l'environnement. La vitesse de l'apparition des différents stades de développement est influencée par les conditions météorologiques ambiantes, la photopériode et la conduite de la culture. Chaque stade représente une phase de développement spécifique marquant les épisodes phénologiques d'une culture, tels que la germination, la levée ou l'élongation de

l'hypocotyle, l'apparition des feuilles, la floraison, la fructification, la maturité, etc.

Afin de pouvoir décrire mathématiquement les stades phénologiques d'une culture ou d'un groupe de cultures, plusieurs échelles de référence ont été développées. L'échelle « BBCH » (*Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt et CHemische Industrie*, se traduisant par Centre fédéral de recherche biologique pour l'agriculture et l'industrie chimique), développée en Allemagne, en est un exemple. Elle utilise des codes de 0 à 99 pour identifier les stades phénologiques, « 00 » correspondant au semis et « 99 » au produit après récolte (Meier, 2001). Les stades principaux sont représentés par un premier chiffre (Tableau 1) et les stades secondaires par un second. Par exemple, le développement des feuilles correspond au stade principal 1; le stade « 10 » identifie l'étalement des cotylédons, le stade « 11 » l'apparition de la première vraie feuille sur la tige principale, le stade « 12 » la deuxième feuille, le stade « 13 » la troisième, et ainsi de suite. L'élaboration de l'échelle BBCH a été inspirée de celle créée précédemment par Zadoks *et al.* (1974) pour les céréales et qui est encore couramment utilisée. En effectuant le suivi de la phénologie d'une culture au cours de la saison de croissance, les producteurs agricoles peuvent mieux cibler les stades précis où les besoins nutritionnels nécessitent l'ajout d'engrais ou encore évaluer si des interventions phytosanitaires à des stades spécifiques sont nécessaires.

Prédictions fondées sur les cumuls thermiques

Les cumuls thermiques, comme les degrés-jours (Figure 1) et les unités thermiques maïs (UTM), sont des indices agrométéorologiques très utilisés par le secteur agricole pour évaluer le développement des végétaux et des insectes durant la saison de croissance (Lepage *et al.*, 2012). Ils sont fondés sur les caractéristiques spécifiques du développement des espèces, en se référant à une température de base (ou seuil inférieur) au-dessus de laquelle le développement s'effectue en réponse à la température de l'air. Les cumuls thermiques sont utilisés afin de prédire l'arrivée de stades phénologiques précis durant la saison de croissance. Par exemple, les stades phénologiques de la pomme McIntosh, énumérés au tableau 2, sont associés à un cumul de degrés-jours. Selon ces données, l'atteinte du stade pleine floraison nécessite 255 degrés-jours (base 5 °C).

Les UTM associées aux différents hybrides de maïs représentent leurs exigences thermiques pour atteindre la maturité. Les producteurs doivent préférentiellement opter pour des hybrides exigeant moins d'UTM que celles disponibles dans leur région afin de s'assurer que leur culture parvienne à maturité ou sélectionner un hybride requérant moins d'UTM en cas de retard du semis.

TABEAU 1. LES PRINCIPAUX STADES DE DÉVELOPPEMENT SELON L'ÉCHELLE BBCH

Stade	Description
0	Germination/levée/développement des bourgeons
1	Développement des feuilles (tige principale)
2	Formation des pousses secondaires/tallage
3	Élongation de la tige/formation de la rosette/développement des pousses (tige principale)
4	Développement des parties végétatives de récolte ou des organes de multiplication végétative/développement des organes de reproduction sexuée, gonflement de l'épi ou de la panicule (tige principale)
5	Apparition de l'inflorescence (tige principale)/épiaison
6	Floraison (tige principale)
7	Développement des fruits
8	Maturation des fruits ou graines
9	Sénescence et mort ou début de la période de dormance

