

Impacts potentiels du changement climatique sur les indices agroclimatiques dans les régions du sud de l'Ontario et du Québec

A. Bootsma, D. Anderson et S. Gameda
Centre de recherches de l'Est sur les céréales
et oléagineux
Agriculture et Agroalimentaire Canada
Direction de la recherche
Ottawa (Ontario)

Bulletin technique
Contribution du CRECO n° 03-284

**Centre de recherches de l'Est
sur les céréales et oléagineux
Direction de la recherche,
Agriculture et Agroalimentaire
Canada 2004**

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	iii
LISTE DES TABLEAUX	iv
SOMMAIRE.....	v
INTRODUCTION.....	1
DONNÉES ET PROCÉDURES	1
Donnée climatologiques de référence.....	1
Scénarios de changement climatique	1
Calcul et cartographie des indices agroclimatiques	3
RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	7
Unités thermiques du maïs (UTM) (de croissance)	7
Degrés-jours de croissance supérieurs à 5 °C (DJC).....	8
Degrés-jours de croissance effectifs supérieurs à 5 °C (DJCE).....	9
Déficits hydriques	9
Indice d'aridité	11
SOMMAIRE ET CONCLUSIONS	11
REMERCIEMENTS	12
RÉFÉRENCES	12

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1. Représentation de l'indice d'aridité (CRED de 150 mm, niveau de probabilité de 10 %) par rapport au DEFICIT 3 et à l'équation de régression correspondante (1).....	6
Figure 2. Unités thermiques moyennes du maïs (UTM)	7
Figure 3. Date de début moyenne de la saison de croissance du maïs	8
Figure 4. Date de fin moyenne de la saison de croissance du maïs-grain.....	8
Figure 5. Durée moyenne de la saison de croissance du maïs-grain	8
Figure 6. Degrés-jours de croissance moyens supérieurs à 5 °C (DJC)	8
Figure 7. Date de début moyenne de la période de cumul des DJC	8
Figure 8. Date de fin moyenne de la période de cumul des DJC	8
Figure 9. Durée moyenne de la saison de croissance (DuSC) pour le cumul des DJC	8
Figure 10. Degrés-jours de croissance effectifs (DJCE) moyens supérieurs à 5 °C.....	9
Figure 11. Date de fin moyenne pour le cumul de DJCE	9
Figure 12. Durée moyenne de la saison de croissance (DuSC 2) pour le cumul des DJCE	9
Figure 13. Déficit hydrique moyen quotidien (DEFICIT 1) cumulé pendant la DuSC	9
Figure 14. Évaporation potentielle moyenne (ÉP 1) cumulée pendant la DuSC	10
Figure 15. Précipitations moyennes (PRECIP 1) cumulées pendant la DuSC	10
Figure 16. Déficit hydrique moyen quotidien (DEFICIT 2) cumulé pendant la DuSC 2	10
Figure 17. Évaporation potentielle moyenne (ÉP 2) cumulée pendant la DuSC 2	10
Figure 18. Précipitations moyennes (PRECIP 2) cumulées pendant la DuSC 2	10
Figure 19. Valeurs moyennes positives du déficit hydrique quotidien (DEFICIT 3) cumulées pendant la DuSC	11
Figure 20. Indice d'aridité pour les sols ayant une CRED de 150 mm, à un niveau de probabilité de 10 %.....	11

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1. Sélection des MCG et des simulations utilisés aux fins de l'étude	2
Tableau 2. Liste des indices agroclimatiques calculés et cartographiés pour la zone d'étude	5

SOMMAIRE

Des indices agroclimatiques (unités thermiques, déficits hydriques saisonniers et indice d'aridité) ont été établis pour les principales régions agricoles de l'Ontario et du Québec pour le climat de référence (observé) (moyenne de 1961 à 1990) et pour trois périodes futures (2010-2039, 2040-2069, 2070-2099) présentant des données moyennes de scénarios facilement disponibles. Les scénarios de climat pour les périodes futures reposent sur les sorties de onze modèles de circulation générale (MCG), conçus au Canada, au Royaume-Uni et en Allemagne. De plus, toutes les simulations des MCG utilisées aux fins de l'étude tiennent compte d'un forçage par les gaz à effet de serre (GES) basé sur le scénario d'émissions IS92a élaboré par le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC). Selon ce scénario, le forçage par les GES correspond aux concentrations observées de GES dans l'atmosphère jusqu'à présent (années 1990) et à une hausse de 1 % par année (valeur composée) des concentrations d'ici 2099. Les simulations englobent des scénarios avec et sans aérosols de sulfate. Les variations des moyennes mensuelles des températures et des précipitations de 1961 à 1990, selon les projections de chaque MCG, ont été interpolées sur une grille à mailles fines de 500 secondes d'arc (soit environ 10 à 15 km) pour la région choisie et imposées au climat de référence interpolé sur la même grille afin d'établir les moyennes climatiques mensuelles pour chacune des trois périodes futures.

Au total, dix-neuf indices agroclimatiques ont été calculés à partir des données climatiques moyennes mensuelles interpolées. Des cartes ont également été tracées pour illustrer les valeurs moyennes de chaque indice pour la période de 1961 à 1990, ainsi que les valeurs médianes, le 90^e (ou 10^e) percentile et le 90^e percentile moins le 10^e percentile à partir de onze valeurs moyennes dérivées des sorties des MCG pour chaque période future. Les percentiles ont été inclus pour indiquer la variabilité introduite par l'utilisation des divers scénarios des MCG.

Les résultats montrent une augmentation substantielle des indices thermiques et de la durée de la saison de croissance pour le maïs, le soja, les céréales du printemps et les plantes fourragères dans la zone d'étude pour les périodes futures. Cette hausse dénote une expansion possible dans l'avenir de la production de maïs et de soja dans des régions qui ne s'y prêtent pas actuellement, étant donné l'absence d'unités thermiques et la brièveté de la saison de croissance. En outre, les rendements pourraient également croître dans des régions appropriées à ce type de cultures, mais où les indices thermiques sont présentement inférieurs aux niveaux optimaux. On peut également s'attendre à une hausse des rendements moyens du maïs et du soja lorsque les unités thermiques de croissance (UTC) de ces cultures atteindront environ 3 500 UTC, mais il est probable aussi que les rendements moyens plafonnent, deviennent plus variables, ou qu'ils baissent même à des niveaux UTC plus élevés alors que les conditions du sol et l'humidité présente dans le sol s'avèrent des facteurs limitatifs de plus en plus importants. Les valeurs médianes indiquent que les valeurs UTC pourraient dépasser les 5 200 unités d'ici 2070-2099 dans les régions les plus chaudes près de Windsor, en Ontario. Quant à la durée de la saison de croissance pour le maïs-grain, les valeurs médianes passent de 135 à 149 jours dans le climat présent à environ 165 à 194 jours pour la période de 2070 à 2099 pour une large portion des principales zones agricoles du sud de l'Ontario et du Québec.

Il est peu probable que les augmentations prévues des unités thermiques (degrés-jours de croissance effectifs ou DJCE) pour les petites céréales du printemps ne favorise des rendements plus élevés de ces cultures. En fait, selon une étude antérieure, les données sur les rendements moyens des essais de variétés effectués dans l'est du Canada montrent que les rendements ont légèrement tendance à diminuer dans les zones ayant des DJCE plus élevés. Les unités thermiques pour les plantes fourragères (degrés-jours de croissance supérieurs à 5 °C, ou DJC) augmentent généralement à 1 000-1 200 DJC pour la période de 2070 à 2099, et la durée de la saison de croissance est de 30 à 45 jours plus longue dans les principales zones agricoles de l'Ontario et du Québec. Si l'on présume que l'apport d'humidité et que le taux de survie en

hiver sont appropriés, les augmentations des unités thermiques pourraient favoriser l'accroissement des rendements de la luzerne de l'ordre de 2 à 4 t/ha, en permettant des coupes additionnelles.

