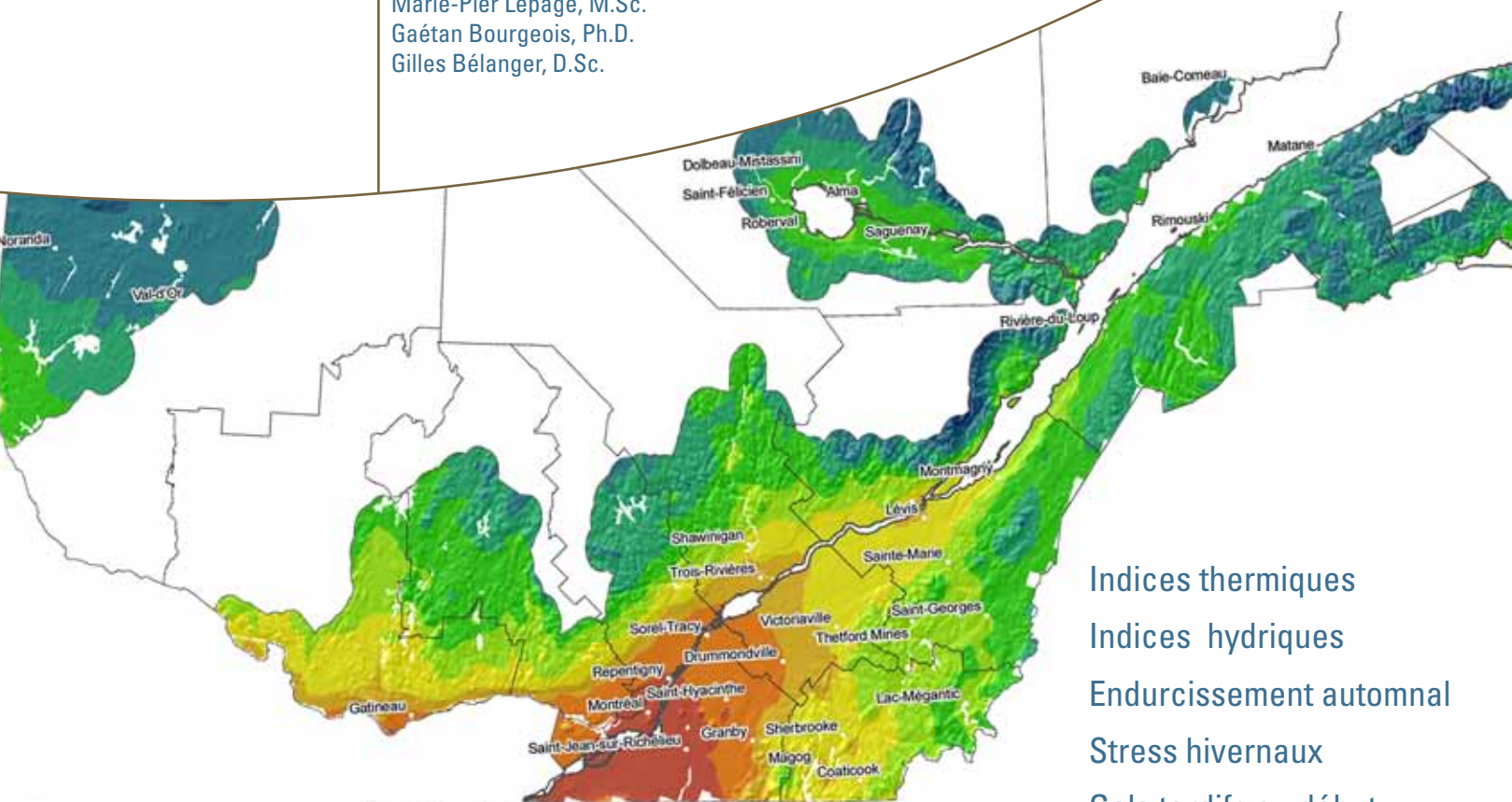


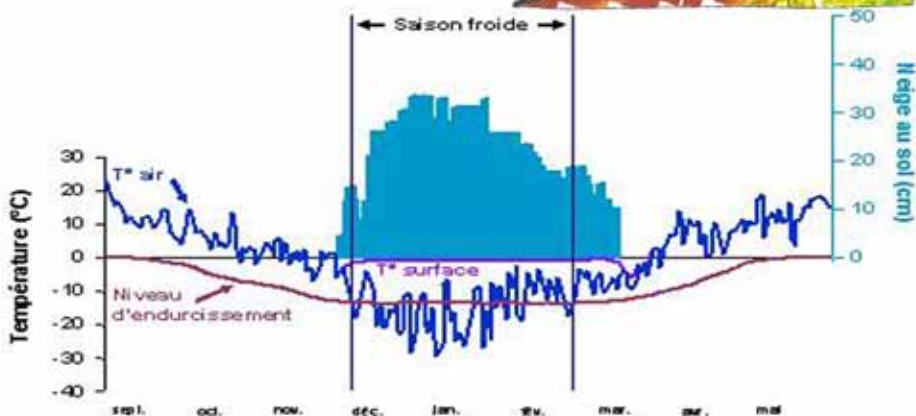
Indices agrométéorologiques pour l'aide à la décision

dans un contexte de climat variable et en évolution

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



Indices thermiques
Indices hydriques
Endurcissement automnal
Stress hivernaux
Gels tardifs au début
du printemps



Centre de référence en agriculture
et agroalimentaire du Québec

CRAAQ

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° PAGR0103

ISBN 978-2-7649-0236-3

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

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

COLLABORATION ET RÉVISION

René Audet, M.Sc., agrométéorologue, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Québec

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

Patrice Mullier, M.Sc., agent de recherche, La Financière agricole du Québec, Saint-Romuald

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

Gilles Tremblay, M.Sc., agronome, régie des grandes 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

IRIIS phytprotection (Michel Lacroix, Chantal Malenfant et Luc Urbain, MAPAQ)

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION..... 1
 Historique de l'utilisation des indices agrométéorologiques 1

INDICES ASSOCIÉS À LA SAISON DE CROISSANCE 1
 Description et applications à l'agriculture..... 1
 Indices thermiques 1
 Dates du dernier gel printanier et du premier gel automnal 1
 Longueur de la saison de croissance 2
 Occurrence de températures élevées..... 2
 Cumuls thermiques..... 3
 Degrés-jours 3
 Unités thermiques maïs 3
 Indices hydriques 5
 Cumul des précipitations 5
 Évapotranspiration potentielle..... 5
 Indice d'assèchement du foin..... 5
 Bilan hydrique 6
 Indices de sécheresse 6

INDICES ASSOCIÉS AUX SAISONS AUTOMNALE ET HIVERNALE 7
 Endurcissement automnal 7
 Stress hivernaux..... 8
 Intensité et durée du froid 8
 Désendurcissement hivernal 9
 Pluies hivernales..... 9
 Gels tardifs au début du printemps..... 9

CONCLUSION 10

RÉFÉRENCES 10

INTRODUCTION

L'objectif de ce feuillet est de décrire les principaux indices agrométéorologiques disponibles au Québec, ainsi que leurs applications dans le secteur agricole. Il présente d'abord les indices associés à la saison de croissance, soit les indices relatifs aux effets de la température et de l'eau, puis plusieurs indices spécifiques des saisons automnale et hivernale.

