

Université de Montréal
Faculté des Arts et des Sciences

Modélisation et analyse des effets, direct et indirect, de l'augmentation du CO₂
atmosphérique sur l'agriculture au Québec

Par
Mustapha El Maayar
Département de Géographie, Université de Montréal
Faculté des Arts et des Sciences

Thèse présentée à la Faculté des Études Supérieures
en vue de l'obtention du grade de
Philosophiæ Doctor (Ph.D.)
en Géographie

Septembre 1998

© Mustapha El Maayar



G
59
U54
1999
V.017

Université de Montréal
Faculté des Arts et des Sciences

Modélisation et analyse des effets directs et indirects de l'augmentation de CO₂
atmosphériques sur l'évolution des glaciers

Thèse

Maurice J. Stieglitz

Département de Géographie, Université de Montréal

Faculté des Arts et des Sciences

Thèse présentée à la Faculté des Études Supérieures

en vue de l'obtention du grade de

Philosophie (Doctorat Ph.D.)

en Géographie

Septembre 1998

Dr. Jacques Etienne



Identification du Jury

Université de Montréal
Faculté des Arts et des Sciences

Cette thèse intitulée:

Modélisation et analyse des effets, direct et indirect, de l'augmentation du CO₂
atmosphérique sur l'agriculture au Québec

Présentée par:

Mustapha El Maayar

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes:

Pierre André	Président du jury
Bhawan Singh	Directeur de recherche
Paul Comtois	Membre du jury
Peter Schuepp	Examineur externe
Gilles Beaudet	Représentant du doyen

Thèse acceptée le 19 Janvier 1999

Sommaire

Cette étude porte sur la modélisation et l'analyse des effets, direct (stimulation de la photosynthèse et réduction de l'évapotranspiration) et indirect (induction d'un changement climatique), de l'augmentation du CO₂ atmosphérique sur la production agricole au Québec. Après une large revue de littérature et une discussion de l'actuelle méthodologie canadienne basée sur le modèle de production de l'organisation des Nations-Unies pour l'agriculture et l'alimentation (modèle FAOm), nous avons opté pour le développement d'un nouveau modèle de culture auquel nous avons nommé de CYSS (Crop Yield Simulation System). La validité de ce dernier a été testée sur dix cultures dont des C₃ et des C₄ aux douze régions agricoles du Québec. La comparaison des rendements moyens observés et simulé, et l'analyse statistique nous montre clairement que CYSS reproduit convenablement les rendements observés et d'une manière plus satisfaisante que le modèle FAOm.

Une évaluation des effets de l'augmentation du CO₂ atmosphérique sur les rendements des cultures a été effectuée par la suite. On constate que le changement climatique projeté par le modèle de circulation générale (MCG) du Centre Canadien du Climat (CCC), pour un doublement de la concentration du CO₂ atmosphérique, pourrait causer une diminution des rendements de toutes les cultures étudiées. Cette diminution pourrait varier entre -10 et -40% selon la culture et la région où elle croît. L'accélération du temps de maturation semble être le principal facteur responsable de cette diminution des rendements et l'emporte largement sur l'effet du stress hydrique. Par ailleurs, l'effet direct de l'augmentation du CO₂ ambiant sur les cultures étudiées est certes positif, mais ne fait qu'atténuer légèrement la diminution des rendements subséquente au changement du climat projeté par le CCC-MCG.

Dans la dernière partie de ce travail, on a tenté d'évaluer le risque associé au changement de la variabilité climatique interannuelle sur la production des cultures. Aucune étude de ce genre

n'a été réalisée à l'échelle canadienne auparavant. Pour la réalisation de cet objectif, CYSS a été couplé avec le générateur stochastique de données météorologiques WXGEN. Les résultats obtenus montrent que d'une part, l'augmentation de la variabilité interannuelle de la température pourrait avoir un effet négatif et que l'augmentation de la variabilité interannuelle des précipitations pourrait avoir un effet positif sur les rendements. D'autre part, le changement relatif des rendements dû à l'augmentation simultanée de la variabilité interannuelle de la température et des précipitations correspond, sensiblement, à la somme des changements relatifs des rendements dus aux effets, séparés, de l'augmentation de la variabilité interannuelle de la température et celle des précipitations.

Mots clés: CO₂, Changement climatique, Variabilité climatique interannuelle, Agriculture, Modélisation, Québec.

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier et témoigner de ma plus grande gratitude envers mon directeur de recherche, le professeur Bhawan Singh, pour la confiance qu'il m'a accordée, de m'avoir accueilli au sein de son équipe, et de toute son aide.

Je remercie les professeurs Peter Foggin (ancien directeur du département de Géographie de l'Université de Montréal) et André Roy (ancien responsable de scolarité du cycle supérieur et actuel directeur) de m'avoir accueilli dans leur département.

Je remercie également les Professeurs Pierre André, Christopher Bryant et Jean-Pierre Thouez, membres du groupe de recherche sur l'adaptation aux changements climatiques du Département de Géographie de l'Université de Montréal pour leur aide et pour leurs discussions constructives.

Je tiens aussi à remercier les professeurs Pierre André, Paul Comtois et Peter Schuepp d'avoir accepté de faire partie du Jury.

Je remercie du fond du cœur tous les membres de ma famille qui m'ont encouragé tout au long de ce travail.

Tous mes remerciements s'adressent également à tous les collègues et amis pour leur disponibilité et leur amitié. Je remercie tout spécialement Salim Dakhias, Carlos Ramirez, Chérif Diop, Stéphane Goyette, Joëlle Pernot, Iken Khadija, Julie Mandeville, Pascale Biron, Caroline Bied, Lorraine Bergeron, Martin Jourdenais, Jean-Marc Zuliani, Thomas Buffin-Bélanger, Marcelin Gangbe, Ihab Salah Hashim, Ali Aït Hsaïn, Mustapha Harafi, Richard Shearmur, Alyn Larouche, Antonio Perfeto et Sara Nanni.

Je remercie aussi Mme Linda Mortsch et M. Brian Mills du Service de l'Environnement Atmosphérique (SEA) d'Environnement Canada à Downsview d'avoir bien voulu me fournir toutes les données climatiques nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Enfin, je remercie Dr Daniel Wilks et son associé de recherche M. Yacov Pachevsky d'avoir bien voulu me passer le code Fortran de WGEN adapté aux études d'impacts des changements climatiques.