Source : Meier, 2001

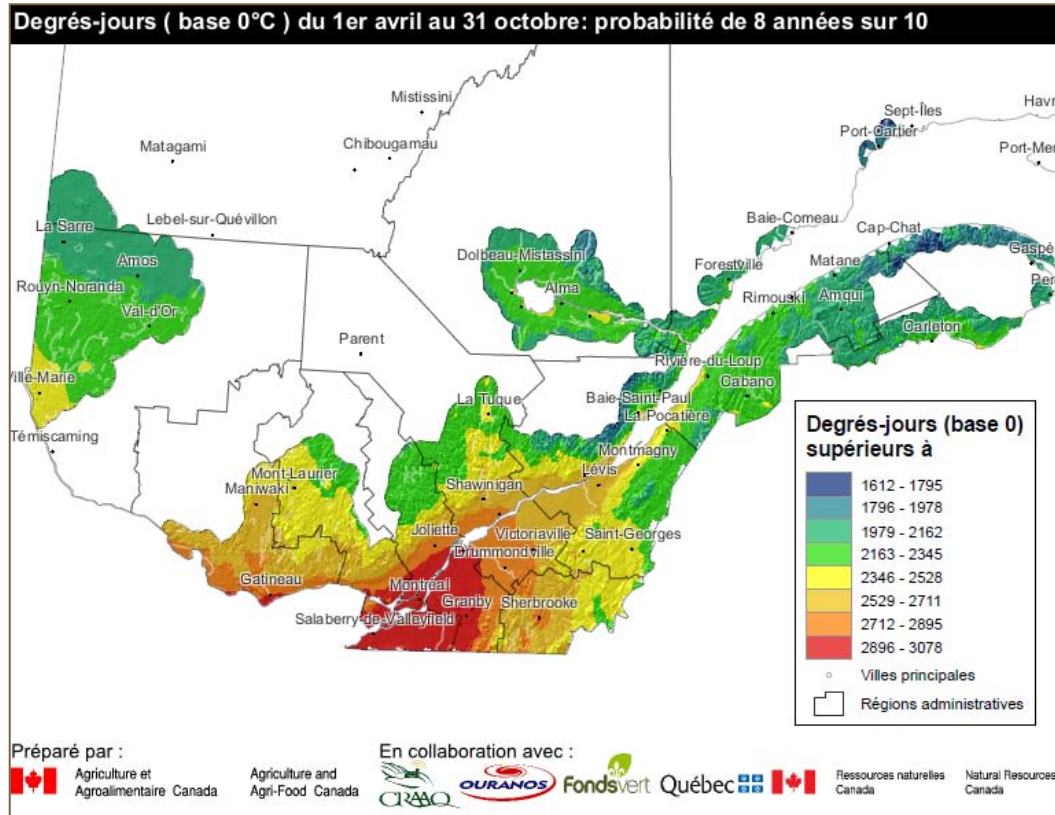


FIGURE 1. CARTE DES CUMULS DE DEGRÉS-JOURS (BASE 0 °C) ENTRE LE 1^{ER} AVRIL ET LE 31 OCTOBRE POUR LE QUÉBEC, À UN SEUIL DE PROBABILITÉ DE 80 % (8 ANNÉES SUR 10), POUR LA PÉRIODE 1979-2008

Source : Atlas agroclimatique du Québec, 2012

TABEAU 2. DEGRÉS-JOURS (BASE 5 °C) ACCUMULÉS POUR CHAQUE SEUIL DE DÉVELOPPEMENT DE LA POMME MCINTOSH (DÉBUT DU CUMUL : 1^{ER} MARS, MÉTHODE DE CALCUL : SINUS SIMPLE)

Stade phénologique	Degrés-jours (base 5 °C)
Débourrement	79
Débourrement avancé	116
Prébouton rose	158
Bouton rose	197
Bouton rose avancé	224
Pleine floraison	255
Calice	313
Nouaison	371

Source : Bourgeois et al., 2008

Modélisation dynamique de l'évolution phénologique

La phénologie des végétaux varie en fonction de plusieurs facteurs incluant les particularités spéci-

ifiques de l'espèce et de ses variétés, la conduite de la culture, les conditions météorologiques, les caractéristiques du sol et la photopériode. Ces facteurs agissent différemment sur la phénologie selon la phase de développement de la culture. Par exemple, les caractéristiques du sol ont surtout un impact durant la phase semis-émergence des cultures annuelles, lors de la germination de la semence. Par contre, la température de l'air et la photopériode influenceront davantage les phases de développement subséquentes. Lorsque les cumuls thermiques sont utilisés pour prédire la phénologie d'une culture, il est important de savoir que ces cumuls sont fondés uniquement sur la température, ce qui rend difficile l'intégration des autres facteurs agissant sur la phénologie, tels que la photopériode ou l'eau disponible pour les plantes.

La modélisation dynamique de la phénologie d'une espèce végétale consiste à quantifier, à l'aide d'équations mathématiques, son évolution en fonction de la conduite de la culture et des conditions météorologiques. Les modèles phénologiques

dynamiques permettent la prédiction de l'évolution des stades phénologiques chaque jour, plutôt que la prédiction d'un seul stade à un moment donné comme le propose l'approche des cumuls thermiques. De plus, ils intègrent les fonctions de réponse spécifiques de la culture à différents facteurs, tels la température de l'air ou du sol, la photopériode ou les stades phénologiques précédents, et ce, pour chaque phase majeure de développement, soit les phases semis-émergence (cultures annuelles) ou débourrement (cultures vivaces), foliaire et reproductive (Figure 2).

Pour bâtir un tel modèle, il est nécessaire d'observer au préalable les stades de développement pendant plusieurs années dans des régions présentant des particularités différentes et d'avoir accès aux paramètres météorologiques de chaque région étudiée. Une fois le modèle élaboré, il suffit d'y intégrer les données météorologiques provenant de l'emplacement d'une culture afin d'obtenir la prédiction des stades phénologiques pour cette culture.

Ce type de modèle peut servir à mieux planifier les semis et les récoltes, les interventions phytosanitaires et le suivi au champ. On l'utilise pour la gestion des semis, des transplants et des récoltes dans les cultures comme la laitue pommée et le brocoli, entre autres.