Historique de l'utilisation des indices agrométéorologiques

Les indices agrométéorologiques sont des indicateurs qui expriment la relation entre les concepts climatologiques (exemple : conditions météorologiques) et agronomiques (exemple : stades phénologiques¹ d'une culture). L'utilisation de ces indices comme outils de travail dans le secteur agricole est relativement récente. L'agrométéorologie a fait son apparition vers les années 1920 avec l'avancement des travaux de recherche en climatologie, mais est devenue une science à part entière dans les années 1950 (Seemann *et al.*, 1979).

Le perfectionnement des instruments de mesure et d'acquisition des données météorologiques et l'arrivée d'ordinateurs plus puissants ont contribué à l'essor du développement des indices agrométéorologiques. De nos jours, leur utilisation en gestion de la production agricole est courante. Ils sont utilisés comme aide à la décision, de manière « tactique », ce qui comprend les actions prises durant la saison en cours (exemples : détermination d'une date de récolte à court terme, interventions phytosanitaires), ou de manière « stratégique », ce qui englobe les actions basées sur des données météorologiques historiques (exemples : potentialité d'une culture ou d'un cultivar dans une région donnée, investissement dans un système d'irrigation à long terme). De plus, dans un contexte de climat variable et en constante évolution, une meilleure compréhension de ces indices est primordiale dans le but de caractériser les impacts du climat sur l'agriculture. Les intervenants et les producteurs agricoles seront ainsi en mesure de profiter des opportunités et de mieux s'adapter aux inconvénients qu'apporteront ces changements climatiques (Bootsma *et al.*, 2004).

INDICES ASSOCIÉS À LA SAISON DE CROISSANCE

Description et applications à l'agriculture

La température est l'un des facteurs ayant le plus d'influence sur le développement et la croissance des plantes et leurs ravageurs. Elle peut être responsable de nombreux dommages aux végétaux, principalement lorsqu'elle se situe à l'extérieur des limites physiologiques de l'espèce.

Les indices thermiques sont utilisés afin d'évaluer différents paramètres liés à la température durant la saison de croissance et déterminants pour la culture. Les informations relatives aux dates de gel permettent d'éviter certains dommages causés par le froid, tandis que l'estimation de la longueur de la saison de croissance permet de bien planifier les périodes de semis et de récolte. Les indices thermiques sont aussi couramment utilisés en gestion de la production agricole pour estimer la date de certains stades phénologiques ou pour faciliter la sélection d'hybrides ou cultivars adaptés à une région donnée.

Les indices hydriques sont, quant à eux, essentiels pour une gestion efficace de l'eau et la prévention des dommages liés aux stress hydriques durant la saison de croissance. Les besoins en drainage ou en irrigation peuvent être évalués par l'utilisation de ces indices, tel le cumul des précipitations. Les stress occasionnés par le manque d'approvisionnement en eau peuvent également être estimés grâce au bilan hydrique et aux indices de sécheresse.

Indices thermiques

Dates du dernier gel printanier et du premier gel automnal

La date du dernier gel printanier correspond au dernier jour où la température minimale quotidienne est inférieure ou égale à la température gélive, c'est-à-dire une température suffisamment basse pour provoquer des lésions sur les végétaux (Guyot, 1999). Cette température varie entre 0 et -5 °C selon la culture. Le gel printanier peut causer d'importants dommages aux cultures selon leur stade phénologique au moment où elles y sont exposées (Figure 1). La

1. Stade de développement correspondant à un changement morphologique chez la plante : débourrement, floraison, etc.

date du dernier gel printanier est souvent associée à un niveau de probabilité donné (exemple : 5 ou 9 années sur 10 = 50 ou 90 %), déterminé à partir de données météorologiques historiques. Cet indice permet aux agriculteurs d'évaluer les risques associés à l'exposition d'une culture à un gel tardif. Un niveau de probabilité élevé (exemple : 90 %) indique que le dernier gel surviendra avant une date donnée 9 années sur 10. Il est ainsi peu probable qu'un gel tardif se produise après cette date. Pour de nombreuses cultures annuelles, la date du dernier gel printanier et la probabilité qui lui est associée pourraient permettre de prendre la décision d'ensemencer plus tôt tout en minimisant les risques pour la culture.



FIGURE 1. DOMMAGES CAUSÉS PAR LE GEL PRINTANIER À DES PLANTS DE FRAISIER AU STADE FLORAISON (A) ET IMPACT SUBSÉQUENT SUR LES FRUITS (B)

Photos : IRIS phytopreccion (Michel Lacroix et Luc Urbain, MAPAQ)

Le premier gel automnal est associé au premier jour où la température minimale quotidienne enregistrée est inférieure ou égale à la température létale. Comme pour le dernier gel printanier, cet indice est associé à divers niveaux de probabilité liés aux risques

de fin de croissance de la culture ou de dommages potentiels à celle-ci.

Dans un contexte de climat variable et en évolution, il est important d'évaluer ces dates de gel printanier et automnal à long terme pour ainsi mieux gérer la production ou anticiper certains risques qui y sont associés. De récentes études ont tenté de dresser un portrait évolutif de ces deux indices pour les arbres fruitiers au Québec à l'horizon 2041-2070. Un devancement de 15 à 17 jours pour le dernier gel printanier et un retard de 11 à 17 jours pour le premier gel automnal ont été estimés, laissant envisager une plus longue saison sans gel (Rochette *et al.*, 2004; Lease *et al.*, 2009).

Longueur de la saison de croissance

La longueur de la saison de croissance est associée à la période où les conditions climatiques d'une région permettent la croissance d'une culture. Pour une région donnée, elle correspond à la période où la température moyenne se maintient au-dessus de 5 °C. Étant donné que cet indice est directement lié à la croissance et au développement des cultures, il constitue un outil particulièrement important dans la planification et la gestion de la production agricole à long terme, par exemple lors de la prise de décisions de nature « stratégique », comme l'évaluation du potentiel agricole d'une région. Selon certaines études, un allongement de la saison de croissance serait escompté dans le futur dans le sud de l'Ontario et du Québec (Bootsma *et al.*, 2004). Dans l'objectif d'améliorer la production, des cultivars ou hybrides plus tardifs pourraient être employés dans certaines régions auxquelles ils n'étaient pas adaptés initialement (Bélanger et Bertrand, 2005; Lease *et al.*, 2009).