Cette recherche a été rendue possible grâce au soutien financier d'Environnement Canada, de la Société Royale du Canada, de la Faculté des Études Supérieures de l'Université de Montréal et du Département de Géographie de l'Université de Montréal.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	iv
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES ABRÉVIATIONS	xi
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
1.1 INTRODUCTION	1
1.2 EFFET DU CLIMAT SUR L'AGRICULTURE	6
1.4 L'AGRICULTURE QUÉBÉCOISE FACE AUX CHANGEMENT DE LA COMPOSITION ATMOSPHÉRIQUE EN CO ₂	10
EFFETS DIRECTS DE LA HAUSSE DE LA CONCENTRATION ATMOSPHÉRIQUE DU CO₂ SUR LES CULTURES	15
2.1 INTRODUCTION	15
2.2 EFFET DE L'AUGMENTATION DU CO ₂ ATMOSPHÉRIQUE SUR LA PHOTOSYNTHÈSE.....	16
2.3 EFFET DE L'AUGMENTATION DU CO ₂ ATMOSPHÉRIQUE SUR L'OUVERTURE STOMATIQUE ET LA TRANSPIRATION.....	19
2.4 EFFET DE L'AUGMENTATION DU CO ₂ ATMOSPHÉRIQUE SUR LA RESPIRATION	22
2.5 EFFET DE L'AUGMENTATION DU CO ₂ ATMOSPHÉRIQUE SUR LA PRODUCTION AGRICOLE	22
2.6 DESCRIPTION DES APPROCHES EXISTANTES POUR L'ESTIMATION DE L'EFFET DU CO ₂ ATMOSPHÉRIQUE SUR LE RENDEMENT DES CULTURES.....	23
2.6.1 <i>Photosynthèse et production de la biomasse</i>	23
2.6.2 <i>Évapotranspiration</i>	27
MODÉLISATION DES EFFETS, DIRECT ET INDIRECT, DE LA HAUSSE DU CO₂ ATMOSPHÉRIQUE SUR LA CROISSANCE ET LE RENDEMENT DES CULTURES:	

DESCRIPTION DU MODÈLE PROPOSÉ, CYSS	29
3.1 INTRODUCTION.....	29
3.2 CALCUL DU TAUX INSTANTANÉ DE LA PHOTOSYNTHÈSE NETTE À L'ÉCHELLE DE LA FEUILLE ...	30
3.3 RÉPONSE PHOTOSYNTHÉTIQUE DES FEUILLES À L'INTENSITÉ LUMINEUSE.....	31
3.3.1 <i>Efficienc e photochimique</i>	32
3.3.2 <i>Capacité photosynthétique des feuilles</i>	34
3.4 DISTRIBUTION ET ABSORPTION DE LA LUMIÈRE PAR LE COUVERT	34
3.5 INTERCEPTION DU RAYONNEMENT PAR LE COUVERT VÉGÉTAL.....	35
3.6 EFFETS DE LA POSITION DE LA FEUILLE À L'INTÉRIEUR DU COUVERT SUR LA CONDUCTANCE AU CO ₂	37
3.7 CORRECTION DU TAUX MAXIMUM DE PHOTOSYNTHÈSE PAR RAPPORT À LA TEMPÉRATURE	39
3.8 CALCUL DE L'ASSIMILATION JOURNALIÈRE NETTE À L'ÉCHELLE DU COUVERT	41
3.8.1 <i>Photosynthèse nette instantanée à l'échelle du couvert (intégration spatiale)</i>	41
3.8.2 <i>Principe de la méthode de Gauss</i>	42
3.8.3 <i>Photosynthèse journalière nette à l'échelle du couvert (intégration temporelle)</i>	44
3.8.4 <i>Respiration</i>	46
3.8.5 <i>Assimilation nette</i>	49
3.8.6 <i>Rendements, potentiel et actuel</i>	49
3.9 CALCUL DU COEFFICIENT DE STRESS HYDRIQUE	50
3.9.1 <i>Calcul de l'évapotranspiration potentielle</i>	50
3.9.2 <i>Calcul de l'évapotranspiration actuelle (EA)</i>	57
VALIDATION DE CYSS ET SIMULATION DES EFFETS, DIRECT ET INDIRECT, DE LA HAUSSE DU CO₂ ATMOSPHÉRIQUE SUR LE RENDEMENT DES CULTURES ..	62
4.1 VALIDATION DE CYSS.....	62
4.2 EFFET DU CHANGEMENT DU CLIMAT SUR LES RENDEMENTS.....	71
4.3 EFFETS DE L'ACCÉLÉRATION DE LA MATURATION ET DU STRESS HYDRIQUE SUR LES RENDEMENTS.....	81
4.4 EFFETS COMBINÉS DU CHANGEMENT DU CLIMAT ET DE L'AUGMENTATION DU CO ₂	

ATMOSPHÉRIQUE SUR LES RENDEMENTS	86
EFFET DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE INTERANNUELLE SUR LE RENDEMENT DES CULTURES	96
5.1 INTRODUCTION.....	96
5.2 DESCRIPTION DU GÉNÉRATEUR DE DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES WXGEN	98
5.3 TEST DE WXGEN.....	100
5.3.1 Sites de l'étude et données climatiques utilisées	100
5.3.2 Analyses effectuées	101
5.3.3 Résultats et discussion	101
5.4 EFFET DU CHANGEMENT DE LA VARIABILITÉ INTERANNUELLE DE LA TEMPÉRATURE ET DES PRÉCIPITATIONS SUR LES RENDEMENTS.....	114
5.4.1 Caractéristiques des sites à l'étude.....	114
5.4.2 Description des scénarios climatiques choisis	114
5.5 RÉSULTATS.....	117
5.5.1 Sensibilité des rendements aux changements moyens des valeurs de la température et des précipitations.....	117
5.5.2 Sensibilité des rendements à VT.....	119
5.5.3 Sensibilité des rendements à VP	124
5.5.4 Sensibilité des rendements aux changements simultanés de VT et VP	136
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	139
RÉFÉRENCES	143
ANNEXE: PROGRAMME CYSS	XV

Liste des tableaux

- Tableau 3.1 Valeurs de l'efficacité photochimique (α) et de la conductance au CO_2 (ϕ) pour différentes positions des feuilles à l'intérieur du couvert végétal.
- Tableau 3.2 Principales quadratures de Gauss.
- Tableau 4.1 Caractéristiques agroclimatiques des douze régions agricoles du Québec.
- Tableau 4.2 Stations météorologiques d'où les normales climatiques (1961-90) ont été prises.
- Tableau 4.3 Valeurs des différents paramètres agronomiques utilisés pour la simulation des rendements.
- Tableau 4.4 Indices des sols (SI) utilisés.
- Tableau 4.5 Valeurs de la faisabilité de la récolte (WP) utilisées.
- Tableau 4.6 Données utilisées pour le calcul des paramètres S et θ . Les nombres entre parenthèses indiquent le nombre d'observations.
- Tableau 4.7 Valeurs estimées de S et θ pour chacune des cultures étudiées, ainsi que les valeurs de θ disponibles dans la littérature.
- Tableau 5.1 Valeurs des probabilités de transitions et des paramètres, de forme et d'échelle, de la loi de probabilité Gamma calculées à partir des données observées.
- Tableau 5.2 Moyennes et amplitudes des harmoniques annuelles des températures, maximale et

minimale, et du rayonnement solaire, calculées à partir des données observées.

Tableau 5.3 Nombre de mois avec une différence statistique significative au seuil de 5%.

Tableau 5.4 Comparaison entre la période sans gel et les degrés jours de croissance (DD_5), observées et simulées.

Tableau 5.5 Sensibilité des rendements moyens (t/ha) et de leurs écarts types aux changements des valeurs moyennes de la température et des précipitations.