Pour ces cultures, la prédiction d'un certain stade phénologique est primordiale pour une récolte optimale et pour répondre aux besoins du marché pendant la saison de croissance. Une meilleure gestion de l'eau peut être réalisée en ajustant les périodes d'irrigation selon le stade de développement ou en évaluant le drainage en période critique. La modélisation simultanée de la phénologie des cultures et de leurs bioagresseurs peut être utilisée dans la planification des interventions phytosanitaires, en coordonnant l'atteinte de stades vulnérables à l'attaque des ravageurs et le moment d'intervention. Les stratégies de dépistage, dont l'installation de pièges et la planification de visites au champ, peuvent être mieux coordonnées. Citons, à titre d'exemple, le secteur pomicole au Québec, où on retrouve une multitude de ravageurs du pommier à divers stades phénologiques; le tout peut être représenté et géré grâce aux modèles bioclimatiques (Plouffe et Bourgeois, 2012).

CROISSANCE ET RENDEMENT

Description et applications pour l'agriculture

La croissance d'une culture se définit en termes d'évolution de la biomasse, tant aérienne (feuillage, grains, fruits) que souterraine (racines, bulbes,

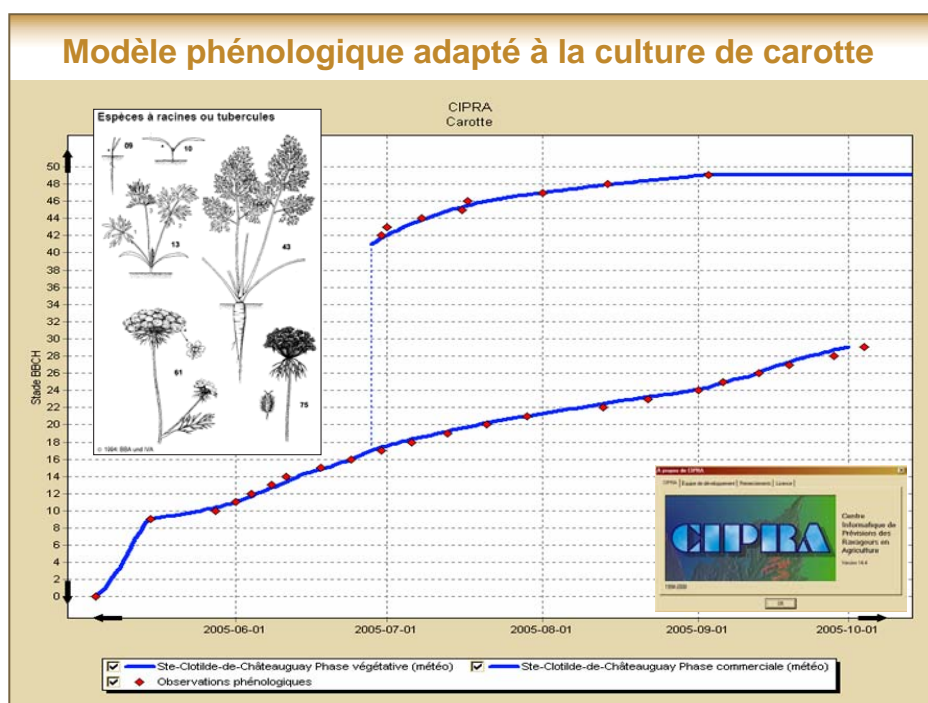


FIGURE 2. PRÉDICTION DES STADES PHÉNOLOGIQUES (BBCH) DE LA CULTURE DE CAROTTE À L'AIDE D'UN MODÈLE DE SIMULATION DYNAMIQUE INTÉGRÉ DANS LE LOGICIEL CIPRA

Source : G. Bourgeois, Agriculture et Agroalimentaire Canada

tubercules). Cette croissance implique une série d'interactions entre la plante, le sol et l'atmosphère (conditions météorologiques). Dès que les semences sont mises en terre, les conditions d'humidité et de température du sol contrôlent la vitesse de germination et de développement des plantules. Après la levée, la photosynthèse, la respiration, l'évapotranspiration, l'absorption d'eau et d'éléments nutritifs déterminent les conditions de la croissance. Ces processus physiologiques sont influencés par la radiation solaire, la température de l'air, les précipitations et la vitesse du vent au cours de la croissance végétative et reproductive de la culture.

Le rendement se définit essentiellement en termes de la section récoltée du plant : feuilles de laitue, grains de blé ou de maïs, feuillage des plantes fourragères, racines de carotte, bulbes d'oignon, fruits du pommier, etc. Il varie en fonction d'un grand nombre de facteurs, dont le cultivar utilisé, les pratiques culturales employées et les conditions météorologiques durant la saison de croissance.

Il existe deux principaux types de modèles pour prédire la croissance ou le rendement des cultures, soit les modèles empiriques et les simulateurs dynamiques de croissance et de rendement. Les modèles empiriques ont la particularité d'être fondés sur des observations ou des mesures au champ plutôt qu'axés sur des concepts théoriques. Ils sont orientés davantage vers l'application et sont surtout utilisés par les intervenants du milieu agricole. Ce type de modèle fournit une prédiction du rendement pour une région donnée et cette prédiction est rarement transposable à d'autres régions. Quant aux simulateurs de croissance et de rendement, ils sont axés sur la compréhension des processus physiologiques de la culture. Ils prédisent l'évolution de la biomasse et de l'azote des plantes ainsi que la consommation d'eau au cours de la saison de croissance en fonction de la gestion du champ. Ils fournissent le rendement et le contenu en protéines des grains au moment de la récolte et, finalement, des bilans environnementaux. Ces simulateurs doivent être calibrés, souvent à l'aide de données expérimentales, pour être utilisés dans une région donnée. Ils sont employés dans le cadre d'études scientifiques plus globales et sont très peu utilisés par les intervenants du milieu agricole.