Occurrence de températures élevées

Cet indice est utilisé afin d'évaluer la fréquence des températures élevées durant la saison de croissance. Il correspond au nombre de jours, sur une base annuelle, où la température maximale quotidienne est supérieure à une température donnée, généralement 30 ou 35 °C dépendamment de la culture et du stade phénologique. Selon le stade phénologique de la plante, ces températures élevées peuvent causer l'avortement des fleurs en croissance (Figure 2) ou des stress hydriques si la disponibilité de l'eau est limitée. On rapporte également des retards de développement dans certaines cultures. Chez les animaux, la chaleur extrême peut réduire leur productivité et

même causer la mort si la ventilation des installations et l'approvisionnement en eau sont inadéquats.



FIGURE 2. ÉPIS DE MAÏS PRÉSENTANT DES SYMPTÔMES DE STÉRILITÉ DES FLEURS DE LA POINTE CAUSÉS PAR LE TEMPS CHAUD DURANT LA FLORAISON

Photo : IRIIS phytprotection (Chantal Malenfant, MAPAQ)

Cumuls thermiques

Les cumuls thermiques sont utilisés dans le domaine agricole afin d'évaluer le développement des végétaux et des ravageurs durant la saison de croissance. Ils sont basés sur le lien étroit qui existe entre leur développement et la température. Ces cumuls thermiques permettent donc de prédire le moment où certains stades de développement importants sont atteints, comme la date de floraison, la maturité pour la récolte ou le pic de population d'un insecte. Des observations sur chaque stade phénologique d'une culture ou stade de développement d'un ravageur doivent être obtenues expérimentalement. Par la suite, les cumuls sur un territoire donné sont calculés et comparés au seuil requis pour un stade de développement précis d'une culture ou d'un ravageur, ceci dans le but de prédire un moment critique ou planifier certaines interventions phytosanitaires. Plusieurs méthodes de calcul des cumuls thermiques sont disponibles mais, essentiellement, elles peuvent être divisées en deux grands groupes : les degrés-jours et les unités thermiques maïs.

Degrés-jours

Il existe plusieurs façons de calculer les degrés-jours, notamment en utilisant les méthodes de type

standard, triangulaire ou sinusoïdal. La méthode standard, qui est la plus simple et également la plus couramment utilisée dans le domaine agricole, est présentée à l'**Équation 1**. Le calcul des degrés-jours est basé sur le principe physiologique selon lequel le développement est nul au-dessous d'un seuil désigné comme température de base. Cette température est évaluée de façon expérimentale et diffère selon les espèces et, dans certains cas, selon le stade spécifique de développement. Les valeurs quotidiennes sont additionnées tout au long de la saison de croissance. Le concept des degrés-jours comporte une limite importante : il exprime uniquement l'impact de la température. En effet, certains facteurs environnementaux importants pour le développement des végétaux, telles les précipitations, l'humidité du sol et la photopériode, ne sont pas considérés.

Équation 1 - Calcul des degrés-jours (DJ) quotidiens

$$\begin{aligned} DJ &= T_{\text{moy}} - T_{\text{base}} && \text{lorsque } T_{\text{moy}} \geq T_{\text{base}} \\ DJ &= 0 && \text{lorsque } T_{\text{moy}} < T_{\text{base}} \end{aligned}$$

où :

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

T_{max} et T_{min} = températures maximale et minimale quotidiennes (°C)

T_{base} = température de base, généralement entre 0 et 10 °C selon les espèces

Unités thermiques maïs

Les unités thermiques maïs (UTM) sont calculées à l'aide de l'**Équation 2**, où Y_{max} correspond à une valeur de température dérivée d'une fonction décrivant la période diurne et Y_{min} représente l'équivalent pour la période nocturne. Ces unités sont cumulées à partir d'une certaine date qui diffère selon les années, à la suite du dernier gel printanier et à l'atteinte d'une température de référence donnée. Elles cessent d'être cumulées selon la même logique, soit près du premier gel automnal. Les valeurs cumulées se situent généralement entre 2 000 et 3 000 UTM pour les zones de production de maïs-grain au Québec (Laurence *et al.*, 2002).

Équation 2 - Calcul des unités thermiques maïs (UTM) quotidiennes

(source : Laurence *et al.*, 2002)

$$UTM = (Y_{max} + Y_{min})/2$$

où :

$$Y_{max} = 3,33 (T_{max}-10) - 0,084 (T_{max}-10)^2$$

lorsque $T_{max} \geq 10 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$Y_{max} = 0$$

lorsque $T_{max} < 10 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$Y_{min} = 1,8 (T_{min} - 4,4)$$

lorsque $T_{min} \geq 4,4 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$Y_{min} = 0$$

lorsque $T_{min} < 4,4 \text{ } ^\circ\text{C}$

T_{max} et T_{min} = températures maximale et minimale quotidiennes ($^\circ\text{C}$)

Les UTM sont utilisées pour prédire l'arrivée des stades phénologiques, tels que la maturité, durant la

saison de croissance. Elles permettent également de décrire le potentiel des régions pour la production de maïs. Les UTM sont également utilisées pour décrire les exigences thermiques des différents hybrides et cultivars pour atteindre la maturité.

Afin de faciliter l'utilisation des UTM, Agriculture et Agroalimentaire Canada a préparé une carte illustrant les zones géographiques en fonction des UTM disponibles dans chacune d'elles à un niveau de probabilité de 80 % (Figure 3). Ces valeurs ont été calculées à partir de données météorologiques quotidiennes maillées aux 10 km et provenant d'un grand nombre de stations situées au Québec. Pour que les cultures parviennent à leur maturité, les producteurs doivent préférentiellement opter pour des hybrides exigeant un nombre d'UTM inférieur à celui calculé pour leur région.