Liste des figures

- Figure 1.1 Variation de la température moyenne de la terre et de la concentration atmosphérique du CO₂ et du CH₄ au cours des 160 000 dernières années.
- Figure 1.2 Évolution de la température moyenne annuelle à la surface terrestre entre 1880 et 1997.
- Figure 1.3 Schéma illustrant la procédure générale, habituellement suivie, pour évaluer l'impact des changements climatiques sur l'agriculture.
- Figure 2.1 Représentation schématique de la réponse photosynthétique des plantes C₃ et C₄ à la concentration du CO₂ ambiant. Γ_3 et Γ_4 sont les points de compensation des plantes C₃ et C₄ respectivement.
- Figure 2.2 Réponse photosynthétique de la feuille à la concentration du CO₂ à l'intérieur de la cavité stomatique.
- Figure 3.1 Relation entre la température et la photosynthèse foliaire des cultures C₃ et C₄ adaptées aux régions tempérées.
- Figure 3.2 Relation entre EA/EP et l'humidité du sol.
EA, évapotranspiration actuelle; EP, évapotranspiration potentielle.
- Figure 4.1 Régions agricoles du Québec.
- Figure 4.2 Comparaison des rendements observés et des rendements simulés par CYSS.

- Figure 4.3 Régression entre les rendements observés et simulés par FAOm et CYSS.
- Figure 4.4 Changements projetés par le scénario du CCC-MCG des valeurs mensuelles de la température moyenne aux douze régions agricoles du Québec.
- Figure 4.5 Changements projetés par le scénario du CCC-MCG des valeurs mensuelles des précipitations aux douze régions agricoles du Québec.
- Figure 4.6 Sensibilité des rendements aux changements des valeurs moyennes de la température et des précipitations.
- Figure 4.7 Sensibilité des rendements au scénario du changement climatique projeté par le CCC-MCG et à la combinaison de ce scénario avec l'effet direct de la hausse du CO₂ de 360 à 550 ppm.
- Figure 4.8 Illustration des effets de l'accélération de la période de maturation et du stress hydrique sur les rendements.
- Figure 4.9 Changement relatif des rendements en fonction de l'accélération de la période de maturation ($ISH=1$).
- Figure 4.10 Illustration de la variation du rendement (ΔY) des cultures en réponse à la variation du CO₂ atmosphérique (ΔC).
- Figure 4.11 Changement relatif des rendements des cultures étudiées dû:
i) au changement climatique projeté par le CCC-MCG.
ii) à la combinaison de l'effet du changement du climat projeté par le CCC-MCG et de l'effet direct de l'augmentation du CO₂ ambiant.
Les rendements sont simulés au moyen du modèle FAOm et l'effet direct de

l'augmentation du CO₂ ambiant est introduit selon l'approche empirique d'Okamoto et al. (1991).

- Figure 5.1 Valeurs mensuelles moyennes observées et simulées des températures maximale et minimale, du rayonnement solaire, des précipitations et du nombre de jours humides, à Montréal.
- Figure 5.2 Valeurs mensuelles moyennes observées et simulées des températures maximale et minimale, des précipitations et du nombre de jours humides, à Québec.
- Figure 5.3 Distribution des fréquences des températures maximales et minimales, du rayonnement solaire et des précipitations pour la période Mai-Octobre, à Montréal.
- Figure 5.4 Distribution des fréquences des températures maximales et minimales, et des précipitations pour la période Mai-Octobre, à Québec.
- Figure 5.5 Extrêmes observées et générées des températures maximale et minimale, et des précipitations.
- Figure 5.6 Changement relatif des rendements, à Montréal, en réponse au changement de VT, combiné avec une augmentation de 2°C de la température moyenne (a,b), et avec une augmentation de 4°C de la température moyenne (c,d).
- Figure 5.7 Changement relatif des rendements, à Québec, en réponse au changement de VT, combiné avec une augmentation de 2°C de la température moyenne (a), et avec une augmentation de 4°C de la température moyenne (b,c).
- Figure 5.8 Température moyenne durant la saison de croissance des cultures étudiées.

- Figure 5.9 Changement relatif du CV des rendements, à Montréal, en réponse au changement de VT, combiné avec une augmentation de 2°C de la température moyenne (a, b), et avec une augmentation de 4°C de la température moyenne (c, d).
- Figure 5.10 Changement relatif du CV des rendements, à Québec, en réponse au changement de VT, combiné avec une augmentation de 2°C de la température moyenne (a), et avec une augmentation de 4°C de la température moyenne (b,c).
- Figure 5.11 Changement relatif des rendements, à Montréal, en réponse au changement de VP, combiné avec une augmentation, de 20%, des précipitations moyennes.
a, b : le changement de VP est effectué à travers l'altération de β et de π .
c, d : le changement de VP est effectué à travers l'altération de d.
- Figure 5.12 Changement relatif des rendements, à Montréal, en réponse au changement de VP, combiné avec une diminution, de 20%, des précipitations moyennes.
a, b : le changement de VP est effectué à travers l'altération de β et de π .
c, d : le changement de VP est effectué à travers l'altération de d.
- Figure 5.13 Changement relatif des rendements, à Québec, en réponse au changement de VP, combiné avec une augmentation, de 20%, des précipitations moyennes.
a : le changement de VP est effectué à travers l'altération de β et de π .
b : le changement de VP est effectué à travers l'altération de d.
- Figure 5.14 Changement relatif des rendements, à Québec, en réponse au changement de VP, combiné avec une diminution, de 20%, des précipitations moyennes.
a : le changement de VP est effectué à travers l'altération de β et de π .
b : le changement de VP est effectué à travers l'altération de d.

- Figure 5.15 Changement relatif du CV des rendements, à Montréal, en réponse au changement de VP, combiné avec une augmentation, de 20%, des précipitations moyennes.
a, b : le changement de VP est effectué à travers l'altération de β et de π .
c, d : le changement de VP est effectué à travers l'altération de d.
- Figure 5.16 Changement relatif du CV des rendements, à Montréal, en réponse au changement de VP, combiné avec une diminution, de 20%, des précipitations moyennes.
a, b : le changement de VP est effectué à travers l'altération de β et de π .
c, d : le changement de VP est effectué à travers l'altération de d.
- Figure 5.17 Changement relatif du CV des rendements, à Québec, en réponse au changement de VP, combiné avec une augmentation, de 20%, des précipitations moyennes.
a : le changement de VP est effectué à travers l'altération de β et de π .
b : le changement de VP est effectué à travers l'altération de d.
- Figure 5.18 Changement relatif du CV des rendements, à Québec, en réponse au changement de VP, combiné avec une diminution, de 20%, des précipitations moyennes.
a : le changement de VP est effectué à travers l'altération de β et de π .
b : le changement de VP est effectué à travers l'altération de d.
- Figure 5.19 Changements relatifs, du rendement moyen et de son CV, en réponse aux effets combinés de l'augmentation de la température par 2°C et de VT, et de l'augmentation des précipitations par 20% et de VP.
- Figure 5.20 Changements relatifs, du rendement moyen et de son CV, en réponse aux effets combinés de l'augmentation de la température par 4°C et de VT, et de l'augmentation des précipitations par 20% et de VP.