Prédictions à partir de modèles empiriques

Les modèles empiriques sont fondés sur des résultats d'expériences et des observations ainsi que sur des

relations statistiques entre des variables dépendantes (exemples : floraison, rendement) et indépendantes (exemples : degrés-jours, gel, régime hydrique). Leur principal objectif est d'estimer ou de prédire la variable dépendante à l'étude. Ils sont surtout élaborés à l'aide de régressions statistiques simples ou multiples et peuvent être utilisés, entre autres, pour estimer le rendement des cultures. D'ailleurs, dans le secteur de l'assurance récolte pour le foin au Québec, de tels modèles servent à estimer les pertes potentielles de productivité en se basant sur le rendement escompté et les références historiques (Duchesne, 2010). Ils peuvent aussi être combinés avec des informations extraites de la télédétection pour prédire la biomasse et le rendement à partir d'un modèle simple d'efficacité d'utilisation de la radiation solaire (Monteith, 1977) modulé par des indicateurs de stress (hydriques, azotés, etc.). Cette approche a été testée avec succès pour le maïs (Liu *et al.*, 2010).

Simulateurs dynamiques de croissance et de rendement des cultures

Les simulateurs dynamiques de croissance et de rendement des cultures sont surtout conçus à partir des connaissances des processus biologiques ou physiologiques des cultures (Figure 3) et sont validés avec des observations en parcelles expérimentales. Des équations mathématiques représentant ces processus et le taux d'accroissement des structures végétales (exemples : feuilles, tiges et grains) en fonction de diverses variables indépendantes, telles la température, les précipitations et la radiation solaire, sont utilisées pour bâtir ce type de modèle. Les propriétés du sol y sont intégrées de même que les particularités spécifiques de la culture et de ses variétés, la conduite de la culture et les conditions météorologiques. Différents modules peuvent être ajoutés afin de caractériser divers processus reliés au sol, tels que la minéralisation, le lessivage, la dénitrification et la disponibilité de l'eau.

Plusieurs simulateurs de croissance et de rendement ont été élaborés dans différents pays. Citons, à titre d'exemples, le modèle STICS (*Simulateur muTIdisciplinaire pour les Cultures Standard*) élaboré en France (Brisson *et al.*, 1998), le modèle APSIM (*Agricultural Production Systems SIMulator*) en Australie (McCown *et al.*, 1996) ainsi que les modèles DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*) (Jones *et al.*, 2003) et CropSyst (Stockle *et al.*, 2003) aux États-Unis (Tableau 3). De nombreux autres modèles ont été développés pour des cultures spécifiques. Bien

que ces modèles proviennent de l'extérieur du Canada, il est possible, dans une certaine mesure, de les adapter aux conditions spécifiques de nos régions agricoles (Jégo *et al.*, 2010 et 2011). Le modèle STICS a la capacité d'utiliser l'indice de surface foliaire extraite des images de télédétection pour réinitialiser certains paramètres du modèle, par exemple la date et la densité de semis, l'humidité du sol à la capacité au champ (Figure 3). Des travaux sont en cours pour tester, à l'échelle locale et régionale, la performance de cette approche pour prédire la biomasse et le rendement du maïs, du soja et du blé de printemps (Pattey, communication personnelle).

D'autres simulateurs, comme le modèle EPIC (*Erosion Productivity Impact Calculator*) (Williams *et al.*, 1990), sont conçus pour modéliser l'érosion des sols

et prédire la quantité de biomasse de plusieurs cultures selon les conditions de la culture, du sol et de la météorologie.

Il faut noter que la plupart de ces simulateurs ont été développés pour fonctionner sur des unités de simulation homogènes en termes de plante, de sol et de conduite de la culture, ce qui correspond généralement à une parcelle agricole. L'utilisation de ces simulateurs à une échelle régionale peut s'avérer difficile lorsque les données d'entrée nécessaires à l'utilisation du modèle ne sont pas facilement accessibles (exemples : conditions météorologiques, propriétés des sols ou conduite de la culture).