Les déficits hydriques moyens accumulés pendant les périodes de croissance des plantes fourragères et des petites céréales du printemps présentent relativement peu de changements (précipitations retranchées de l'évapotranspiration potentielle, ou $ÉP - P$). Cela s'explique en grande partie par le fait que l'évaporation potentielle et les précipitations devraient connaître une hausse dans les périodes futures. Il est à noter que les déficits ne s'accumulent qu'au cours de la période où l' $ÉP$ est supérieure aux P pour les périodes futures, mais cette hausse se limite généralement à une seule catégorie de déficit, soit 50 mm pour les valeurs médianes. Les conditions qui régissent les déficits dans la zone étudiée demeurent très similaires pour les périodes présentes et futures. Les déficits les plus importants sont indiqués dans une zone de l'est de l'Ontario et une région située au nord-ouest de Kapuskasing. Les changements qui touchent les valeurs médianes de l'indice d'aridité dénotent une augmentation de près de 50 mm de la demande en eau aux fins d'irrigation qui est dépassée une année sur dix (soit à un niveau de probabilité de 10 %) dans la plupart des régions, en présumant une capacité de rétention d'eau du sol de 150 mm.

INTRODUCTION

Des changements climatiques sont projetés pour le prochain siècle en raison de l'augmentation constante des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone (CO₂) et d'autres gaz à effet de serre (GES). Des concentrations de CO₂ en hausse de 90 % à 250 % par rapport aux niveaux pré-industriels sont actuellement prévues d'ici la fin du XXI^e siècle (GIEC, 2001). Il est donc probable que les changements climatiques qui en découleront aient des impacts significatifs sur l'agriculture. Aussi, la présente étude a-t-elle été entreprise dans le but d'examiner les incidences potentielles des changements climatiques prévus d'ici la fin du siècle pour le sud de l'Ontario et du Québec sur les indices agroclimatiques importants pour l'agriculture. Il est nécessaire de documenter les impacts des changements climatiques sur les ressources agricoles afin que les décideurs puissent s'adapter à tout accroissement des risques et tirer profit de toute répercussion positive qui pourrait en résulter (C-CIARN, 2001)

Les scénarios de changements climatiques utilisés dans les évaluations des impacts sont fondés sur les résultats des simulations de multiples modèles de circulation générale (MCG). Le GIEC recommande à dessein l'intégration de plusieurs scénarios dans l'évaluation des impacts de façon qu'ils puissent englober un vaste éventail de climats futurs possibles, plutôt que de recourir à un seul scénario de la « valeur la plus probable » (GIEC, 2001). Dans le cadre de l'étude, nous avons élaboré des scénarios de climats futurs qui reposent sur les sorties de onze modèles de circulation générale (MCG). Néanmoins, il convient de noter que les analyses ne tiennent pas compte des incertitudes liées à des facteurs additionnels, tels que les différents scénarios des émissions de GES et les diverses méthodes utilisées pour réduire à une échelle fine les données extraites des grilles à larges mailles des MCG.

DONNÉES ET PROCÉDURES

Donnée climatologiques de référence

Les données climatologiques de référence ayant servi aux fins de l'étude sont les moyennes mensuelles sur 30 ans des températures moyennes quotidiennes minimales et maximales et des précipitations totales, de 1961 à 1990, qui ont été interpolées à partir des données disponibles des stations (Environnement Canada, 1994) sur une grille de 500 secondes d'arc (soit environ 10 à 15 km), comme le décrit Bootsma *et al.* (2001). Les données rectangulaires ont été élaborées par D. McKenney, du Service canadien des forêts, de Sault Ste Marie, à l'aide du modèle altimétrique numérique (MAN) et d'une technique de lissage de surface par fonction spline « plaque mince » incorporée au progiciel ANUSPLIN (Hutchinson, 2000). Ces données (500 secondes d'arc) peuvent être téléchargées à partir du site Web Scénarios canadiens de répercussions climatiques (CCIS, 2002). Pour les fins de la présente étude, nous n'avons choisi que les points de grille situés environ entre le 42^e degré et le 50^e degré 5 minutes de latitude nord et le 68^e degré et le 86^e degré de longitude ouest. Ces points déterminent une zone géographique qui contient la plupart des terres appropriées à l'agriculture en Ontario et au Québec.

Scénarios de changement climatique

Les écarts mensuels moyens des températures de l'air maximales et minimales et du pourcentage des précipitations pour les trois périodes futures (2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099) fondés sur les valeurs de 1961 à 1990 proviennent du site Web Scénarios canadiens de répercussions climatiques pour onze

simulations différentes des modèles de circulation générale. Le choix des périodes a été déterminé par le critère d'accès facile aux données s'y rattachant à partir du site Web du CCIS, alors que celui du modèle repose sur la capacité de fournir un éventail approprié de données et de disposer des trois variables pour les trois périodes futures. Les simulations des modèles de circulation générale aux fins de la présente étude sont énumérées au tableau 1. Tous les scénarios des MCG sont fondés sur ce que l'on connaît comme le scénario d'émissions IS92a, qui était le seul scénario disponible sur le site Web du CCIS au moment où l'étude a été entreprise. Dans ce scénario d'émissions, le forçage induit par les gaz à effet de serre (GES) repose sur les concentrations de GES observées jusqu'en 1990 environ et sur une hausse de près de 1 % par année jusqu'en 2100. Grosso modo, cela représente l'équivalent d'un accroissement de 54 % des concentrations de CO₂ d'ici 2025, un doublement des concentrations d'ici 2050 et une augmentation de plus du triple des concentrations d'ici 2100, en comparaison avec les valeurs de 1980 (CCmaC, 2002).

Tableau 1. Sélection des MCG et des simulations utilisés aux fins de l'étude.

N ^o	Modèles de circulation générale	Passé de simulation
1	MCCG1 [†]	GA1 – 1 ^{ère} simulation de gaz à effet de serre AVEC aérosols
2	MCCG1	GA3 – 3 ^e simulation de gaz à effet de serre AVEC aérosols
3	MCCG1	GG1 – 1 ^{ère} simulation de gaz à effet de serre uniquement
4	MCCG2 [‡]	GA2 – 1 ^{ère} simulation de gaz à effet de serre AVEC aérosols
5	MCCG2	GA2 – 2 ^e simulation de gaz à effet de serre AVEC aérosols
6	HadCM2*	GA1 – 1 ^{ère} simulation de gaz à effet de serre AVEC aérosols
7	HadCM2	GA1 – 2 ^e simulation de gaz à effet de serre AVEC aérosols
8	HadCM2	GA1 – 4 ^e simulation de gaz à effet de serre AVEC aérosols
9	HadCM2	GG1 – 1 ^{ère} simulation de gaz à effet de serre uniquement
10	HadCM2	GG1 – 4 ^e simulation de gaz à effet de serre uniquement
11	ECHAM4**	GG1 – 1 ^{ère} simulation de gaz à effet de serre uniquement

[†] Modèle couplé de circulation générale de première génération du Centre canadien de modélisation et d'analyse climatiques.

[‡] Modèle couplé de circulation générale de deuxième génération du Centre canadien de modélisation et d'analyse climatiques.

* Modèle couplé de circulation générale de deuxième génération conçu au Hadley Centre, à Bracknell, au Royaume-Uni.

** Modèle couplé de circulation générale mis au point par le Max-Planck-Institut für Meteorologie and Deutsches Klimarechenzentrum, à Hambourg, en Allemagne.