Liste des abréviations

Acronymes

AHA	Amplitude des harmoniques annuelles
ATP	Adénosine Triphosphate
C _a	Concentration atmosphérique du CO ₂
CAM	<i>Crassulacean Acid Metabolism</i>
C ₃	Plantes de type C ₃
C ₄	Plantes de type C ₄
CCC	Centre Canadien du Climat
CV	Coefficient de variation
CYSS	Crop Yield Simulation System
EPIC	Erosion/Productivity Impact Calculator
FAO	Organisation des Nations-Unies pour l'agriculture et l'alimentation
FAOm	Modèle de culture de la FAO modifié par Stewart (1983)
<i>FSH</i>	Facteur de stress hydrique
GDM	Générateur de données météorologiques
GFDL	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory
GISS	Goddard Institute for Space Studies
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
MAPAQ	Ministère de l'agriculture des pêches et de l'alimentation du Québec.
MCG	Modèle de Circulation Général
NADPH	Forme réduite de l'enzyme Nicotinamide Adénine Dinucléotide Phosphate
OSU	Oregon State University.
PAR	Rayonnement photosynthétiquement actif (400-700 nm)
P-M	Penman-Monteith
PEP	Phosphoenolpyruvate
RUBISCO	Ribulose Bisphosphate Carboxylase/Oxygenase

SIMTAG	SIMulation Tools in Agriculture
STD	Écart-type
SUCROS	Simple and Universal CROp Simulation model
tg	Fonction trigonométrique tangente
VIC	Variabilité climatique interannuelle
VP	Variabilité des précipitations
VT	Variabilité de la température

Variables et constantes

A_L	Assimilation brute de la feuille ($\text{kgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
A_m	Assimilation maximale de la feuille ($\text{kgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
A_n	Assimilation nette ($\text{kgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
b_c	Taux de production brute de biomasse sous un ciel totalement couvert ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)
b_o	Taux de production brute de biomasse sous un ciel clair ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)
B_{gm}	Production potentielle brute de la biomasse ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)
B_n	Production potentielle nette de la biomasse ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)
B_p	Accumulation potentielle de la biomasse ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$)
B_E	Coefficient de conversion de l'énergie en biomasse ($\text{kg} \cdot \text{MJ}^{-1}$)
C_g	Concentration du CO_2 à l'intérieur de la grana
C_p	Chaleur spécifique de l'air à pression constante ($1,004 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
C_T	Coefficient de respiration de maintien
CMRS	Capacité maximale de rétention de l'eau par le sol (mm)
d	Paramètre de persistance
D	Longueur du jour (h)
DD_5	Degrés jours de croissance
DSC	Début de la saison de croissance (d)
$DSCH$	Début de la saison de croissance humide (d)
e_a	Pression de vapeur de l'air (kPa)
e_s	Pression de vapeur saturante (kPa)

e_f	Pression de vapeur au contact de la feuille (kPa)
e_s	Pression de vapeur saturante de l'air (kPa)
E	Évapotranspiration (mm.d^{-1} ou $\text{kg.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$)
E_p	Transpiration de la plante (mm)
E_s	Évaporation du sol (mm)
EA	Évapotranspiration actuelle (mm)
EP	Évapotranspiration potentielle (mm)
F	Fraction du jour où le ciel est totalement couvert
FSC	Fin de la saison de croissance
FSH	Facteur de stress hydrique
h	Heure de la journée
H	Hauteur de la plante (m)
H_{max}	Hauteur maximale de la plante (m)
HS	variation de l'humidité du sol (mm)
HI	Indice de récolte
HU	Accumulation journalière des unités thermiques
HUF	Facteur d'unités thermiques
I_e	Courant électrique (A)
I_a	Énergie (PAR) absorbée par la feuille
I_{PAR}	Rayonnement photosynthétiquement actif incident
ISH	Indice du stress hydrique
J	Jour julien
k	Coefficient d'extinction de la lumière
K_y	Coefficient du rendement
K_{\downarrow}	Rayonnement incident de courtes longueurs d'ondes (W.m^{-2})
$K_{c\downarrow}$	Rayonnement incident de courtes longueurs d'ondes prévu pour un ciel parfaitement clair (W.m^{-2})
K_{\uparrow}	Rayonnement de courtes longueurs d'ondes réfléchi (W.m^{-2})

L	Indice foliaire ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)
L_{\downarrow}	Rayonnement incident de grandes longueurs d'ondes ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
L_{\uparrow}	Rayonnement de grandes longueurs d'ondes émis par la surface ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
L_v	Chaleur latente de vaporisation
LAI	Indice foliaire ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$)
LSC	Longueur de la saison de croissance (d)
N	Temps de maturation (d)
p_{01}	Probabilité d'occurrence d'un jour humide après un jour sec
p_{11}	Probabilité d'occurrence d'un jour humide après un jour humide
P	Précipitation (mm)
$P_{c,i}$	Photosynthèse instantanée du couvert ($\text{kgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
$P_{c,j}$	Photosynthèse journalière du couvert ($\text{kgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)
P_f	Photosynthèse foliaire ($\text{kgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
$P_{f,i}$	Photosynthèse instantanée de la feuille ($\text{kgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
$P_{f,max}$	Photosynthèse maximale de la feuille ($\text{kgCO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)
$P_{t,max}$	Photosynthèse maximale en fonction de la température moyenne durant le jour ($\text{kgCO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)
PHU	Accumulation potentielle des unités thermiques
Q_{10}	Taux d'augmentation de la respiration lorsque la température augmente de 10°C
Q^*	Rayonnement net ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
Q_g^*	Rayonnement net au dessous du couvert végétal ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
Q_g	Flux de chaleur dans le sol ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)
r_a	Résistance aérodynamique au transfert de la chaleur et de la vapeur d'eau par le couvert ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)
r_{af}	Résistance aérodynamique au transfert de la chaleur par la feuille ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
r_{av} / r_{ac}	Résistance de l'air à la diffusion de la vapeur d'eau / CO_2 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
r_{mc}	Résistance du mésophyle à la diffusion du CO_2 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
r_s / r_{sc}	Résistance des stomates à la diffusion de la vapeur d'eau / CO_2 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
R	Ruissellement (mm)

R_e	Résistance électrique (Ω)
R_p	Respiration ($\text{kgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)
RA	Rendement actuel ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$)
RP	Rendement potentiel ($\text{t} \cdot \text{ha}^{-1}$)
RUE	Efficiencé lumineuse ($\text{g} \cdot \text{MJ}^{-1}$)
UTM	Unités thermiques maïs
s	Pente de la courbe saturante ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)
S	Taux maximum d'augmentation du rendement due à l'augmentation du CO_2 ambiant
S_{CC}	Capacité au champ (mm)
S_{DSCH}	Humidité totale du sol en réserve au début de la saison de croissance humide (mm)
S_p	Humidité du sol disponible à la couche racinaire (mm)
S_s	Humidité du sol disponible à la couche de surface (mm)
SI	Indice de la qualité du sol
t	Temps
t_i	Points d'intégration
T	Transpiration de la feuille
T_a / T_{ak}	Température moyenne de l'air ($^\circ\text{C}/\text{K}$)
T_f	Température de la feuille ($^\circ\text{C}$)
T_{max}	Température maximale de l'air ($^\circ\text{C}$)
T_{mdt}	Température moyenne de l'air durant le jour ($^\circ\text{C}$)
T_{min}	Température minimale de l'air ($^\circ\text{C}$)
u	Vitesse du vent ($\text{m} \cdot \text{d}^{-1}$)
V_e	Tension électrique (V)
w_i	Poids d'intégration
WP	Faisabilité de la récolte (Workability)
Γ_c	Point de compensation (ppm)
α	Paramètre de forme de la fonction Gamma
α_e	Efficiencé photochimique