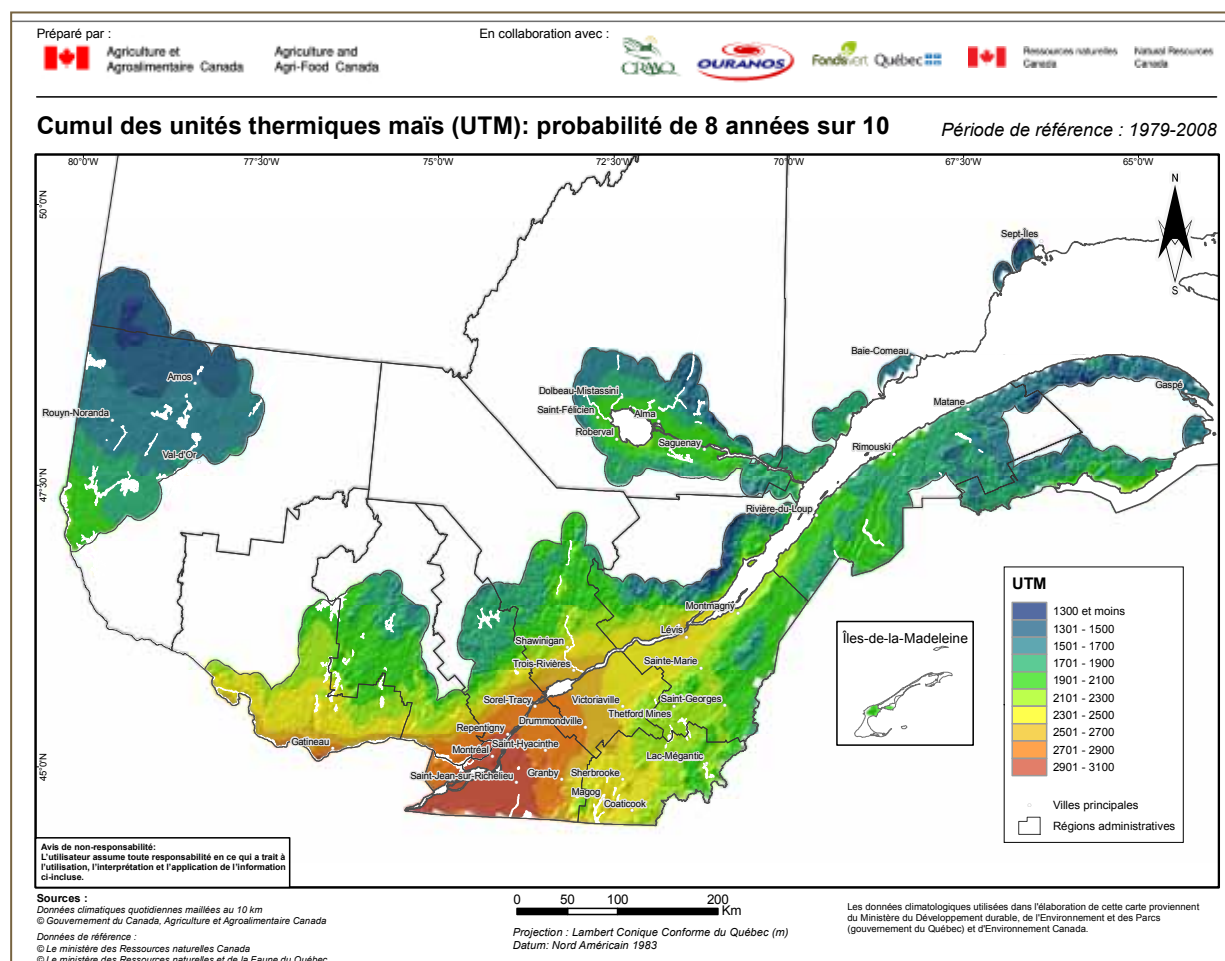


FIGURE 3. CARTE DES UNITÉS THERMIQUES MAÏS (UTM) POUR LE QUÉBEC, À UN NIVEAU DE PROBABILITÉ DE 80 % (8 ANNÉES SUR 10) POUR LA PÉRIODE 1979-2008

Source : Atlas agroclimatique du Québec, 2012

Bien que cet indice soit d'une grande utilité lors de la planification de la production de maïs, il doit être employé avec une certaine précaution. Le calcul des UTM, tout comme celui des degrés-jours, ne prend pas en considération certains facteurs qui influencent le développement des végétaux, tels que les précipitations, l'humidité du sol et la photopériode. Certains facteurs locaux, tels que le type de sol et le drainage, ne sont pas évalués dans la cartographie des différentes zones illustrées à la figure 3. Par ailleurs, les UTM disponibles dans ces zones ont été calculées pour la période 1979-2008. Certaines études ont déjà mentionné qu'une hausse des UTM serait envisageable (Bélanger et Bootsma, 2002; Bootsma *et al.*, 2004) et une réévaluation de cet indice sera nécessaire éventuellement dans le contexte d'un climat variable et en évolution.

Indices hydriques

Cumul des précipitations

L'apport d'eau fourni par les précipitations est un indice utilisé dans plusieurs secteurs de production, pour la gestion de l'irrigation des parcelles, l'évaluation du potentiel agricole d'une région donnée et le lessivage des pesticides notamment. Le cumul des précipitations sous forme de pluie peut être calculé sur une base annuelle, mensuelle ou sur une période précise qui s'étend, par exemple, d'avril à octobre pour correspondre globalement à la saison de croissance. Les quantités de pluie sont ainsi calculées pour un territoire sélectionné, à une échelle de temps variable. Il est important de porter une attention particulière à cette échelle dans l'interprétation des données météorologiques observées. À titre d'exemple, le cumul de faibles quantités de pluie sur une base régulière durant une longue période peut être équivalent à la quantité de pluie de forte intensité reçue sur une courte période, mais leur impact sur la culture n'est pas le même.

Évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration correspond à la perte d'eau du sol et du couvert végétal par évaporation, ainsi qu'à la perte d'eau des végétaux par transpiration. L'indice d'évapotranspiration potentielle (ETP) repose sur le principe selon lequel la croissance d'une culture est optimale lorsque la réserve utile en eau est suffisante et qu'il y a un équilibre entre l'absorption d'eau par les racines et la perte par transpiration

(Hufty, 2001). L'ETP correspond aux possibilités maximales théoriques d'évaporation et de transpiration dans des conditions climatiques données (Guyot, 1999). L'évapotranspiration réelle correspond à une mesure directe (à l'aide d'un lysimètre ou d'un tensiomètre par exemple) dans une culture en conditions naturelles (Guyot, 1999).

Cet indice peut être calculé en utilisant plusieurs méthodes, dont la formule de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998). Toutefois, cette équation demeure relativement complexe en termes de données météorologiques requises (température, humidité relative, rayonnement solaire, vitesse du vent) et nécessite une programmation spécifique afin de pouvoir l'utiliser. Au Québec, très peu de stations météorologiques possèdent tous les instruments de mesure requis pour calculer l'indice de cette manière. Une formule plus simple, utilisée au Québec, est celle de Baier et Robertson (1965) (Équation 3). Selon cette équation, l'ETP est basée sur la radiation extraterrestre, la température maximale et l'amplitude thermique quotidienne, et fournit des résultats satisfaisants (Rochette et Dubé, 1989). Elle est principalement utilisée dans le calcul du bilan hydrique pouvant servir à la planification de l'irrigation.

Équation 3 - Évapotranspiration potentielle (ETP) (mm/jour)

(selon Baier et Robertson, 1965)

$$ETP = 0,094 (-87,03 + 0,928 T_{max} + 0,933 [T_{max} - T_{min}] + 0,0486 Ra)$$

où :

T_{max} et T_{min} = températures maximale et minimale quotidiennes (°F)

Ra = radiation (cal/cm²/jour)

Indice d'assèchement du foin

L'indice d'assèchement du foin constitue un outil utile surtout pour les producteurs de cultures fourragères dans la planification de leurs récoltes. La radiation solaire, l'humidité relative de l'air, la température et la vitesse du vent sont prises en considération dans le calcul afin de prédire la capacité de l'air ambiant à évaporer l'eau contenue dans le sol et la végétation en une journée (Savoie *et al.*, 2002). L'indice est exprimé sur une base quotidienne selon une échelle de 0 à 100, où cinq catégories sont

différenciées : très bas (0 à 10), bas (11 à 20), modéré (21 à 40), élevé (41 à 70) et très élevé (71 et plus) (**Équation 4**). Pour estimer le moment idéal de la récolte du foin, les producteurs peuvent se référer à des calculs préétablis, tels que ceux présentés dans le tableau 1. Par exemple, pour obtenir un foin conditionné contenant 80 % d'humidité au moment de la fauche et 30 % d'humidité à la récolte, la somme des indices d'assèchement quotidiens devrait être égale à 105.