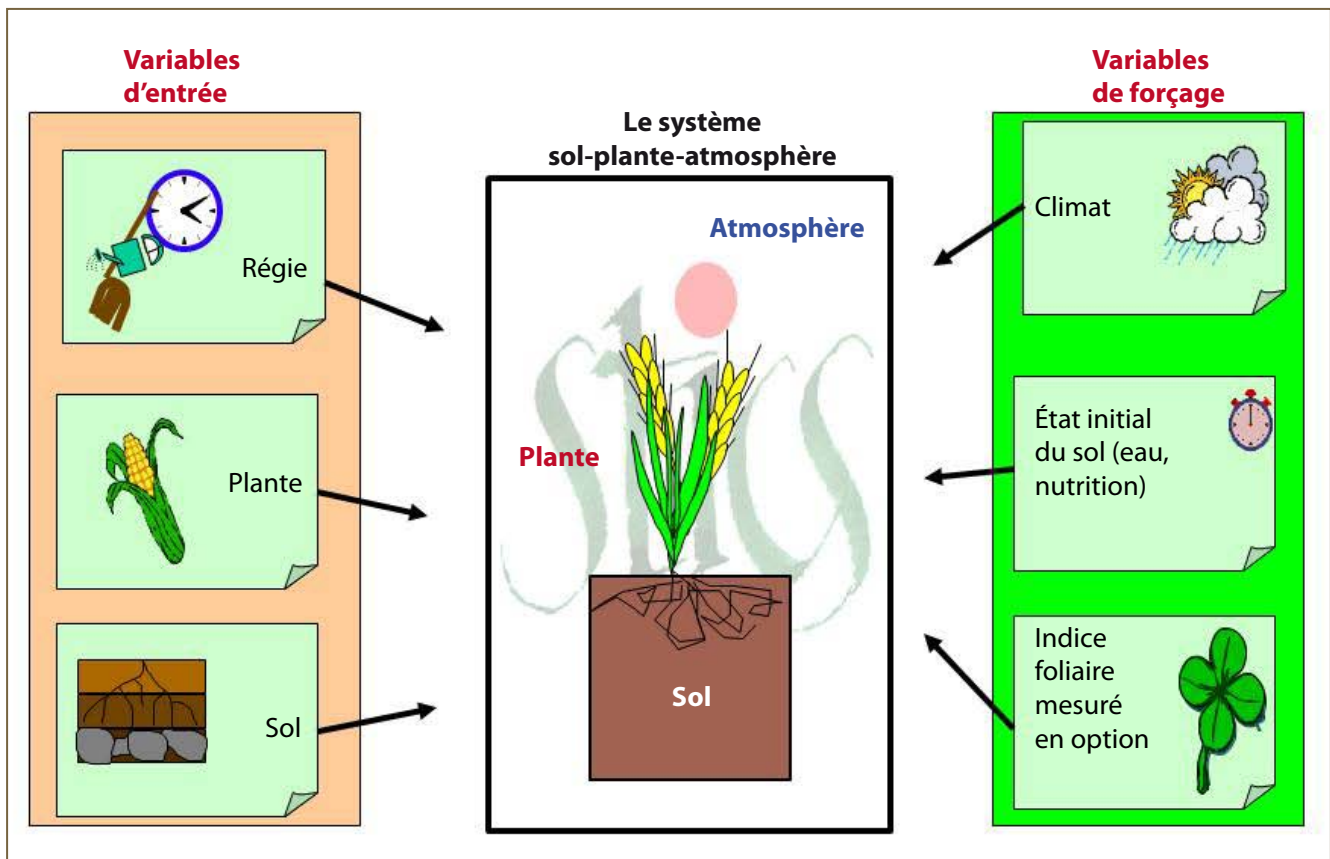


FIGURE 3. REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DU MODÈLE STICS

Source : Agriculture et Agroalimentaire Canada (adapté par Élisabeth Pattey de Brisson *et al.*, 1998)

TABLEAU 3. QUELQUES EXEMPLES DE SIMULATEURS DE CROISSANCE ET DE RENDEMENT (À JOUR EN JANVIER 2012)

Modèle	Cultures	Cultures évaluées au Québec	Utilisations potentielles	Références
APSIM (Australie)	Céréales, oléagineux, légumineuses, canne à sucre, chanvre, coton, luzerne et plantes fourragères	Aucune évaluation	<ul style="list-style-type: none"> - Prédiction du développement et de la croissance des cultures - Simulation des bilans hydriques, azotés et phosphorés - Aide à la prise de décisions à la ferme 	McCown <i>et al.</i> , 1996 Keating <i>et al.</i> , 2003
CropSyst (États-Unis)	Blé, maïs, lupin, orge, soja et sorgho	Aucune évaluation	<ul style="list-style-type: none"> - Prédiction du développement et de la croissance des cultures - Simulation des bilans hydriques et azotés - Conduite de la culture, de la fertilisation et de l'irrigation 	Stockle <i>et al.</i> , 1994 et 2003
CATIMO (Canada)	Graminées fourragères	Fléole des prés	<ul style="list-style-type: none"> - Prédiction de la croissance, du rendement et de la valeur nutritive 	Bonesmo et Bélanger, 2002a et 2002b Bonesmo <i>et al.</i> , 2005 Jing <i>et al.</i> , 2011
DSSAT (États-Unis)	Céréales, oléagineux, légumineuses, plantes fourragères, pomme de terre, riz et tomate	Aucune évaluation	<ul style="list-style-type: none"> - Prédiction du développement et de la croissance des cultures - Simulation des bilans hydriques et azotés - Conduite de la culture, de la fertilisation et de l'irrigation 	Jones <i>et al.</i> , 2003
EPIC	Céréales, oléagineux, légumineuses, plantes fourragères, légumes et petits fruits	Fléole des prés (prévu), luzerne (prévu)	<ul style="list-style-type: none"> - Prédiction de la croissance et du rendement des cultures - Modélisation de l'érosion - Prédiction de la biomasse 	Williams, 1983 Williams <i>et al.</i> , 1990
STICS (France)	Céréales, oléagineux, légumineuses, plantes fourragères, betterave sucrière, canne à sucre, carotte, fraiser, laitue, luzerne, pomme de terre et tomate	Blé de printemps, maïs-grain, soja, fléole des prés (en cours), luzerne (prévu)	<ul style="list-style-type: none"> - Prédiction du développement, de la croissance et du rendement des cultures - Simulation des bilans hydriques et azotés - Conduite de la culture, de la fertilisation et de l'irrigation 	Brisson <i>et al.</i> , 1998 et 2003