α_a	Albédo de la surface
α_m	Efficience photochimique maximale ($\text{kCO}_2\cdot\text{J}_1$)
β	Paramètre d'échelle de la fonction Gamma (mm)
β_{co}	Coefficient de carboxylation relatif à O_2
$1/\chi$	Photosynthèse maximale sous un éclairement et une concentration du CO_2 maximales ($\text{kgCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
δ	Déclinaison solaire ($^\circ$)
ε	Émissivité de la végétation
ε_c	Efficience climatique
ε_e	Émissivité effective de la surface
ϕ	Conductance stomatique au CO_2 ($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)
γ	Constante psychrométrique ($0,066 \text{ kPa}\cdot\text{K}^{-1}$)
λ	Latitude ($^\circ$)
π	Fréquence des jours humides
θ	Pente de la réponse du rendement au CO_2
ρ_a	Densité de l'air ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
σ	Constante de Stephan-Boltzmann ($5,67\cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$)
τ	Conductance stomatique maximale au CO_2 ($\text{m}\cdot\text{d}^{-1}$)

Symboles chimiques

CFC	Chlorofluocarbones
CH_4	Méthane
CO_2	Dioxyde de carbone
$(\text{CH}_2\text{O})_n$	Carbohydrates
H_2O	Eau
O_2	Oxygène
SO_2	Dioxyde de soufre

unités de mesure

A	Ampère
°C	degré Celcius
d	jour
g	gramme
h	heure
ha	hectare
J	Joule
kg	kilogramme
K	Kelvin
MJ	Méga-Joules
nm	nano-mètre
Pa	Pascal
kPa	kilo-Pascal
ppm	partie par million ($10^{-6} \text{ mol.mol}^{-1}$)
s	seconde
t	tonne
V	Volt
Ω	Ohm

Chapitre I

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1 Introduction

Le climat, tel qu'on l'observe, constitue la synthèse des conditions météorologiques qui prennent effet à l'intérieur de la couche la plus basse de l'atmosphère. Sa quantification se fait à partir de la mesure des éléments météorologiques durant une période de temps, variant du mois à l'année. Les valeurs attendues des éléments météorologiques sont appelées les éléments climatiques, incluant des variables telles que, la température, les précipitations et la nébulosité. Mais, davantage que la simple moyenne mensuelle ou annuelle des valeurs météorologiques, le climat se définit aussi par la variabilité de chacun de ses éléments, comme la température et les précipitations, et par la fréquence à laquelle se manifestent différents types de conditions atmosphériques. De ce fait, tout facteur caractéristique du régime météorologique d'un lieu en particulier ressortit à son climat.

Le climat a un effet direct sur la société et son histoire est inséparable de celle de la vie. Il a modelé le visage de la terre et a toujours pesé sur l'histoire des civilisations. Tant les sociétés humaines, que les écosystèmes naturels, tentent de s'adapter aux caractéristiques climatiques régionales. Notre mode de vie, notre adaptabilité, notre culture, notre économie, et nos sources d'alimentation dépendent en partie du climat. Cependant, tous les éléments climatiques n'ont pas la même importance sur les différentes composantes de la population. Les marins et les pêcheurs sont d'abord intéressés par la vitesse du vent et sa direction, les conducteurs par la présence du gel et du brouillard, et les agriculteurs, entre autres, par la persistance de la sécheresse, la quantité de précipitations, et les degrés jours de croissance. D'une manière plus générale, l'aire de répartition des espèces vivantes est régie par des conditions climatiques données; si ces conditions sont

inadéquates, les espèces ne peuvent prospérer ou risquent de disparaître. La température de l'air et du sol, la nature, l'abondance et la variabilité des précipitations, la force du vent, la quantité de rayonnement solaire et d'autres facteurs climatiques déterminent quelles espèces occuperont une région donnée.

Bien que la notion du climat suppose une continuité et une stabilité à long terme, le climat reste un phénomène très variable dans l'espace et dans le temps. La température de l'air diminue lorsque l'altitude augmente, alors que la vitesse du vent augmente. La température durant la journée est différente de la température durant la nuit. Le climat est donc un système dynamique. Des forces, tant extérieures qu'intérieures sont constamment à l'œuvre pour modifier le fragile équilibre existant au sein de ces composantes et entre elles. Les informations tirées des sédiments terrestres, marins et lacustres, des calottes glaciaires, et même de la végétation attestent clairement que des changements majeurs dans le climat du globe se sont produits dans le passé (Houghton et al., 1990). Elles laissent penser aussi que de tels changements se produiront probablement de nouveau et de manière naturelle dans l'avenir. Cependant, si par le passé les variations climatiques se sont produites de façon naturelle et sur des périodes très longues, les observations récentes (les cents dernières années) laissent penser, de plus en plus, que l'action humaine se traduisant par une émission de plus en plus croissante de gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , CFC...), pourrait avoir une influence sur le système climatique, et causer un réchauffement à l'échelle globale durant les prochaines décennies (Houghton et al., 1995). En effet, en 1958, C. D. Keeling mettait en place la première station d'observation de la concentration atmosphérique du dioxyde de carbone (C_a) à Mauna Loa (Hawaii) (Sadourny, 1994). Pour diverses raisons, l'emplacement de cette station est très bien choisi pour l'estimation de cette concentration. D'abord, Mauna Loa se trouve loin des activités industrielles, des grandes agglomérations, et des régions à fort trafic où la combustion, sous ses diverses formes, injecte dans l'air de grandes quantités de CO_2 . C'est aussi un lieu éloigné des grands écosystèmes végétaux qui, par leurs activités de respiration et de photosynthèse, modulent la C_a suivant la saison. À ces facteurs, s'ajoute la modération du cycle saisonnier permettant une bonne appréciation des variations interannuelles et des tendances à long terme.

Les mesures prises à cette station (Mauna Loa) et l'analyse des bulles d'air contenues dans les glaces du Groenland et de l'Antarctique montrent que depuis la révolution industrielle de la fin du siècle précédent, la C_a a augmenté d'environ 25%, atteignant actuellement 360 ppm environ (Houghton et al., 1995). Deux importantes remarques peuvent alors être faites: 1) un taux de 360 ppm n'a jamais été observé dans le passé (Figure 1.1); 2) l'accroissement du CO_2 depuis l'âge préindustriel correspond aux trois quarts de sa variation naturelle entre un âge glaciaire et un âge interglaciaire (Figure 1.1). Durant la même période, la température moyenne à l'échelle du globe a augmenté d'environ $0,6^\circ C$ à l'échelle globale (Figure 1.2).