Équation 4 - Indice d'assèchement (IA) du foin quotidien (cm³)

(Source : Hayhoe *et al.*, 1986)

$$IA = - 42,606 + 0,07045 V + 0,9558 (T_{max} - T_{min}) + 0,6066 T_{max} + 0,02355 Q_0 + 0,031539 Q_0 S + 1,77 (E_s - E_w)$$

où :

V = vitesse moyenne quotidienne du vent (km/h)

T_{max} et T_{min} = températures maximale et minimale quotidiennes (°C)

Q₀ = radiation au sommet de l'atmosphère (cal/cm²/jour)

S = pourcentage d'ensoleillement entre le lever et le coucher du soleil

E_s - E_w = déficit de pression de vapeur (mbar)

TABLEAU 1. CUMUL DES INDICES D'ASSÈCHEMENT QUOTIDIENS POUR ATTEINDRE LE POURCENTAGE D'HUMIDITÉ DÉSIRÉ DANS LE FOIN CONDITIONNÉ

Pourcentage d'humidité désiré (%)	Indice d'assèchement (foin conditionné)		
	80 % d'humidité à la fauche	70 % d'humidité à la fauche	60 % d'humidité à la fauche
50	53	38	23
40	75	60	45
30	105	90	75
20	151	136	121

Tiré de Amyot, 2003 et Savoie *et al.*, 2002

Bilan hydrique

Le bilan hydrique est basé sur la disponibilité de l'eau contenue dans le sol en fonction des pertes, telles que l'évapotranspiration, le drainage et le lessivage, et des apports par les précipitations, l'irrigation et la

remontée capillaire (Figure 4). Pour déterminer la valeur du bilan, il est également important de connaître la culture présente, le stade phénologique et certaines variables comme les coefficients spécifiques de la culture et la profondeur de l'enracinement.

Le bilan hydrique peut servir à calculer la productivité des végétaux, souvent corrélée avec le rapport entre les précipitations reçues et l'évapotranspiration (Hufty, 2001). Cet indice permet d'évaluer la quantité de précipitations sous forme d'eau par rapport à l'évapotranspiration. Si l'indice est positif, l'eau est disponible en quantité suffisante pour la culture. S'il est négatif, un déficit hydrique peut être constaté et il est fort probable que la culture ait besoin d'eau. Les producteurs peuvent ainsi corriger les déficits en fournissant un apport d'eau grâce à l'irrigation. Malheureusement, cette méthode de calcul du bilan hydrique comprend certaines limites dues à la difficulté de représentation du grand nombre de facteurs intervenant dans ce bilan. Il est recommandé d'ajuster les calculs au moyen de mesures d'humidité du sol *in situ*, effectuées à l'aide de tensiomètres ou autres instruments de mesure.

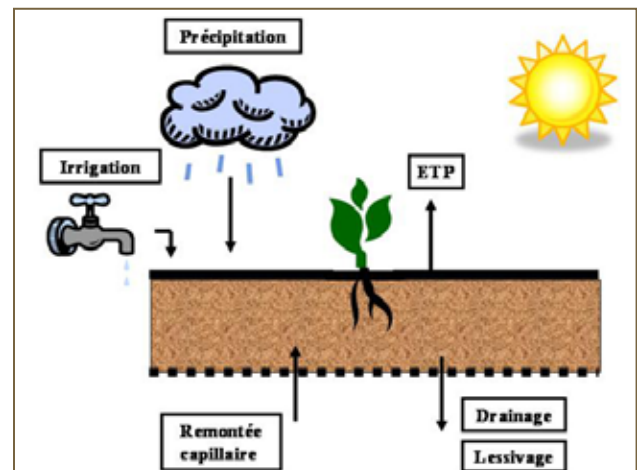


FIGURE 4. REPRÉSENTATION SCHEMATIQUE DU BILAN HYDRIQUE

Source : Marie-Pier Lepage

Indices de sécheresse

La sécheresse peut causer des dommages considérables aux cultures, surtout en pleine saison de croissance, durant une période prolongée sans précipitations accompagnée de chaleur intense. L'humidité du sol diminue alors à un point tel que les plantes ne peuvent plus extraire l'eau du sol, ce qui mène au flétrissement de celles-ci. Les différents indices qui existent pour quantifier la sécheresse en météorologie sont surtout utilisés dans les Prairies

canadiennes comme outils de gestion des productions ou d'assurance récolte, afin de quantifier et de surveiller la sécheresse ou de prédire les rendements. Par contre, ces indices n'ont pas été calibrés au Québec.

En décembre 2009, plusieurs experts de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) ont adopté l'utilisation d'un indice de sécheresse météorologique universel. Basé sur la probabilité de précipitation, cet outil numérique se réfère à des relevés effectués sur de longues échelles de temps.

L'apparition d'une période de sécheresse serait associée à des indices systématiquement négatifs alors qu'elle se terminerait lorsqu'ils deviennent positifs (OMM, 2009).

INDICES ASSOCIÉS AUX SAISONS AUTOMNALE ET HIVERNALE

Des conditions climatiques adéquates au cours des périodes automnale et hivernale sont particulièrement importantes pour assurer la survie des cultures pérennes (cultures fourragères, arbres fruitiers, bleuets, etc.) et des céréales d'hiver. Des indices agrométéorologiques permettent de quantifier les risques climatiques de dommages hivernaux à ces cultures. Ces indices couvrent trois périodes importantes pour la survie hivernale : la période d'endurcissement au froid au cours de l'automne, la période hivernale ou saison froide, qui peut inclure des températures très froides et des redoux, et la période de réveil printanier (Figure 5). Ils ont surtout été développés pour les espèces fourragères pérennes sensibles à l'hiver, comme la luzerne, et pour les arbres fruitiers, comme le pommier. Ces indices visent à mieux identifier les risques associés à la saison hivernale pour planifier l'implantation de cultures pérennes en lien avec leur potentiel de survie dans une région donnée. Plus récemment, ils ont été utilisés pour prédire l'impact des changements climatiques prévus sur les risques de dommages hivernaux aux plantes fourragères pérennes (Bélanger *et al.*, 2002) et aux arbres fruitiers (Rochette *et al.*, 2004).