Les champs modifiés des moyennes mensuelles (valeurs des écarts de température, pourcentage des précipitations de 1961 à 1990 convertis en ratios) de chaque simulation des MCG ont été interpolés sur une grille de 500 secondes d'arc suivant une procédure semblable à celle décrite par Bootsma *et al.* (2001). Le programme SPLINA du progiciel ANUSPLIN a été exécuté en utilisant uniquement X et Y (latitude et longitude) comme des variables splines indépendantes. Seuls les points de grille des MCG se situant entre le 38° degré 5 minutes et le 58° degré de latitude nord et le 52° degré et le 98° degré de longitude ouest ont été choisis aux fins de cette interpolation. Le choix de ce sous-ensemble a fourni des configurations spatiales

beaucoup plus réalistes pour la zone d'étude que si l'on avait utilisé des points de grille couvrant une plus large superficie (soit l'ensemble du Canada). Le programme LAPPNT du progiciel ANUSPLIN a servi à calculer les valeurs de chaque variable pour les points de grille englobant des régions terrestres de l'Ontario et du Québec et situés approximativement entre le 41° degré 5 minutes et le 50° degré 5 minutes de latitude nord et le 68° degré et le 86° degré de longitude ouest (que l'on définit comme la « zone d'étude »). Les valeurs modifiées ont ensuite été appliquées aux valeurs de 1961 à 1990 pour construire les données rectangulaires des précipitations et des températures de l'air moyennes mensuelles minimales et maximales pour les trois périodes futures.

Calcul et cartographie des indices agroclimatiques

Des indices agroclimatiques, dont la liste fig. au tableau 2, ont été calculés à partir des données moyennes mensuelles de la température et des précipitations. À l'aide d'une technique d'interpolation sinusoidale (Brooks, 1943), on a généré les températures moyennes quotidiennes minimales et maximales à partir des valeurs mensuelles, puis les indices ont été déterminés à partir des valeurs moyennes quotidiennes. Les moyennes quotidiennes pour les précipitations ont été établies en divisant la valeur mensuelle par le nombre de jours dans le mois. Les procédures utilisées dans le calcul de bon nombre de ces indices sont décrites en détail dans une publication précédente (Bootsma *et al.* 2001).

Les valeurs moyennes quotidiennes des UTC ont été calculées d'après la méthode de Brown et Bootsma (1993), à l'aide des formules suivantes :

$$\begin{aligned} Y_{\max} &= 333 (T_{\max} - 10,0) - 0,084 (T_{\max} - 10,0)^2 & (\text{si } T_{\max} < 10,0, Y_{\max} = 0,0) \\ Y_{\min} &= 1,8 (T_{\min} - 4,44) & (\text{si } T_{\min} < 4,44, Y_{\min} = 0,0) \end{aligned}$$

où Y_{\max} et Y_{\min} sont les paramètres qui entrent dans le calcul des UTC et dont la valeur est déterminée par les moyennes quotidiennes des températures de l'air maximales (T_{\max}) et minimales (T_{\min}) respectivement.

Alors, la valeur quotidienne moyenne des UTC = $(Y_{\max} + Y_{\min}) / 2,0$

Les valeurs saisonnières (UTC_{norm}) ont été calculées en cumulant les valeurs quotidiennes moyennes des UTC observées à partir des dates de début moyennes jusqu'aux dates de fin moyennes. Les dates de début ($UTC_{\text{Début}}$) sont basées sur la date où la moyenne quotidienne de température (T_{moy}) est supérieure à 12,8 °C au printemps. Cette date correspond assez bien à la date d'ensemencement moyenne du maïs dans la région (Bootsma *et al.*, 1999). Les dates de fin (UTC_{Fin}) correspondent de près à la date où la valeur quotidienne moyenne de la température minimale est égale ou inférieure à 6,5 °C à l'automne, ce qui est très proche de la date à partir de laquelle le risque de gel meurtrier (-2 °C) atteint une probabilité de 10 % dans la région (Bootsma *et al.*, 1999). Les valeurs moyennes des UTC cumulées établies à partir des normales (UTC_{norm}) ont été ajustées à l'aide de deux algorithmes de régression pour estimer les UTC moyennes calculées à partir des données climatiques quotidiennes. Ces algorithmes ont été définis par les valeurs des UTC_{moy} calculées à partir des valeurs quotidiennes des températures de l'air minimales et maximales à certains endroits en Ontario (équation 1) et au Québec (équation 2) (Bootsma *et al.*, 1999). L'équation 1 a été utilisée pour les points de grille situés entre le 75° degré et le 86° degré de longitude ouest et l'équation 2, pour les points de grille situés entre le 68° degré et le 75° degré de longitude ouest.

$$UTM_{\text{moy}} = 157,45 + 0,9194 * UTM_{\text{norm}} \quad (R^2 = 0,99; \text{ ETE} = 31,9) \quad (\text{éq. 1})$$

$$UTM_{\text{moy}} = 177,82 + 0,91502 * UTM_{\text{norm}} \quad (R^2 = 0,99; \text{ ETE} = 47,6) \quad (\text{éq. 2})$$

Au Canada, les unités thermiques du maïs (UTM) (ou de croissance) sont utilisées comme des indices de mesure de l'adéquation du climat à la production de certains hybrides de maïs et variétés de soja dans chaque région (Brown et Bootsma, 1993; Bootsma et Brown, 1995; Bootsma *et al.*, 1999). Règle générale, les zones où les UTC sont inférieures à 2 300 ne se prêtent pas à la production de maïs-grain ni de soja, quoique la culture du maïs à ensilage pourrait être appropriée dans les zones qui présentent un nombre inférieur d'UTC disponibles.

Les valeurs moyennes quotidiennes des DJC supérieures à 5 °C (DJC) ont été calculées à partir des valeurs interpolées des températures moyennes quotidiennes minimales et maximales à l'aide des formules suivantes :

$$T_{\text{moy}} = (T_{\text{max}} + T_{\text{min}}) / 2,0$$

et

$$DJC_{\text{quot.}} = T_{\text{moy}} - 5,0 \quad \text{si } T_{\text{moy}} \text{ est } < 5,0, \text{ alors } DJC_{\text{quot.}} = 0,0$$

Pour obtenir les valeurs saisonnières, les valeurs quotidiennes des DJC ont été additionnées à partir de la date où la valeur de T_{moy} est pour la première fois supérieure à 5 °C au printemps (DSC) jusqu'à la dernière date où la valeur de T_{moy} est supérieure à 5 °C à l'automne (FSC). Ces dates définissent normalement la période de croissance des cultures fourragères vivaces (Chapman et Brown, 1978).

Les degrés-jours de croissance effectifs (DJCE) supérieurs à 5 °C sont une modification des DJC qui compense l'effet des jours plus longs aux latitudes boréales (au nord du 49° degré nord) sur la croissance des petites céréales du printemps. Les DJCE sont cumulés sur une période plus courte que les DJC, qui commence dix jours après le début de la saison de croissance (DSC) et se termine à la date moyenne estimée du premier jour de gel à l'automne (0 °C). Les DJCE sont un important critère de classification pour déterminer si des terres se prêtent bien à la culture de petites céréales du printemps (Agronomic Interpretations Working Group, 1995).

Les déficits hydriques quotidiens (DEFICITS 1, 2 et 3) sont déterminés en soustrayant les précipitations quotidiennes moyennes (P) de l'évapotranspiration potentielle (ÉP), dont les valeurs sont cumulées au cours des périodes indiquées au tableau 2. L'ÉP est estimée à partir des valeurs moyennes quotidiennes des températures de l'air minimales et maximales et du rayonnement solaire au sommet de l'atmosphère à l'aide des techniques décrites dans Baier and Robertson (1965) et Baier (1971).