Par ailleurs, la reconstitution de la température de l'air à partir des méthodes isotopiques a montré que pendant tout le dernier cycle glaciaire-interglaciaire, l'évolution de la teneur de l'air en CO_2 suit fidèlement tous les accidents de l'évolution de la température (Figure 1.1). C'est notamment cette très forte corrélation entre la variation de la température et la composition chimique de l'atmosphère qui, d'une part, a mené au large consensus selon lequel la tendance au réchauffement du climat à l'échelle globale pourrait bien s'accélérer durant les prochaines décennies, et d'autre part, a incité les scientifiques et les pouvoirs publics à vouloir mieux comprendre le système climatique et ses interactions avec la concentration atmosphérique de gaz à effet de serre afin de prévoir le climat futur, pour une meilleure gestion des ressources. Toutefois, certains scientifiques critiquent fortement l'idée selon laquelle il y aurait un réchauffement climatique durant les prochaines décennies (Newell et Dopplick, 1979; Idso, 1990; Pocklington, 1996), et argumentent qu'au contraire, c'est un refroidissement du climat qu'on pourrait avoir, notamment en raison de l'effet du dioxyde de soufre (SO_2) sur la formation des nuages. Cependant, d'après l'étude de Wigley et Raper (1992), malgré la prise en compte du rôle du SO_2 dans le bilan radiatif planétaire, le forçage radiatif total, qui résulte de la combinaison de tous les gaz à effet de serre et du SO_2 , demeure néanmoins positif. De plus, les récentes observations de Hansen et al. (1998) montrent que la tendance au réchauffement global s'est accélérée depuis le milieu des années soixante, et que, 1990, 1995 et 1997 ont été les années les plus chaudes de ce siècle (Figure 1.2).

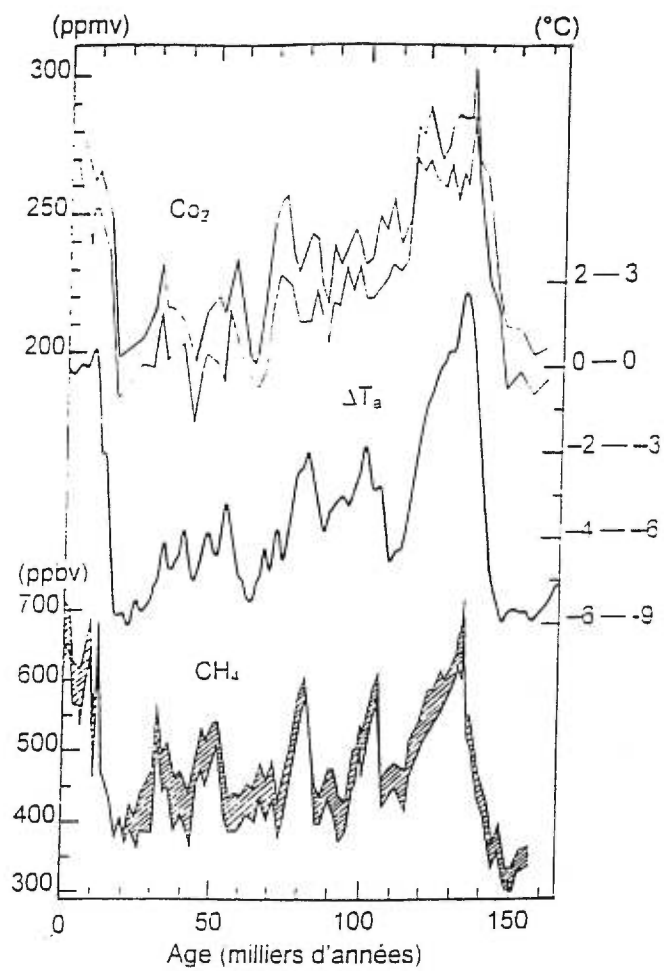


Figure 1.1: Variation de la concentration atmosphérique du CO₂ et du CH₄ au cours des 160 000 dernières années (tirée de Lorius, 1991).

Anomalie de la température (°C)

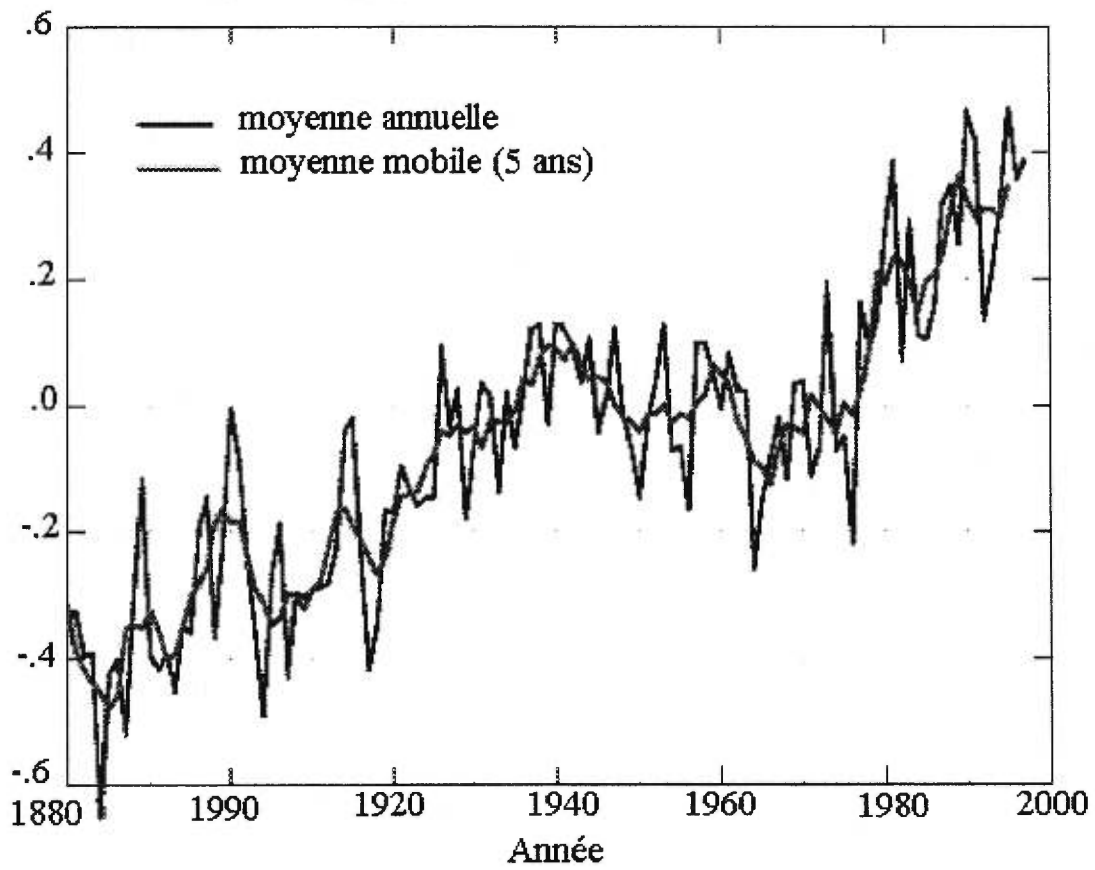


Figure 1.2: Évolution de la température moyenne annuelle à la surface terrestre entre 1880 et 1997 (D'après Hansen et al., 1998).