Endurcissement automnal

L'arrivée de l'automne entraîne une diminution progressive de la température et de la longueur du jour (photopériode), ce qui déclenche le processus d'endurcissement au froid chez les végétaux

(Figure 5A). Les plantes subissent plusieurs changements importants, tels que l'accumulation de réserves et de sucres cryoprotecteurs, durant cette période afin d'assurer leur survie en hiver. Une augmentation des températures automnales peut donc avoir un effet négatif sur le niveau d'endurcissement (Figure 5B).

PLANTES FOURRAGÈRES. Un des indices utilisés pour les plantes fourragères est le cumul de degrés-jours de froid sous une température de base donnée pendant la période d'endurcissement (Bélanger *et al.*, 2002). Les degrés-jours de froid sont calculés quotidiennement à partir du premier jour du mois d'août. Ils sont positifs lorsque la température est inférieure à 5 °C (favorable à l'endurcissement) et négatifs lorsque la température est supérieure à 5 °C (favorable à la croissance) (Bélanger *et al.*, 2002). Les degrés-jours de froid sont cumulés pendant la période d'endurcissement, laquelle correspond à la période où le cumul net des degrés-jours de froid est uniquement positif jusqu'au premier jour où la température atteint -10 °C. On estime que la luzerne a besoin d'un cumul net de 100 degrés-jours sous 5 °C pour acquérir une tolérance maximale au froid.

Un autre indice utilisé chez les plantes fourragères est la moyenne quotidienne des précipitations pendant la période d'endurcissement. Des sols trop humides nuisent à la réalisation du plein potentiel d'endurcissement au froid durant l'automne (Bélanger *et al.*, 2002). À l'automne, l'évapotranspiration est relativement faible. La teneur en eau du sol est donc surtout liée aux précipitations reçues. Une valeur élevée de cet indice indique un risque plus élevé d'endurcissement insuffisant.

ARBRES FRUITIERS. Pour les arbres fruitiers, l'indice d'endurcissement principalement employé est la photopériode au moment du premier gel automnal (0 °C). Une diminution de la photopériode à l'automne permet aux arbres d'initier la formation de bourgeons terminaux et de stopper la croissance. L'endurcissement est alors accéléré en réponse aux températures froides subséquentes (Rochette *et al.*, 2004). L'endurcissement peut être inadéquat si la période sans gel est trop courte à la suite du déclenchement de l'endurcissement par la photopériode. Une courte photopériode au moment du premier gel automnal est associée à une plus longue période d'endurcissement, donc à un meilleur endurcissement.

Stress hivernaux

La préparation à la période hivernale s'effectue par le processus d'endurcissement automnal. Si cette phase n'est pas suffisamment complétée, les cultures risquent de subir des dommages sous l'effet des températures froides ultérieures (Figure 5). La période froide hivernale pour les plantes fourragères et les arbres fruitiers se situe entre la première et la dernière occurrence d'une température inférieure à -15°C (Bélanger *et al.*, 2002; Rochette *et al.*, 2004). Toutefois, pour certains indices associés aux arbres fruitiers, cette période se situe entre le 1^{er} janvier et la dernière occurrence d'une température inférieure à -15°C car, dans l'est du Canada, les arbres fruitiers deviennent dormants après l'endurcissement automnal et ne répondent plus aux conditions environnementales même si celles-ci sont favorables au développement (Rochette *et al.*, 2004). Des températures froides pendant 3 à 4 semaines sont requises pour briser cette dormance et ces conditions sont généralement rencontrées sous nos latitudes à la fin du mois de décembre (Perry, 1971). La résistance des cultures pérennes aux températures froides varie selon les espèces et entre les cultivars d'une même espèce.

Intensité et durée du froid

ARBRES FRUITIERS. Deux indices associés aux températures froides de la période hivernale sont proposés pour les arbres fruitiers. Le cumul des degrés-jours de froid à des températures inférieures à -15°C exprime les risques associés à l'intensité et à la durée des températures froides. Une température froide constante durant plusieurs jours n'aura pas le même impact sur la culture qu'une exposition pendant un court laps de temps. L'exposition prolongée aux températures froides peut entraîner la dessiccation des cellules due aux mécanismes de protection qui impliquent un mouvement de l'eau vers l'espace extracellulaire. Le deuxième indice correspond à la température quotidienne la plus froide de l'année. Cette température correspond au niveau maximum de tolérance au froid des arbres fruitiers et permet d'estimer les limites de la production fruitière.

PLANTES FOURRAGÈRES. La couverture nivale durant la période hivernale influence grandement la survie des cultures pérennes herbacées, notamment par la protection des racines et des bourgeons contre les températures froides (Figure 5D). L'indice