Quant au DEFICIT 3, l'écart entre les valeurs moyennes quotidiennes de l'évaporation potentielle (ÉP) et des précipitations (P) n'est cumulé que pendant un certain nombre de jours où l'ÉP est supérieure aux P. Cela donne des déficits plus importants que le DEFICIT 1 et le DEFICIT 2, puisque les calculs ne tiennent pas compte des périodes au printemps et à l'automne au cours desquelles il est possible que les précipitations moyennes quotidiennes soient supérieures à l'ÉP et qu'il y ait une recharge de l'humidité des sols.

L'indice d'ARIDITÉ a été initialement mis au point par Sly (1982) et Shields and Sly (1984). De la même manière que les exigences en matière d'irrigation, cet indice est déterminé au moyen d'une technique de bilan hydrique quotidien décrite dans l'étude de Baier and Russelo (1968), qui consiste à ajouter l'eau d'irrigation lorsque l'humidité disponible dans les sols connaît une diminution de 50 % de la capacité de rétention d'eau disponible (CRED) et une évaporation s'ensuit au rythme potentiel (c'est-à-dire selon un facteur

d'utilisation non rationnelle = 1,0). Cet indice a été utilisé comme principal outil de classification dans le Système canadien de classification des sols (Comité d'experts sur la prospection pédologique, 1991) et a également servi à caractériser les déficits hydriques des sols pour les cultures fourragères vivaces (De Jong *et al.*, 1991).

Tableau 2. Liste des indices agroclimatiques calculés et cartographiés pour la zone d'étude.

Fig.	Indice	Définition
2	UTC	Unités thermiques du maïs (de croissance)
3	UTC_Début	Date de début du cumul des UTC
4	UTC_Fin	Date de fin du cumul des UTC
5	UTC_DuSC	Durée de la saison de croissance pour le maïs-grain (en jours)
6	DJC	Degrés-jours de croissance supérieurs à 5 °C
7	DSC	Date de début du cumul des DJC
8	FSC	Date de fin du cumul des DJC
9	DuSC	Durée de la période de cumul des DJC (en jours)
10	DJCE	Degrés-jours de croissance supérieurs à 5 °C
11	DJCE_Fin	Date de fin du cumul des DJCE
12	DuSC 2	Durée de la période de cumul des DJCE (en jours)
13	DEFICIT 1	Cumul des déficits hydriques quotidiens (ÉP-P) pendant la DuSC (en mm)
14	ÉP 1	Cumul de l'évaporation potentielle (ÉP) pendant la DuSC (en mm)
15	PRÉCIP 1	Cumul des précipitations (P) pendant la DuSC (en mm)
16	DEFICIT 2	Cumul des déficits hydriques quotidiens (ÉP-P) pendant la DuSC 2 (en mm)
17	ÉP 2	Cumul de l'évaporation potentielle pendant la DuSC 2 (en mm)
18	PRÉCIP 2	Cumul des précipitations (P) pendant la DuSC 2 (en mm)
19	DEFICIT 3	Valeurs positives des déficits hydriques quotidiens (ÉP-P) cumulées pendant la DuSC (en mm)
20	ARIDITÉ	Indice d'aridité pour les sols ayant une capacité de rétention d'eau disponible de 150 mm, niveau de probabilité de 10 % (en mm)

Les données publiées par Coligado *et al.* (1968) pour des stations climatiques individuelles ont servi à établir un lien entre les valeurs d'ARIDITÉ déterminées par la gestion journalière du DEFICIT 3, d'une manière semblable à celle décrite par Sly and Coligado (1974). Il était nécessaire de dégager ce lien puisque les données disponibles pour chaque point de grille étaient des normales sur 30 ans et non des données quotidiennes. Les coefficients suivants ont été déterminés par des analyses de régression séquentielle :

$$\text{ARIDITÉ (mm)} = -47,0 + 1,3270 * (\text{DEFICIT 3}) - 0,0007966 * (\text{DEFICIT 3})^2 \quad (1)$$

L'équation (1) repose sur des données provenant de 55 emplacements (N = 55), comporte un coefficient de détermination (R^2) de 0,82 et un écart-type d'estimation (ETE) de 5,09 mm. La fig. 1 illustre cette équation, de même que les points de données utilisés dans les analyses de régression.

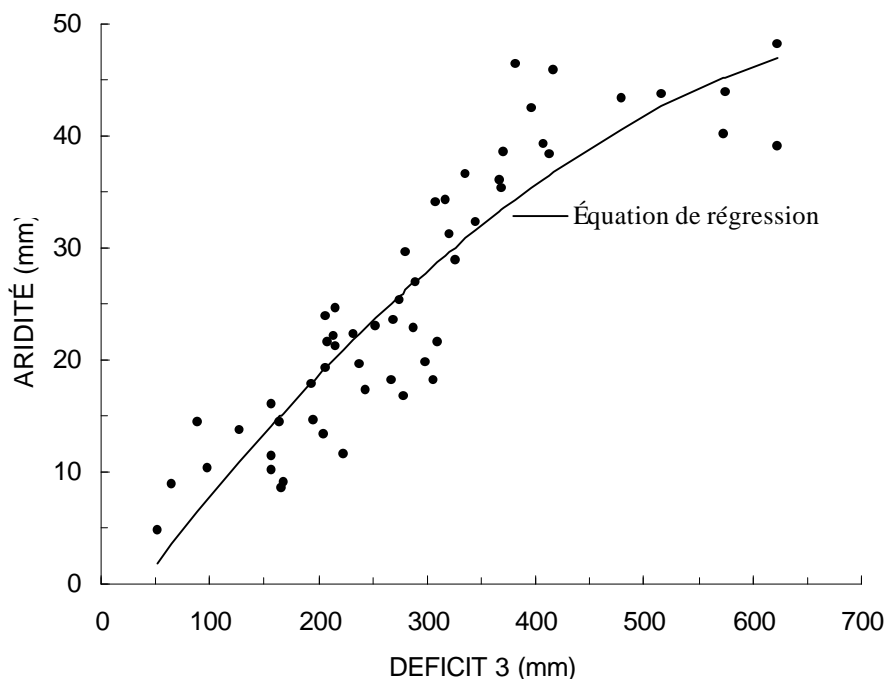


Fig. 1. Représentation de l'indice d'ARIDITÉ (CRED de 150 mm, probabilité de 10 %) par rapport aux valeurs du DEFICIT 3 et à l'équation de régression correspondante (1).

L'équation 1 a ensuite été utilisée dans le calcul des valeurs d'ARIDITÉ à partir du DEFICIT 3. Ces valeurs s'appliquent aux sols ayant une capacité de rétention d'eau disponible de 150 mm (CRED) à un niveau de probabilité de 10 % (c'est-à-dire que les valeurs sont dépassées une année sur dix). Des équations similaires pourraient être formulées pour des sols ayant une capacité de rétention d'eau et des seuils de probabilité différents. Il faut cependant être prudent dans l'utilisation de l'équation (1) avec les valeurs du DEFICIT 3 supérieures à 700 mm environ (ou les valeurs d'ARIDITÉ de plus de 500 mm approximativement), puisque ces valeurs ne font pas partie de la plage de données utilisée pour étalonner l'équation. Nous avons fait intervenir le DEFICIT 3 avec les variables indépendantes, et nous avons constaté que cela donnait des coefficients de détermination (R^2) plus élevés que lorsque nous utilisons le DEFICIT 1 ou le DEFICIT 2.