Plusieurs modèles mathématiques, connus sous le nom de modèles de circulation générale (MCG) ont alors vu le jour pour tenter d'évaluer l'amplitude du changement climatique à laquelle on pourrait s'y attendre si l'équivalent radiatif d'un doublement de la C_a se produit. D'une part, la majorité des scénarios projetés par les versions les plus récentes de ces modèles indiquent que la température moyenne annuelle à l'échelle globale augmenterait d'une valeur comprise entre 1,5°C et 4,5°C d'ici le milieu du prochain siècle (Houghton et al., 1995). D'autre part, les changements projetés à des échelles spatiales et temporelles plus réduites (échelles régionale et saisonnière), fluctueraient en dehors de cet intervalle (1,5°C-4,5°C) avec un réchauffement, supérieur à 4,5°C aux hautes latitudes durant l'hiver et inférieur à 1,5°C aux basses latitudes durant toute l'année. Ces projections ont déclenché une nouvelle conscience, scientifique et politique. Ce qui a mené d'ailleurs, en 1979, à l'établissement d'un programme climatique mondial (World Climate Programme), incluant le programme mondial des impacts climatiques qui englobe trois secteurs d'investigation: 1) les méthodes d'évaluation des impacts climatiques, 2) les impacts du changement climatique d'origine anthropogénique, et 3) les impacts de la variabilité du climat sur la production alimentaire (WMO, 1979).

1.2 Effet du climat sur l'agriculture

L'agriculture est parmi les secteurs les plus sensibles aux fluctuations climatiques. D'où l'attention considérable qui lui a été portée dans le domaine de l'étude des impacts du changement climatique projeté par les MCG (Jäger et Ferguson, 1992). Ce fait reflète l'ubiquité de l'agriculture à l'échelle mondiale, l'importance universelle de l'alimentation dans le bien-être de l'humanité, et le commun accord que l'agriculture est très sensible aux conditions climatiques. Il reflète aussi l'existence d'un savoir bien établi (l'agrométéorologie) à partir duquel il est possible d'évaluer l'impact du changement du climat sur ce secteur.

L'approche utilisée habituellement pour analyser les impacts des changements climatiques sur l'agriculture est illustrée par la figure 1.3. En premier lieu, ce champ d'étude

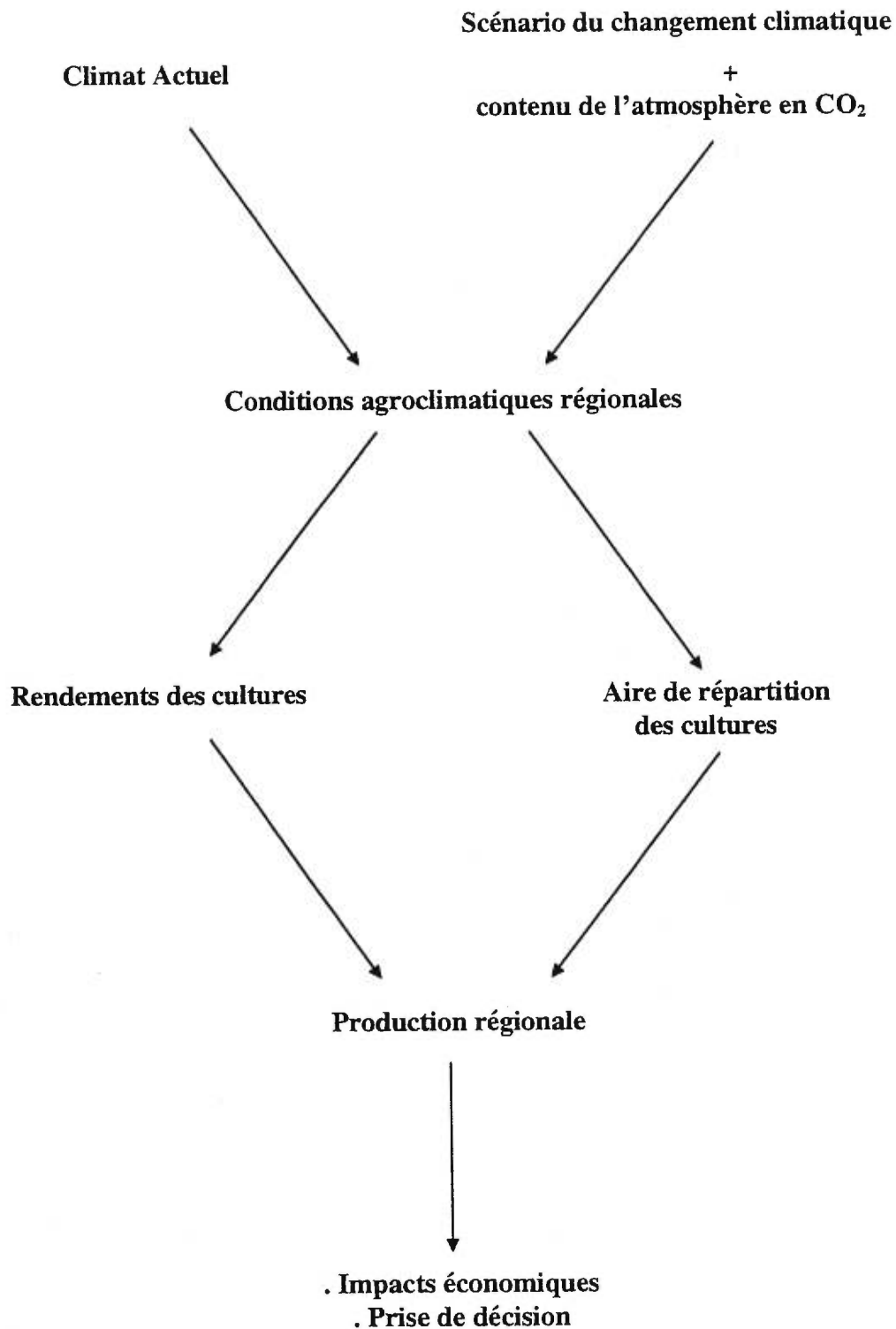


Figure 1.3: Schéma illustrant la procédure générale, habituellement suivie, pour évaluer l'impact des changements climatiques sur l'agriculture.

nécessite la définition d'un scénario climatique représentant le climat futur. Ce scénario peut être tiré soit des sorties des MCG (Singh et al., 1998), ou en imposant une variation de certains paramètres climatiques telles que la température et les précipitations (Nonhebel, 1996). En deuxième lieu, une fois que le scénario du changement climatique est défini, on utilise un modèle de culture pour simuler les rendements.