QUALITÉ DE LA RÉCOLTE

Description et applications pour l'agriculture

La qualité d'une culture peut être évaluée et quantifiée par différents critères associés à la culture au champ, au moment de la récolte ou à l'entreposage. Ces critères de qualité peuvent avoir trait à la valeur nutritive, à l'apparence visuelle ou à la présence de désordres physiologiques. Selon l'espèce et la variété choisies, les caractéristiques de qualité du produit au moment de la récolte s'imposent systématiquement afin d'optimiser le rendement économique. Pour obtenir un produit répondant aux critères de qualité de

la culture, les producteurs doivent prendre de nombreuses précautions et décisions quant à la conduite de la culture et de la récolte. Pour ce faire, en plus des simulateurs de croissance et de rendement, plusieurs outils sont disponibles, dont des modèles bioclimatiques de prédiction de la valeur nutritive, de la montaison et des risques de désordres physiologiques pour des cultures spécifiques.

Valeur nutritive

Les teneurs en protéines, fibres solubles ou insolubles, vitamines et minéraux sont quelques exemples de caractéristiques qui peuvent être mesurées pour

déterminer la qualité du produit à la récolte. Les producteurs de plantes fourragères se préoccupent grandement de la qualité, car elle est étroitement liée au niveau de production de viandes ou de lait des ruminants qui en consomment (Tremblay *et al.*, 2005). La valeur nutritive des plantes fourragères est fortement associée au rendement; les producteurs ont donc besoin de ces informations pour décider du moment idéal pour la récolte. Plusieurs facteurs météorologiques, telle la température de l'air, influencent directement ou indirectement la qualité d'une culture. Pour évaluer la valeur nutritive et le rendement de leurs cultures au champ, les producteurs peuvent utiliser des modèles de simulation. Le modèle CATIMO (*CANadian TIMothy MOdel*) prédit à la fois la valeur nutritive en termes de digestibilité et de concentration des composants de la paroi cellulaire et le rendement de la fléole des prés (Bonesmo et Bélanger, 2002a et 2002b) (Tableau 3). Il existe également un modèle pour estimer la perte de qualité des fourrages à partir de données météorologiques (Duchesne, 2010). Ce modèle établit un pourcentage de perte de qualité lié au retard de la coupe et à la pluie affectant ou détruisant le fourrage laissé au sol après la coupe.

Prédiction des risques de montaison

La montaison est associée à la phase reproductive des plantes, c'est-à-dire à l'initiation de la production de fleurs et de graines. Dans certaines cultures, telles que les légumes feuilles (laitue, céleri, épinard) et les légumes racines (carotte, radis), l'arrivée prématurée de ce stade de croissance peut provoquer une perte de productivité et de qualité puisque la période végétative, qui précède la montaison et

permet l'accumulation de réserves, est écourtée (Leblanc, 2008). Cette problématique survient sous l'action de divers éléments, dont les conditions météorologiques telles que la température et la photopériode qui peuvent provoquer une montaison hâtive (Jenni *et al.*, 2005; Jenni et Yan, 2009). L'utilisation d'un modèle de prédiction des risques de montaison pourrait s'avérer un moyen pratique pour aider les producteurs à adapter leurs pratiques culturales et à planifier efficacement leurs récoltes. En période de risque élevé, ils pourraient irriguer leurs parcelles afin d'en diminuer la température. Ils pourraient également se référer aux périodes problématiques récurrentes des dernières années afin de mieux gérer leur production.

Prédiction des risques de désordres physiologiques au champ et en entrepôt

Les désordres physiologiques sont des dérèglements ou troubles d'origine non pathologique affectant les végétaux. Ils peuvent être causés par différents facteurs tels que les conditions météorologiques et les carences nutritives. Ils sont parfois difficiles à identifier, car les symptômes de certains désordres physiologiques peuvent ressembler à ceux d'autres désordres causés par un ou plusieurs agents pathogènes. Les pertes associées dépendent, entre autres, du désordre lui-même, de l'espèce végétale affectée et de l'importance des dommages. Les symptômes de certains désordres apparaissent directement au champ, comme dans le cas de la montaison prématurée chez la laitue (Figure 4). Chez cette dernière, ce sont les températures élevées qui, sous nos conditions, sont le plus souvent à l'origine de ce désordre (Leblanc, 2008).