Les valeurs moyennes sur 30 ans ont été calculées pour chaque indice pour la période de 1961 à 1990 et pour chacun des onze scénarios des MCG et chacune des trois périodes futures. À partir des onze scénarios, nous avons calculé la valeur médiane, le 90^e (ou le 10^e) percentile et la différence entre le 90^e et le 10^e percentile. La valeur médiane est la valeur centrale parmi les données, avec un nombre égal de valeurs (dans le cas présent, cinq) supérieures et inférieures. Le 90^e et le 10^e percentiles correspondent respectivement à la deuxième valeur la plus élevée et à la deuxième parmi les plus basses, dans les onze scénarios des MCG. Nous avons ensuite élaboré des cartes des moyennes de 1961-1990, ainsi que de la valeur médiane, du 90^e (10^e) percentile et de la différence entre le 90^e et le 10^e percentiles pour chacune des périodes futures et pour chaque indice à l'aide du système d'information géographique ArcView (ESRI, 1996). Les cartes ont par la suite été tracées à l'aide du logiciel Corel Draw et converties en format Adobe pdf. Les percentiles fournissent une indication de l'ampleur de la variabilité entre les divers scénarios des MCG utilisés aux fins de la présente étude.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les fig.s 2 à 20 montrent les cartes de chacun des dix-neuf indices énumérés au tableau 2. Chaque fig. contient une carte de la valeur moyenne de l'indice qui repose sur les observations du climat pendant la période de 1961 à 1990. Les valeurs médianes, le 90^e (ou 10^e) percentile et les 90^e – 10^e percentiles d'après les onze scénarios des MCG ont été cartographiés pour chacune des trois périodes futures. Les percentiles donnent une indication de la variabilité introduite par les scénarios des MCG. La légende située dans le coin supérieur gauche des figures s'applique à toutes les cartes, à l'exception de celles des 90^e – 10^e percentiles, qui comportent une légende différente dans le coin supérieur droit de chaque figure. Nous présentons ci-dessous certains points saillants des cartes d'indices.

Unités thermiques du maïs (UTM) (de croissance)

On prévoit une hausse substantielle des UTM moyennes (fig. 2) avec le temps à l'échelle de la zone d'étude, en raison de l'allongement de la saison de croissance et du réchauffement des températures pendant cette saison. Par exemple, dans la portion la plus chaude de l'extrémité sud de l'Ontario, près de Windsor, les UTM qui se situent en moyenne entre 3 400 et 3 700 atteindraient des valeurs supérieures à 5 200 d'ici la période 2070-2099. Ces hausses portent à croire que des zones qui sont actuellement à la limite ou qui ne se prêtent pas à la production de maïs-grain et de soja, étant donné leurs unités thermiques (certaines zones ont moins de 2 300 UTM), deviendront à un certain moment dans l'avenir appropriées à ce type de cultures. De plus, à l'inverse, dans les zones qui se prêtent présentement bien à la production de ces cultures, il est possible que les producteurs soient en mesure de choisir des variétés/hybrides appropriés à une saison de croissance plus longue, ce qui pourrait donner lieu à un accroissement des rendements des cultures dans des conditions thermiques plus propices. Les résultats d'une étude antérieure suggèrent qu'une hausse du potentiel de rendement du maïs-grain et du soja, moyennant un apport d'humidité adéquat, pourrait dépasser 600 et 150 kg ha⁻¹, respectivement, pour chaque augmentation de 100 UTM jusqu'à des moyennes saisonnières d'au moins 3500 UTM (Bootsma *et al.* 2001). Cependant, une étude menée antérieurement sur les rendements moyens du maïs-grain dans la ceinture céréalière des États-Unis suggère que lorsque les UTM disponibles sont supérieures à 3 500 UTM, il est probable que les rendements moyens plafonnent, il se peut aussi qu'ils deviennent plus variables, voire qu'ils diminuent, alors que les conditions du sol et de l'humidité disponible deviendront des facteurs limitatifs de plus en plus importants (Bootsma, 2002, Slide 20).

Les cartes du 90^e – 10^e percentiles indiquent une plus grande variabilité (et donc aussi plus d'incertitudes) dans les UTM moyennes disponibles avec une certaine distance dans l'avenir qui serait le résultat d'une divergence accrue des températures projetées par les MCG. Les écarts de 1 000 à 1 200 UTM entre le 90^e et le 10^e percentiles sont typiques de la plupart des régions du sud de l'Ontario et d'une portion du Québec pour la période 2070 à 2099. Les différences sont légèrement inférieures dans la portion nord-est de la zone d'étude. La simulation effectuée par le modèle allemand (n° 11, tableau 1) présente le réchauffement le plus important de tous les modèles, avec des UTM moyennées pour tous les 4 860 points de grille, et qui atteint 1 745 UTM pour la période de 2070 à 2099. L'un des modèles du Royaume-Uni (n° 8, tableau 1) indique le réchauffement le plus faible, avec une hausse moyenne de 607 UTM uniquement pour la même période comparativement aux résultats pour 1961 à 1990. Ces modèles affichent de façon constante des valeurs extrêmes pour la majeure partie de la zone d'étude, la simulation du modèle allemand étant la plus élevée pour 84 % des points de grille dans la zone d'étude et celle du modèle du Royaume-Uni la plus basse pour 93 % des points. Les simulations du modèle Hadley indiquent des valeurs considérablement plus basses que les simulations des modèles canadiens. Selon l'ensemble des simulations des modèles canadiens,

qui font notamment intervenir les aérosols (n^{os} 1, 2, 4 et 5, tableau 1), d'ici la période 2070-2099, les UTM moyennes connaissent une hausse de l'ordre de 814 UTM, tandis que la moyenne pour les simulations des modèles du Royaume-Uni, qui incluent également les aérosols (n^{os} 6, 7 et 8), est de 415 UTM. Les simulations sans aérosols présentent un réchauffement plus important, hormis l'unique simulation d'un modèle canadien (n^o 3) qui affiche une hausse de 1 039 UTM et des simulations des modèles du Royaume-Uni (n^{os} 9 et 10) qui montrent une augmentation moyenne de 609 UTM.

Les figures 3 à 5 suggèrent un allongement substantiel de la saison de croissance pour le maïs étant donné les dates d'ensemencement hâtives et celles tardives des récoltes dans des climats plus chauds. La durée de la saison de croissance pour le maïs-grain dans une large portion du sud de l'Ontario et une partie du Québec devrait passer de 135 à 149 jours environ dans le climat actuel à près de 165 à 194 jours d'ici 2070-2099, puisque les dates de plantation, de la mi-mai environ, sont devancées à la mi-avril, et les dates de gel meurtrier sont repoussées de la fin septembre/début octobre à la fin octobre/début novembre.

Degrés-jours de croissance supérieurs à 5 °C (DJC)

Les caractéristiques qui sous-tendent les augmentations des DJC pour les périodes futures (fig. 6) sont très semblables à celles que présentent les UTC. On attribue à une large portion de la région terrestre de l'Ontario et du Québec qui renferme des sols se prêtant aux cultures en champs (Inventaire des terres du Canada, 1975) des DJC de 1 750 à 2 250 pour la période de référence. Les valeurs médianes pour les mêmes régions se situent généralement dans la plage de 2 250 à 3 000 DJC pour la période de 2040 à 2069 et de 2 750 à 3 500 DJC pour 2070 à 2099.