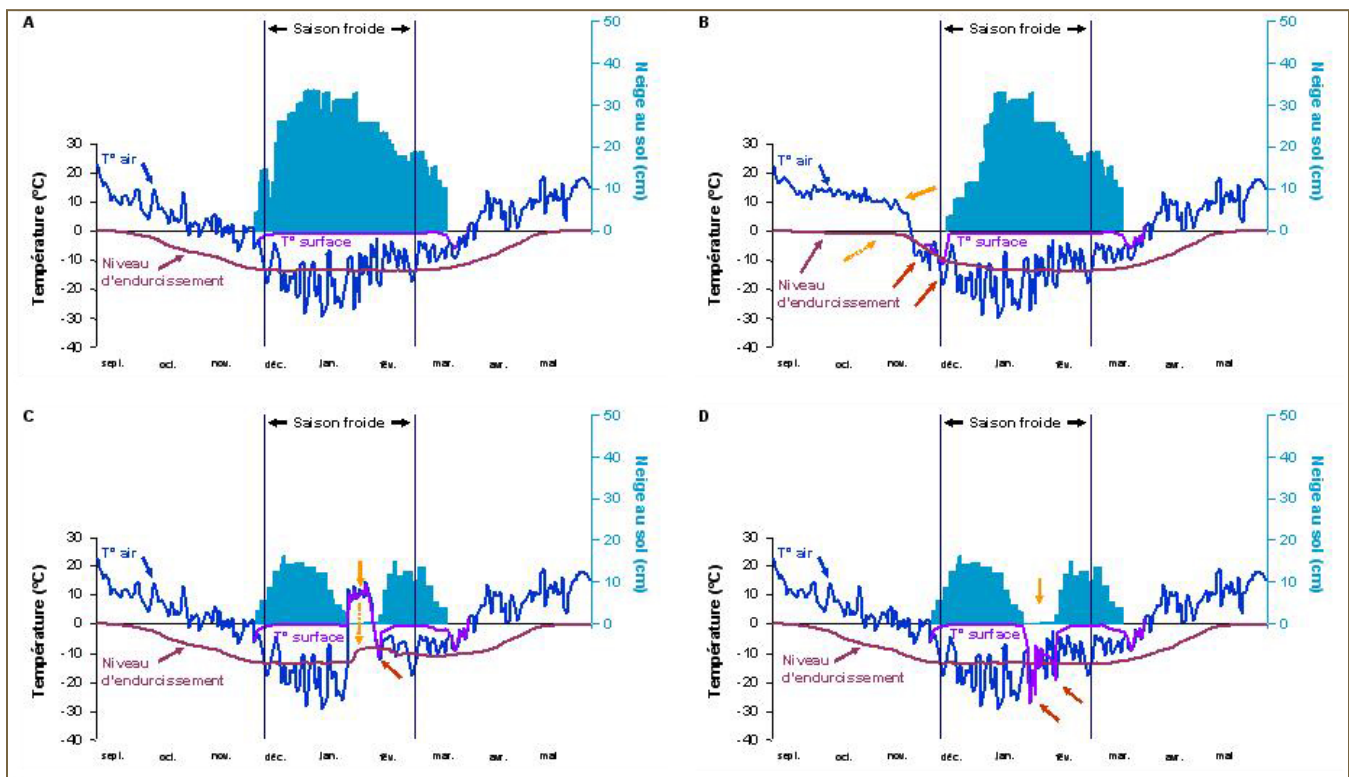


FIGURE 5. DIFFÉRENTS SCÉNARIOS LIÉS À L'ENDURCISSEMENT ET ILLUSTRANT DES CONDITIONS IDÉALES (A), DES TEMPÉRATURES ÉLEVÉES À L'AUTOMNE EMPÊCHANT L'ENDURCISSEMENT (B), DES TEMPÉRATURES AU-DESSUS DU POINT DE CONGÉLATION PENDANT L'HIVER ENTRAÎNANT UNE PERTE D'ENDURCISSEMENT (C) ET UN MANQUE D'ISOLATION PAR LA NEIGE (D)

Source : Gilles Bélanger

utilisé est la différence entre la durée de la période hivernale, telle que définie précédemment, et le nombre de jours où la hauteur de neige au sol est supérieure à 10 cm pendant la saison hivernale (Bélanger *et al.*, 2006). Un indice négatif est associé à la durée pendant laquelle la culture sera protégée par la neige, tandis qu'une valeur positive exprime une exposition potentielle des plantes aux températures froides dues à l'absence d'isolation par la neige. Cet indice est utilisé, entre autres, pour évaluer les risques de mortalité hivernale dans différentes régions (Figure 6).

Désendurcissement hivernal

En période hivernale, l'exposition à des températures supérieures à 0 °C entraîne une perte d'endurcissement chez les plantes, ce qui accroît de façon significative les risques de dommages hivernaux en cas d'exposition ultérieure à des températures bien inférieures au point de congélation (Figure 5C). L'indice utilisé pour caractériser le désendurcissement hivernal est le cumul quotidien des degrés-jours au-dessus de 0 °C en période hivernale (Bélanger *et al.*, 2002; Rochette *et al.*, 2004). Cet indice s'applique aux cultures fourragères pérennes et aux arbres fruitiers.

Pluies hivernales

Les épisodes de pluie ou de fonte des neiges survenant en hiver peuvent induire la formation d'une couche de glace imperméable qui fait obstacle à la respiration des plantes. De plus, comme la glace présente une conductivité thermique supérieure à celle de la neige, les racines et le collet sont ainsi davantage exposés aux cycles de gel et dégel. Un indice permet d'évaluer le risque de dommages hivernaux associés à la formation d'une couche de glace ou au soulèvement du sol dus au gel à la suite des précipitations. Il s'agit du cumul quotidien de pluie pendant la période hivernale, tel que décrite précédemment (Bélanger *et al.*, 2002). Une valeur élevée de cet indice indique un risque élevé de dommages hivernaux associés à la glace ou au soulèvement du sol.

Gels tardifs au début du printemps

À partir du moment où la dormance est levée chez les arbres fruitiers, ceux-ci peuvent répondre aux conditions climatiques favorables à leur développement. De plus, l'évolution de leurs stades phénologiques est jumelée à une diminution de la tolérance au froid.

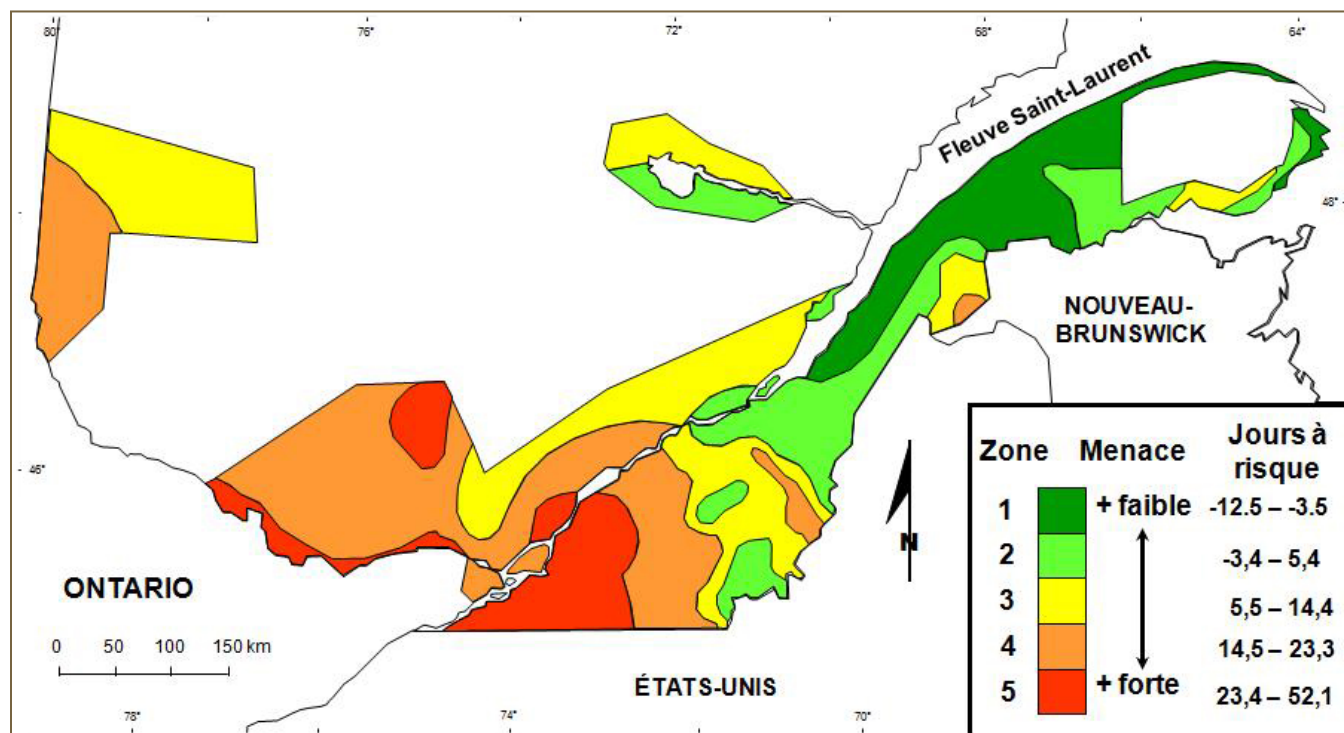


FIGURE 6. RISQUES DE MORTALITÉ HIVERNALE POUR LES PLANTES FOURRAGÈRES AU QUÉBEC. L'INTENSITÉ RELATIVE DES RISQUES (NOMBRE DE JOURS À RISQUE) EST EXPRIMÉE PAR LA DIFFÉRENCE ENTRE LE NOMBRE DE JOURS OÙ LA TEMPÉRATURE EST INFÉRIEURE OU ÉGALE À -15 °C ET LE NOMBRE DE JOURS OÙ IL Y A UN COUVERT DE NEIGE D'AU MOINS 10 CM