FIGURE 4. MONTAISON PRÉMATURÉE CHEZ LA LAITUE

Photo : F. Lambert, La Financière agricole du Québec

Au Québec, plusieurs variétés de pommes sont susceptibles aux désordres physiologiques en entrepôt, tel le brunissement vasculaire caractérisé par une décoloration des principaux faisceaux vasculaires et de la chair adjacente (Figure 5). Ce désordre réduit grandement la qualité des fruits, malgré le fait que ceux-ci ne présentent aucun symptôme extérieur apparent au moment de la récolte. Son développement est favorisé par des températures plus froides et des précipitations plus fréquentes que la normale durant le développement des fruits (Bourgeois *et al.*, 2011). Puisque le brunissement vasculaire est affecté par les conditions météorologiques, il est possible d'intégrer celles-ci à un modèle bioclimatique afin de prédire les risques d'apparition du désordre physiologique pour une saison donnée. Un tel modèle de prédiction des risques a été développé pour la variété McIntosh et implanté dans le logiciel CIPRA (Bourgeois *et al.*, 2008). Il est largement utilisé par les intervenants en pomiculture et a un impact majeur sur la gestion de l'entreposage de cette variété de pomme au Québec.



FIGURE 5. DÉSDORDRE PHYSIOLOGIQUE DU BRUNISSEMENT VASCULAIRE CHEZ LA VARIÉTÉ HONEYCRISP

Photo : M. Lachapelle, Agriculture et Agroalimentaire Canada

L'échaudure molle est un autre désordre physiologique de la pomme, observable par la coloration brunâtre de la pelure et de la chair adjacente (Figure 6). Son développement est également influencé par certaines variables météorologiques telles les précipitations, la température et l'humidité durant la croissance du fruit (Moran *et al.*, 2009).



FIGURE 6. DÉSDORDRE PHYSIOLOGIQUE DE L'ÉCHAUDURE MOLLE CHEZ LA VARIÉTÉ HONEYCRISP

Photo : M. Lachapelle, Agriculture et Agroalimentaire Canada

CONCLUSION

Les modèles bioclimatiques pour la prédiction de la phénologie, de la croissance, du rendement et de la qualité des cultures sont de précieux outils d'aide à la décision pour les intervenants en agriculture. Ils peuvent contribuer à la prise de décisions afin d'assurer une gestion efficace des productions agricoles. Divers aspects des cultures sont modélisés (phénologie, croissance, rendement et qualité) afin de représenter le plus efficacement possible la réalité observée. Ils sont développés pour représenter les différents systèmes et fournir des prédictions qui doivent toutefois être judicieusement utilisées.

Outre leur utilisation pour la gestion des cultures et des récoltes, ces modèles permettent d'étudier l'impact des changements climatiques sur ces cultures. Le développement de nouveaux modèles, l'amélioration des modèles existants ainsi que l'avancement des technologies et des connaissances permettront au secteur agricole de bénéficier d'outils encore plus performants dans le futur.

RÉFÉRENCES

Documents

Bonesmo, H. et G. Bélanger. 2002a. *Timothy yield and nutritive value by the CATIMO model: I. Growth and nitrogen*. *Agronomy Journal* 94: 337-345.

Bonesmo, H. et G. Bélanger. 2002b. *Timothy yield and nutritive value by the CATIMO model: II. Digestibility and fiber*. *Agronomy Journal* 94: 345-350.

Bonesmo, H., G. Bélanger, E. Charmley, R. Drapeau, D.B. McKenzie, R. Michaud, et G.F. Tremblay. 2005. *Timothy yield and nutritive value by the CATIMO model: III. Validation for eastern Canada*. *Agronomy Journal* 97: 32-40.

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 Horticulturae* 803: 29-34.

Bourgeois, G., D. Plouffe, J. DeEll et C. Pitiot. 2011. *Evaluation of a pre-harvest bioclimatic model for predicting the risk of low temperature disorders of stored apples in Canada and France*. IXth International Symposium on Modelling in Fruit Research and Orchard Management, Saint-Jean-sur-Richelieu, 19-23 juin.

Brisson, N., B. Mary, D. Ripoche, M.H. Jeuffroy, F. Ruget, B. Nicoulaud, P. Gate, F. Devienne-Baret, R. Antonioletti, C. Durr, G. Richard, N. Beaudoin, S. Recous, X. Tayot, D. Plenet, P. Cellier, J.M. Machet, J.M. Meynard et R. Delécolle. 1998. *STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn*. *Agronomie* 18: 311-346.

Brisson, N., C. Gary, E. Justes, R. Roche, B. Mary, D. Ripoche, D. Zimmer, J. Sierra, P. Bertuzzi, P. Burger, F. Bussière, Y.M. Cabidoche, P. Cellier, P. Debaeke, J.P. Gaudillère, C. Hénault, F. Maraux, B. Seguin, et H. Sinoquet. 2003. *An overview of the crop model STICS*. *European Journal of Agronomy* 18: 309-332.

Duchesne de Ortiz, I. 2010. *L'effet du climat sur les plantes fourragères au Québec : estimation des pertes par la modélisation*. Thèse, Université Laval, Québec. 247p.