Un allongement significatif de la saison de croissance est projeté pour les plantes fourragères vivaces (figures 7 à 9). La saison de croissance commence généralement (DSC) du début à la mi-avril pour la période de référence et du début à la fin mars pour la période de 2070 à 2099 (fig. 7) dans les principales régions agricoles de la zone d'étude. Toutefois, les différents modèles MCG projettent une plage de valeurs plus étendue dans la partie la plus au sud de l'Ontario, par exemple, les valeurs se situeront entre le 90^e et le 10^e percentiles pendant plus de 39 jours. La fin de la saison de croissance (FSC) arrive plus tard, soit autour de la fin octobre et de la mi-novembre pour la période de référence et du milieu à la fin novembre pour la période de 2070 à 2099 (fig. 8). Le changement du moment de la fin de la saison de croissance est plus négligeable que celui du début, étant donné que les MCG projettent un réchauffement nettement plus élevé à la fin de l'hiver/début du printemps plutôt qu'à l'automne. La variation des dates moyennes de FSC prévue par les scénarios des MCG est aussi significativement moins importante en comparaison avec le DuSC.

Il appert que les caractéristiques du réchauffement le plus important et le moins important prévu par les différents modèles MCG pour les DJC concordent avec celles des UTC. La simulation des modèles allemands (n^o 8, tableau 1) montre une hausse moyenne de 1 182 DJC d'ici 2070-2099 et présente la valeur la plus élevée parmi les onze simulations des modèles MCG pour 99,8 % des points de grille. De même, la simulation n^o 8 d'un modèle du Royaume-Uni accuse l'augmentation moyenne la plus basse pour tous les points de grille, soit 393 DJC, et la valeur la plus basse pour 98,5 % des points de grille.

La durée de la saison de croissance (DuSC) pour les plantes fourragères vivaces est généralement de 180 à 225 jours pour la période de référence dans les principales régions agricoles et de 210 à 270 jours pour la période de 2070 à 2099, soit une hausse d'environ 30 à 45 jours de la DuSC (fig. 9).

L'augmentation prévue des DJC et de la DuSC pour les plantes fourragères vivaces entraînera probablement un accroissement significatif du rendement potentiel des cultures fourragères, tels que la luzerne. Par exemple, dans certaines régions de l'Ontario, avec des DJC de 1 500, on pratique

actuellement deux coupes de luzerne, il est probable que le nombre de coupes passe à trois d'ici 2040-2069 et peut-être à quatre d'ici 2070-2099, d'après les valeurs médianes des DJC et moyennant un apport adéquat d'humidité. Une coupe additionnelle de luzerne pourrait stimuler les rendements potentiels sans créer de tension hydrique (p. ex. dans un contexte d'irrigation). Les rendements pourraient connaître une hausse d'au moins 4 tonnes/ha et de 2 à 3 tonnes/ha dans des conditions de cultures sèches (Bootsma *et al.*, 1994). Toutefois, le changement que connaissent les rendements dans les scénarios de climats futurs dans ce type de conditions pourraient également influencer sur les changements de l'apport d'humidité, notamment pour les plantes fourragères récoltées après une première coupe (voir la discussion suivante sur les déficits hydriques).

Degrés-jours de croissance effectifs supérieurs à 5 °C (DJCE)

Les conditions de changement anticipées pour les DJCE (fig. 10) sont très semblables à celles des DJC, bien que les valeurs absolues soient légèrement plus basses en raison de la durée de la saison de croissance pour les DJCE. Aucune carte ne montre les dates moyennes du début de la période de cumul des DJCE, puisque leurs caractéristiques sont identiques à celles des DJC, quoique les valeurs absolues soient différées de 10 jours. Les dates moyennes de la fin de la période de cumul des DJCE (fig. 11) se situent généralement autour de la fin septembre à la mi-octobre dans la plupart des régions agricoles pour la période de référence, et elles devraient être décalées autour de la mi-octobre ou du début novembre d'ici 2070-2099. Parmi les variations que présentent les dates de fin d'un scénario MCG à l'autre, les plus importantes touchent la portion nord-ouest de la zone d'étude, contrairement aux dates de début au printemps qui montrent la plus grande variation dans les portions les plus au sud de l'Ontario (figures 3 et 7). Ainsi, en raison de ces changements de dates de début et de fin de la période de cumul des DJCE, la durée de la saison de croissance au cours de laquelle les DJCE sont additionnés (DuSC 2) augmente généralement de près de 40 à 55 jours d'ici 2070-2099 (fig. 12).

Les DJCE ont été élaborés comme outil principal de classification pour déterminer l'aptitude de zones terrestres à la production de petites céréales du printemps (Agronomic Interpretations Working Group, 1995). Néanmoins, les résultats d'une étude antérieure (Bootsma *et al.*, 2001) suggèrent qu'il est peu probable qu'une augmentation des DJCE, comme l'indique la figure 10, n'entraîne un accroissement des rendements de l'orge dans des régions avec des DJCE d'au moins 1 300 dans le climat actuel (de référence). En fait, la tendance indique plutôt une légère baisse des rendements de l'orge avec des DJCE plus élevés, en raison de la diminution des échanges nets de dioxyde de carbone à des températures plus élevées, d'un rythme accéléré de croissance (période de croissance plus courte) et des probabilités d'une plus grande prolifération des maladies (Bootsma *et al.*, 2001). Toutefois, il est possible que cette tendance soit compensée par l'effet direct des concentrations atmosphériques accrues de CO₂ dans les climats futurs, accroissement qui favorise une activité photosynthétique plus intense dans la culture de l'orge (Bootsma *et al.*, 2001). Dans les zones limites situées dans le nord où la durée de la saison de croissance permet à peine la culture de petites céréales du printemps, il est possible que l'augmentation projetée des DJCE et de la DuSC 2 améliore la capacité de production en assurant la maturation des petites céréales du printemps bien avant le gel et leur récolte avant l'arrivée du temps inclément d'automne, qui peut entraîner des pertes de récolte significatives. Cependant, la portion des terres ainsi touchée serait négligeable par rapport à l'ensemble du territoire agricole de la zone étudiée.

Déficits hydriques

Les déficits hydriques cumulés au cours de la saison de croissance des plantes fourragères vivaces (DEFICIT 1) devraient demeurer très similaires pour les scénarios futurs (fig. 13). L'écart des déficits varie

d'une valeur élevée d'environ 150 à 200 mm dans des régions de l'Ontario situées au nord-est de Peterborough et au nord-ouest de Kapuskasing à moins de -250 mm (surplus) dans des régions situées au nord de la ville de Québec. Ces régimes se maintiennent pour les trois périodes futures. L'évaporation potentielle (fig. 14) et les précipitations (fig. 15) cumulées au cours de la saison de croissance devraient connaître une hausse (en partie à cause de l'allongement de la DuSC), ne donnant ainsi lieu qu'à des changements mineurs des déficits hydriques (ÉP - P). Toutefois, la variation du DEFICIT 1 d'un scénario MCG à l'autre devient très importante d'ici 2070-2099, notamment dans les régions les plus au sud de l'Ontario (fig. 13), où les valeurs des 90^e – 10^e percentiles sont supérieures à 200 mm. Le gros de cette variation semble attribuable aux différences liées à l'ÉP entre les scénarios MCG, puisque celles-ci dépassent 150 mm dans cette région (fig. 14).

Le fait que les valeurs du DEFICIT 1 montrent peu de changement dans le bilan hydrique au cours de la saison de croissance des plantes fourragères vivaces dans les scénarios des climats futurs ne signifie pas pour autant qu'il n'y aura pas un stress accru dû à l'humidité pendant une partie de la période de croissance des plantes fourragères. Des épisodes de tension hydrique peuvent survenir au milieu de l'été, même si le bilan hydrique pendant l'entière saison de croissance indique un surplus. Les valeurs du DEFICIT 3 sont une meilleure indication du changement attendu pendant les périodes de stress maximal pour les cultures fourragères, puisque ces valeurs ne sont cumulées que lorsque l'évaporation potentielle est supérieure aux précipitations. Il est probable que les épisodes de stress affectent davantage la croissance des plantes fourragères après la première coupe et la croissance des pâturages au milieu de l'été lorsque l'évaporation potentielle est à son maximum.