Adapté de Rochette et Dubé, 1993

Ainsi, du débourrement à la nouaison, des gels tardifs peuvent causer des dommages importants aux bourgeons floraux. Les risques associés à un gel tardif sont alors évalués à partir du cumul des degrés-jours à des températures supérieures à 5 °C entre le 1^{er} janvier et la date du dernier gel à une température minimum de -2 °C (Rochette *et al.*, 2004). Cet indice prend en compte à la fois le développement de la culture et le moment du dernier gel. Une valeur élevée de cet indice indique un risque accru de dommages aux bourgeons floraux.

CONCLUSION

Les indices agrométéorologiques sont de précieux outils pour les intervenants et les producteurs agricoles. Leur utilisation pour caractériser la saison de croissance ou la saison hivernale permet une meilleure gestion des productions agricoles, incluant la planification des interventions phytosanitaires, la sélection des cultivars ou hybrides les mieux adaptés, l'évaluation plus précise des besoins en irrigation et le choix des cultures dans différentes régions. Dans un contexte de changements climatiques, ces indices permettront sans aucun doute une meilleure adaptation aux conditions futures. Ils serviront assurément de points de référence au secteur agricole afin de lui permettre de s'ajuster face aux fluctuations météorologiques et de réagir adéquatement.

RÉFÉRENCES

Documents

- Amyot, A. 2003. *Bien comprendre ce qui se passe dans les fourrages, du champ... à l'animal, un atout pour améliorer sa régie*. Colloque régional sur les plantes fourragères, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec, Direction régionale de la Chaudière-Appalaches. 24 p.
- Baier, W. et G.W. Robertson. 1965. *Estimation of latent evaporation from simple weather observations*. Canadian Journal of Plant Science 45: 277-284.
- Bélangier, G. et A. Bootsma. 2002. *Impact des changements climatiques sur l'agriculture au Québec*. 65^e Congrès de l'Ordre des agronomes du Québec, Changements climatiques : comprendre pour mieux agir. 20 p.
- Bélangier, G., Y. Castonguay, A. Bertrand, C. Dhont, P. Rochette, L. Couture, R. Drapeau, D. Mongrain, F.-P. Chalifour et R. Michaud. 2006. *Winter damage to perennial forage crops in eastern Canada: Causes, mitigation, and prediction*. Canadian Journal of Plant Science 86: 33-47.
- Bélangier, G., P. Rochette, Y. Castonguay, A. Bootsma, D. Mongrain et D.A.J. Ryan. 2002. *Climate change and winter survival of perennial forage crops in eastern Canada*. Agronomy Journal 94: 1120-1130.
- Bootsma, A., D. Anderson et S. Gameda. 2004. *Potential impacts of climate change on agroclimatic indices in southern regions of Ontario and Quebec*. Technical Bulletin. ECORC Contribution No. 03-284. 14 p.
- Guyot, G. 1999. *Climatologie de l'environnement – Cours et exercices corrigés*. Dunod, Paris. 525 p.
- Hayhoe, H.N., J. Boisvert et J.N. Couture. 1986. *Contraintes climatiques durant la période de fenaison*. Symposium sur les plantes fourragères, Québec, 3 avril. p. 85-109.
- Hufty, A. 2001. *Introduction à la climatologie*. Les Presses de l'Université Laval, Université De Boeck. 542 p.
- Laurence, H., A. Bootsma, R. Audet, L. Bélangier, G. Bourgeois, D. Anderson, D. Morin et G. Tremblay. 2002. *Ré-évaluation des unités thermiques disponibles au Québec pour le maïs et le soya*. Bulletin technique. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Québec. 12 p.
- Lease, N., A. Pichette et D. Chaumont. 2009. *Projet d'étude sur l'adaptation aux changements climatiques du secteur de la pomme au Québec*. Direction de l'agroenvironnement et du développement durable, ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec et Ouranos. 58 p.
- Perry, T.O. 1971. *Dormancy of trees in winter*. Science 171: 29-36.
- Rochette, P. et P.A. Dubé. 1989. *Calibration d'une équation simple pour l'estimation de l'évaporation potentielle*. Le Naturaliste canadien 116: 193-203.
- Rochette, P. et P.A. Dubé. 1993. *Zonage du risque agroclimatique durant la saison froide au Québec méridional : I- Froid hivernal*. Bulletin climatologique 27(2): 45-62.

Rochette, P., G. Bélanger, Y. Castonguay, A. Bootsma et D. Mongrain. 2004. *Climate change and winter damage to fruit trees in eastern Canada*. Canadian Journal of Plant Science 84: 1113-1125.

Savoie, P., G. Allard, G. Beauregard, A. Brunelle, G. Lefebvre, R. Michaud, F. Pelletier, M. Perron, A. Piette et P. Therrien. 2002. *Guide sur la production du foin du commerce*. Conseil québécois des plantes fourragères. 36 p.

Seemann, J., Y.I. Chirkov, J. Lomas et B. Primault. 1979. *Agrometeorology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, Germany. 326 p.

Sites Internet

Allen, R.G., L.S. Pereira, D. Raes et M. Smith. 1998. *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm> (consulté le 2 mars 2011).

Atlas agroclimatique du Québec. 2012. <http://www.agrometeo.org>

Bélanger, G. et A. Bertrand. 2005. *L'agriculture et le climat futur : opportunités et défis*. FrancVert, Vol. 2 No. 3. <http://www.francvert.org/pages/23dossierlagricultureetleclimatfutur.asp> (consulté le 6 février 2011).

IRIIS phytoprotection. Banque d'Imagerie en phytoprotection pour identification et la Recherche d'Images sur les Invertébrés nuisibles et utiles ainsi que sur les plantes présentant des Symptômes causés par les ennemis des cultures et les problèmes non parasitaires. <http://www.iriisphytoprotection.qc.ca/> (consulté le 2 mars 2011).

OMM. 2009. *Des experts se mettent d'accord sur un indice de sécheresse universel dans le contexte des risques climatiques*. Communiqué de presse N° 872, Organisation météorologique mondiale. http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_872_fr.html (consulté le 13 février 2011).