Jégo, G., E. Pattey, G. Bourgeois, M.J. Morrison, C.F. Drury, N. Tremblay et G. Tremblay. 2010. *Calibration and performance evaluation of soybean and spring wheat cultivars using the STICS crop model in Eastern Canada*. *Field Crop Research* 117: 183-196.

Jégo, G., E. Pattey, G. Bourgeois, C.F. Drury et N. Tremblay. 2011. *Evaluation of the STICS crop growth model with maize cultivar parameters calibrated for Eastern Canada*. *Agronomy for Sustainable Development* 31: 557-570.

Jenni, S., I. Gamache, J.C. Côté et K.A. Stewart. 2005. *Early field detection of bolting in celery*. *HortTechnology* 15: 843-845.

Jenni, S. et W. Yan. 2009. *Genotype by environment interactions of heat stress disorder resistance in crisphead lettuce*. *Plant Breeding* 128: 374-380.

Jing, Q., G. Bélanger, V. Baron et H. Bonesmo. 2011. *Modeling the biomass and harvest index dynamics of timothy*. *Agronomy Journal* 103: 1397-1404.

Jones, J.W., G. Hoogenboom, C.H. Porter, K.J. Boote, W.D. Batchelor, L.A. Hunt, P.W. Wilkens, U. Singh, A.J. Gijsman et J.T. Ritchie. 2003. *The DSSAT cropping system model*. *European Journal of Agronomy* 18: 235-265.

Keating, B.A., P.S. Carberry, G.L. Hammer, M.E. Probert, M.J. Robertson, D. Holzworth, N.I. Huth, J.N.G. Hargreaves, H. Meinke, Z. Hochman, G. McLean, K. Verburg, V. Snow, J.P. Dimes, M. Silburn, E. Wang, S. Brown, K.L. Bristow, S. Asseng, S. Chapman, R.L. McCown, D.M. Freebairn, et C.J. Smith. 2003. *An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation*. *European Journal of Agronomy* 18: 267-288.

Leblanc, M. 2008. *La montaison prématurée des légumes*. Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec.

<http://www.agrireseau.qc.ca/legumes-champ/documents/La%20montaison%20pr%C3%A9matur%C3%A9e%20des%20l%C3%A9gumes.pdf> (consulté le 15 mai 2011).

Lepage, M.P., G. Bourgeois et G. Bélanger. 2012. *Indices agrométéorologiques pour l'aide à la décision dans un contexte de climat variable et en évolution*. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. 11 p.

Liu, J., E. Pattey, J.R. Miller, H. McNairn, A. Smith et B. Hu. 2010. *Mapping variability of above-ground dry biomass and yield of corn using multi-temporal hyperspectral and multispectral remote sensing data*. *Remote Sensing of Environment* 114: 1167-1177.

McCown, R.L., G.L. Hammer, J.N.G. Hargreaves, D.P. Holzworth et D.M. Freebairn. 1996. *APSIM: A novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research*. *Agricultural Systems* 50: 255-271.

Meier, U. 2001. *Stades phénologiques des mono- et dicotylédones cultivées BBCH Monographie, 2^e éd.*, Uwe Meier (réd.). Centre fédéral de recherches biologiques pour l'agriculture et les forêts. http://www.jki.bund.de/fileadmin/dam_uploads/veroeff/bbch/BBCH-Skala_franz%C3%B6sisch.pdf (consulté le 22 avril 2011)

Monteith, J.L. 1977. *Climate and the efficiency of crop production in Britain*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* 281: 277-294.

Moran, R.E., J.R. DeEll et W. Halteman. 2009. *Effects of preharvest precipitation, air temperature, and humidity on the occurrence of soft scald in Honeycrisp apples*. *HortScience* 44: 1645-1647.

Plouffe, D. et G. Bourgeois. 2012. *Modèles bioclimatiques pour la prévision des risques associés aux ennemis des cultures dans un contexte de climat variable et en évolution*. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. 9 p.

Stockle C.O., S.A. Martin, et G.S. Campbell. 1994. *CropSyst, a cropping systems simulation model: water/nitrogen budgets and crop yield*. *Agricultural Systems* 46: 335-359.

Stockle, C.O., M. Donatelli, et R. Nelson. 2003. *CropSyst, a cropping systems simulation model*. *European Journal of Agronomy* 18: 289-307.

Tremblay, G., D. Lefebvre, H. Petit et C. Lafrenière. 2005. *La valeur nutritive des fourrages*. Dans : *Les plantes fourragères* (G. Bélanger, L. Couture et G. Tremblay, éditeurs). Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec. p. 172-185.

Williams, J.R. 1983. *EPIC, The Erosion-Productivity Impact Calculator, Volume 1. Model Documentation*. Agric. Res. Service, United States Department of Agriculture.

Williams, J.R., C.A. Jones et P.T. Dyke. 1990. *The EPIC model documentation*. USDA-ARS Technical Bulletin No. 1768. U.S. Department of Agriculture, Washington, DC. p. 3-92.

Zadoks, J.C., T.T. Chang et C.F. Konzak. 1974. *A decimal code for the growth stages of cereals*. *Weed Research* 14: 415-421.

Site Internet

Atlas agrométéorologique du Québec. 2012. www.agrometeo.org/atlas (en ligne en mai 2012).