Les déficits hydriques pour la période de cumul des DJCE (DEFICIT 2) sont généralement un peu plus élevés que pour le DEFICIT 1, étant donné qu'une partie au début du printemps et à la fin de l'automne, lorsque les précipitations ont tendance à dépasser l'évaporation potentielle, n'est pas incluse dans le cumul quotidien (fig. 16). Cependant, les caractéristiques spatiales sont très semblables au DEFICIT 1, et on ne s'attend pas non plus à ce que les valeurs varient beaucoup dans les climats futurs. Les déficits les plus importants sont prévus dans les régions de l'Ontario, au nord-est de Peterborough et au nord-ouest de Kapuskasing. Mais c'est dans la portion sud de la zone étudiée que les valeurs connaîtront la plus grande variation, comme pour le DEFICIT 1. L'évaporation potentielle (ÉP 2) et les précipitations (PRECIP 2) cumulées sont dans les deux cas inférieures en comparaison à ÉP 1 et PRECIP 1, en partie à cause de la période de cumul plus courte (fig. 17 et 18), mais les caractéristiques spatiales et les changements sont très similaires pour les scénarios futurs. Des estimations de ÉP 2 pour la période de 2070-2099 indiquent la variation la plus importante parmi les scénarios MCG dans le sud de l'Ontario et à l'extrémité nord-ouest de la zone étudiée, où les différences entre les 90^e et 10^e percentiles sont supérieures à 150 mm (fig. 17). La variation de PRECIP 2 pour cette période est plus grande dans les régions situées juste à l'est des Grands Lacs (fig. 18). Il convient de noter que les modèles MCG ont été utilisés à une échelle trop large pour incorporer tout effet potentiel des Grands Lacs sur les climats futurs.

Les résultats de travaux antérieurs (Bootsma *et al.*, 2001) laissent entendre que les valeurs moyennes du DEFICIT 2 jusqu'à environ 225 mm n'ont aucune incidence significative sur la moyenne des rendements observés dans les essais sur le terrain dans les conditions climatiques actuelles dans l'est du Canada. Seules une portion de l'est de l'Ontario et une région située au nord-ouest de Kapuskasing devraient présenter des valeurs significativement plus élevées du DEFICIT 2 d'ici 2070-2099, de sorte que les hausses de rendement attribuables à des saisons de croissance plus longues et plus chaudes, seront limitées tout au plus à ces régions. Cependant, la réponse des cultures à des déficits hydriques/aridité accrus dépendra également dans une large mesure des caractéristiques des sols, telles que la capacité de rétention d'eau des sols et de la profondeur de l'enracinement, et ces facteurs doivent être pris en compte dans la projection des changements du potentiel des rendements.

Les cartes du DEFICIT 3 (fig. 19) fournissent des indications quant au changement potentiel de des conditions sèches pendant l'été, puisque seules les valeurs moyennes quotidiennes positives ÉP-P sont cumulées. Contrairement au DEFICIT 1 et au DEFICIT 2, ces valeurs indiquent une augmentation des conditions sèches d'ici 2070-2099, en grande partie à cause des valeurs moyennes quotidiennes plus élevées de l'évaporation potentielle avec le réchauffement, mais possiblement aussi en raison des changements de durée de la période au cours de laquelle l'évaporation potentielle est supérieure aux précipitations. Les changements sont minimes, toutefois, lorsque la différence entre la période 2070-2099 et celle de référence ne dépasse pas la catégorie de déficit 1, soit 50 mm pour les valeurs médianes des MCG dans la plupart des cas. L'écart le plus grand d'un scénario MCG à l'autre est enregistré dans le sud de l'Ontario, près de Windsor, où les différences des percentiles sont supérieures à 150 mm.

Indice d'aridité

Les changements potentiels des valeurs d'ARIDITÉ sont illustrés à la fig. 20. Il s'agit des valeurs pour le niveau de probabilité extrême de 10 %, qui ne sont dépassées qu'une année sur dix environ. Nous avons présumé que la capacité de rétention de l'eau disponible (CRED) était constante (150 mm). Toutefois, si l'on tenait compte des valeurs réelles de la CRED, les caractéristiques spatiales seraient beaucoup plus complexes qu'elles n'apparaissent. Étant donné que les valeurs sont déterminées à partir du DEFICIT 3, la configuration spatiale et les changements temporels sont très similaires à ce qui est montré à la fig. 19. De plus, les résultats indiquent une augmentation de la demande à des fins d'irrigation qui, environ une année sur dix, est supérieure à une catégorie d'ARIDITÉ (50 mm) dans la plupart des régions d'ici 2070-2099. Cependant, selon les projections de deux des onze scénarios des MCG, d'ici 2070-2099, la demande pourrait dépasser près de deux intervalles de catégorie (100 mm), comme le montre la valeur du 90^e percentile.

SOMMAIRE ET CONCLUSIONS

Les changements climatiques projetés par les scénarios des MCG ont une incidence significative sur les indices agroclimatiques qui revêtent une importance pour l'agriculture en Ontario et au Québec. En particulier, les indices thermiques, tels que les unités thermiques de croissance et les degrés-jours de croissance, qui devraient connaître une hausse dans des climats plus chauds. Cela donnera lieu également à un accroissement des rendements potentiels du maïs, du soja et des plantes fourragères, moyennant des conditions d'humidité propices à leur croissance. Il est moins probable, cependant, que les rendements des petites céréales du printemps soient touchés d'une manière positive par les changements prévus du climat.

Les indices liés au bilan hydrique suggèrent un certain accroissement des déficits hydriques et de l'aridité des sols pour les périodes futures, ce qui peut freiner la hausse du potentiel de rendement prévue pour certaines cultures avec l'allongement de la saison de croissance et le réchauffement des températures. Quoi qu'il en soit, les changements projetés pour les déficits hydriques ne sont pas extrêmement importants et sont souvent surpassés par la variation que présentent les divers scénarios des MCG, ce qui laisse croire que les effets des changements climatiques sur l'aridité comportent davantage d'incertitudes que ceux sur les unités thermiques.

Les résultats de l'étude reposent sur les moyennes mensuelles des températures maximales et minimales et les précipitations totales sur 30 ans. Il apparaît nécessaire d'examiner plus à fond les répercussions des changements qui pourraient toucher la variabilité temporelle qui caractérise les indices

agroclimatiques d'une année à l'autre. Cela exigera une analyse des données météorologiques quotidiennes et l'utilisation d'outils de réduction d'échelle, tels que les générateurs de conditions météorologiques et les modèles statistiques de réduction d'échelle pour transposer les changements projetés à une grande échelle par les MCG à des échelles plus fines, ce qui est essentiel dans un contexte agricole. L'étude est également axée sur un nombre limité de scénarios de MCG qui ont tous été conçus à partir du même scénario d'émission de gaz à effet de serre (IS92a). Il sera primordial de mener des travaux additionnels pour explorer la variabilité liée à l'utilisation de scénarios d'émissions plus récents mis au point par le GIEC lorsque les sorties expérimentales des modèles MCG seront disponibles pour ces scénarios.

REMERCIEMENTS

Nous désirons exprimer notre reconnaissance à M. Dan McKenney et au personnel de la section Analyse du paysage et applications, du Centre de foresterie des Grands Lacs, du Service canadien des forêts, de Ressources naturelles Canada, à Sault Ste. Marie, en Ontario, pour leurs travaux qui ont contribué à la génération des normales climatiques mensuelles à une échelle fine et pour la formation dispensée sur l'utilisation du logiciel ANUSLIN.

Nous tenons également à remercier M. Gregorich et R. de Jong, du Centre de recherches de l'Est sur les céréales et oléagineux, à Ottawa, pour leurs excellents commentaires qui ont permis d'améliorer considérablement le document manuscrit.

RÉFÉRENCES

- Groupe de travail sur les interprétations agronomiques. 1995. Système de classification des terres selon leurs aptitudes pour les cultures : 1. La production des céréales de printemps. Révisé par W.W. Pettatiece. Bulletin technique 1995-6F. Centre de recherches sur les terres et les ressources biologiques, Agriculture et Agroalimentaire Canada, Ottawa, 97 pp., 2 cartes.
<http://sis.agr.gc.ca/siscan/publications/manuals/lrsr.html>
- Baier, W. 1971. Evaluation of latent evaporation estimates and their conversion to potential evaporation. Can. J. Plant Sci. 51: 255-266.
- Baier, W. and Robertson, G.W. 1965. Estimation of latent evaporation from simple weather observations. Can. J. Plant Sci. 45: 276-284.
- Baier, W. and Russelo, D.A. 1968. A computer program for estimating risks of irrigation requirements from climatic data. Tech. Bull. 59. Agrometeorol. Sect., Plant Res. Inst., Canada Department of Agriculture. 48 pp.
- Bootsma, A. 2002. A summary of some results of research on the potential impacts of climate change on agriculture in eastern Canada. Presented at: *Climate and Agriculture in the Great Lakes Region: The Potential Impacts and What We Can Do*. Workshop at Michigan State University in East Lansing, Michigan, USA, March 22, 2002.
<http://www.geo.msu.edu/glra/workshop/03agriworkshp/agenda.htm>
- Bootsma, A., Boisvert, J. and Dumanski, J. 1994. Climate-based estimates of potential forage yields in Canada using a crop growth model. Agric. and Forest Meteorol. 67: 151-172.

- Bootsma, A., Gameda, S. et McKenney, D.W. 2001. Adaptation de la production agricole au changement climatique dans le Canada atlantique. Rapport final de l'équipe du projet A214 du Fonds d'action pour le changement climatique. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Centre de recherches de l'Est sur les céréales et oléagineux, Ottawa. http://res2.agr.ca/ecorc/clim/index_f.htm
- Bootsma, A., Tremblay, G. et Filion, P. 1999. Analyses sur les risques associés aux unités thermiques disponibles pour la production de maïs et de soya au Québec. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Direction générale de la recherche, Centre de recherches de l'Est sur les céréales et oléagineux, Ottawa, Bulletin technique, CRECO No de contribution 991396-F. 28 pp. http://res2.agr.ca/ecorc/clim2/index_f.htm
- Bootsma, A. et Brown, D.M. 1995. Analyses de risque sur les unités thermiques disponibles pour la production de maïs et d'autres cultures de saison chaude en Ontario. Agriculture et Agroalimentaire Canada, Direction générale de la recherche, Centre de recherches sur les terres et les ressources biologiques, Ottawa, Bulletin technique 1995-1F, 82 pp. http://res2.agr.ca/ecorc/clim3/index_f.htm
- Brooks, C.E.P. 1943. Interpolation tables for daily values of meteorological elements. Quart. J. Royal Meteorol. Soc. 69:160-162.
- Brown, D.M et Bootsma, A. 1993. Unités thermiques de croissance disponibles en Ontario pour la culture du maïs et d'autres espèces exigeantes en chaleur. Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation de l'Ontario, Fiche technique no. 93-120, Agdex 111/31, 6 pp.
- Inventaire des terres du Canada. 1975. Les possibilités agricoles de sols, la série de cartes 1:1,000,000. Institut de recherche sur les sols, Direction de la recherche, Agriculture Canada et Environnement Canada, Direction générale des terres, Ottawa, Canada.
- C-CIARN. 2001. Risks and Opportunities from Climate Change for the Agricultural Sector. Final report C-CIARN-Agriculture workshop, March 1 and 2, 2001. Canadian Climate Impacts and Adaptation Research Network (C-CIARN) Workshop Steering Committee, Farming Systems Research University of Guelph, Guelph, Ontario. http://www.c-ciarn.uoguelph.ca/documents/2001_Workshop_Report.pdf
- CCmaC, 2002. Concentrations équivalentes en CO₂ utilisées dans les simulations des modèles couplés du CCmaC. Centre canadien de la modélisation et l'analyse climatique, Direction de la recherche climatique, Service météorologique du Canada, Victoria, C.-B., Canada. http://www.cccma.bc.ec.gc.ca/french/data/cgcm/cgcm_forcing.shtml
- CCIS. 2002. Projet canadien des scénarios de répercussions climatiques, Institut canadien d'études climatologiques, Victoria, C.-B. http://www.cics.uvic.ca/scenarios/index.cgi?F_Introduction
- Chapman, L.J. et Brown, D.M. 1978. Les climats du Canada et l'agriculture. Inventaire des terres du Canada. Rapport no 3, révisé 1978. Environnement Canada, Direction générale des terres. 24 p.
- Coligado, M.C., Baier, W. et Sly, W.K. 1968. Analyse des risques climatiques hebdomadaires envisagée au point de vue de l'agriculture et de l'irrigation. Bulletin technique no 17-58, 61-77. Section de l'agrométéorologie, Institut de recherches sur les végétaux, Ministère de l'agriculture du Canada, Ottawa, Ont. 34 p.

- De Jong, R., Bootsma, A., Dumanski, J. and Samuel, K. 1991. Variability of soil water deficiencies for perennial forages in the Canadian prairie region. *Agric. Water Manage.*, 20:87-100.
- Environnement Canada 1994. Données climatiques mensuelles canadiennes et normales 1961-1990 sur CD-ROM, Version 3.0F. Environnement Canada, Service de l'environnement atmosphérique, Downsview, Ontario.
- ESRI. 1996. ArcView GIS, The Geographic Information System for Everyone. Environmental Systems Research Institute, Inc., Redlands, CA 92373 USA.
- Expert Committtee on Soil Survey. 1991. Soil water investigation methods manual. Compiled by R.G. Eilers, Chairman of Soil Water Interest Group, Land Resource Research Centre, Research Branch, Agriculture Canada, Ottawa, Ontario, 29 pp.
- Hutchinson, M.F. 2000. ANUSPLIN Version 4.1 User Guide. Centre for Resource and Environmental Studies, Australian National University, Canberra ACT 0200, Australia.
- GIEC. 2001. Bilan 2001 des changements climatiques : les éléments scientifiques. Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC) <http://www.ipcc.ch/>
- Shields, J.A. and Sly, W.K. 1984. Aridity indices derived from soil and climatic parameters. *Agriculture Canada, Research Branch, Technical Bulletin 1984-14E*, 18 pp.
- Sly, W.K. 1982. Cartes agroclimatiques pour le Canada, données dérivées : limitations imposées par la température et l'eau du sol pour le blé et l'orge de printemps dans quelques régions choisies. *Bulletin technique d'agrométéorologie no 88*, Institut de recherche sur les terres, Agriculture Canada, Ottawa, Ont., 31 p.
- Sly, W.K. and Coligado, M.C. 1974. Agroclimatic maps for Canada - derived data: moisture and critical temperatures near freezing. *Tech. Bull. 81, Agrometeorol. Research and Service, Chemistry and Biology Research Institute, Canada Department of Agriculture, Ottawa, Ont.*, 31 p. + cartes.