1.3 Modèles de cultures

Il existe deux principaux types de modèles de cultures : statistiques et dynamiques. Les modèles statistiques (e.g. Viau et Mitic, 1992) tentent de relier certains aspects de la production, généralement le rendement commercial, à certaines variables climatiques. Les constantes de régression sont déterminées à partir des observations historiques des rendements et du climat. L'application de ces derniers pour ce type d'analyses comporte deux inconvénients majeurs. En effet, afin d'obtenir des équations statistiquement significatives, les constantes de régression doivent nécessairement être déduites à partir d'observations historiques (climatiques et agronomiques) effectuées à long terme. Toutefois, même si des observations historiques suffisamment longues sont disponibles, le changement des pratiques agricoles, de l'aménagement et de la technologie, peut affecter sérieusement les résultats (Robertson, 1983). Par ailleurs, même lorsqu'on réussit à calibrer un modèle statistique pour prédire le rendement d'une culture pour une région donnée ou pour des pratiques agroécologiques particulières, on ne peut pas l'utiliser pour effectuer le même genre d'étude pour d'autres régions (van Keulen et Seligman, 1985).

Avec les progrès technologiques, dans le domaine de l'informatique notamment, on a pu voir une «prolifération» de modèles simulant la croissance des cultures durant les vingt dernières années. Parmi ces modèles, on peut citer le modèle de l'Organisation des Nations-Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO, 1978), le modèle SIMTAG (Stapper, 1984), le modèle CERES-Wheat (Ritchie et Otter-Nack, 1985), et le modèle EPIC (Sharpley et Williams, 1990). Ces derniers intègrent la connaissance de la plupart des effets importants des conditions climatiques sur les processus individuels de la croissance des cultures (e.g. photosynthèse,

transpiration, respiration). Le rendement final de la culture est déterminé à partir de plusieurs facteurs dont le climat, la variété et les conditions du sol.

Dans ces modèles dynamiques, on distingue généralement différents niveaux de production (de Wit et Penning de Vries, 1982). Au niveau de la production potentielle, la culture est idéalement alimentée par l'eau et les éléments nutritifs, et ne rencontre aucune forme de stress. La croissance de la culture dépend seulement des caractéristiques de cette dernière, de la température et du rayonnement solaire. Dans la situation où la culture subit un stress hydrique, les éléments nutritifs sont considérés optimaux et la culture ne subit pas les effets des ravageurs, des maladies et de la mauvaise herbe, mais le rendement est limité par la disponibilité de l'eau. Dans les niveaux de production qui suivent, les effets dus au stress nutritif sont pris en considération. Finalement, les facteurs qui peuvent réduire le rendement, tels que, les ravageurs, les maladies et la mauvaise herbe peuvent être distingués.

Les modèles dynamiques offrent plusieurs avantages dont l'aide à l'interprétation des résultats expérimentaux, leurs utilisations comme outils de recherche agronomique, et l'aide à la prise de décision. En effet, plusieurs de ces modèles ont été construits pour aider les chercheurs à comprendre certains phénomènes qui se produisent lors de la croissance de la plante comme l'absorption de l'eau, le contrôle stomatique et le mouvement des éléments nutritifs. Les modélisateurs tentent ainsi de comprendre et de quantifier ces processus. En plus de comprendre les différentes parties du système agronomique, les modélisateurs veulent savoir à quoi on peut s'attendre si certains changements affectent ce système. Les tests dans les champs coûtent très cher, particulièrement lorsque le nombre de variables ou de traitements augmente. De tels modèles peuvent aider à réaliser certains traitements et indiquer ceux qui peuvent nous amener aux résultats qu'on souhaite obtenir. Notons que ces modèles ne permettent pas l'élimination des tests dans les champs, mais seulement les limitent et diminuent leurs coûts (Whisler et al., 1986). Ces modèles peuvent aussi aider à la prise de décision: la simulation du rendement d'une culture sur plusieurs années aide à quantifier le risque sur la production qu'implique une pratique agricole particulière (Hunt, 1991). Ceci présente donc une possibilité qui permettrait à l'agriculteur

d'effectuer les aménagements qui augmenteraient son profit. Cependant, le plus grand avantage qu'ils offrent est leur potentiel de "transportabilité": si les phénomènes qui prennent place dans le processus de croissance de la culture sont décrits adéquatement, la région de l'application du modèle pourrait n'avoir que des conséquences mineures (Baier, 1977). Les effets des différentes pratiques d'aménagement peuvent être examinés par la suite.

La description des processus de croissance et de développement de la plante est, par ailleurs, largement plus détaillée et plus complexe dans certains modèles dynamiques que dans d'autres. Cependant, même si potentiellement, les modèles les plus complexes ont une meilleure capacité de prédiction des rendements que des modèles plus simples, deux inconvénients majeurs leur sont associés. D'une part, l'introduction d'une multitude de détails rend très difficile la détection des sources d'erreurs. D'autre part, les modèles les plus complexes nécessitent une importante quantité de données pour leur fonctionnement, ce qui limite leur potentiel de «transportabilité» (Parry et Carter, 1988). De plus, certaines études ont montré que les modèles de culture les plus complexes, ne donnent pas nécessairement des résultats plus satisfaisants que des modèles plus simples (WMO, 1985; Penning de Vries et al., 1989).

1.4 L'agriculture québécoise face aux changements de la composition atmosphérique en CO₂

La sensibilité de l'agriculture aux fluctuations climatiques est reconnue depuis très longtemps (Jäger et Ferguson, 1992). Si le changement de la composition atmosphérique en CO₂ impliquerait un changement du climat aux échelles, globale et régionale, et donc un effet sur l'agriculture mondiale en générale et québécoise en particulier, il impliquerait aussi un effet physiologique sur la croissance végétale (Goudriaan et Zadocks, 1995). Par ailleurs, au Québec, l'agriculture constitue une part très importante de l'économie (Le Québec, 1995). D'où notre problématique, à savoir la compréhension des effets, direct (physiologique) et indirect (changement climatique), possibles de la hausse de la concentration ambiante du CO₂ sur la

production agricole dans cette province canadienne. Nos objectifs de recherche consistent alors à la réalisation de plusieurs points:

- La gestion du secteur agricole impose le déploiement d'un effort de recherche afin de connaître les tendances futures de la production agricole en réponse aux changements environnementaux observés et prévus aux échelles globale et régionale (Houghton et al., 1995). Dans le cadre de cet effort, l'unique étude qui a été réalisée dans le passé pour tenter d'évaluer l'effet du climat $2xCO_2$ sur les rendements des cultures au Québec est celle de Singh et Stewart (1991). Ces derniers auteurs avaient basé leurs analyses sur la projection (climat $2xCO_2$) du MCG du "Goddard Intitute for Space Studies (GISS)" dont la résolution spatiale est 4° latitude / 5° longitude. Cependant, cette résolution ($4^\circ/5^\circ$), relativement petite, ne permet pas de prendre en considération tous les types de sols présents au Québec. Afin de palier à cette lacune, nous tenterons d'utiliser dans notre étude une plus haute résolution spatiale, à savoir 1° latitude/ 1° longitude. De plus, on prendra en considération une carte plus détaillée des régions agricoles du Québec (en nombre de douze) que celle utilisée dans l'étude de Singh et Stewart (en nombre de sept).
- L'étude de Singh et Stewart (1991) n'avait pas inclus l'effet direct (effet fertilisant) de la concentration ambiante du CO_2 (C_a) sur les rendements. Plusieurs études dont une synthèse détaillée a été faite par Idso et Idso (1994) ont montré cependant, qu'en dehors de toute considération climatique, une réponse fortement bénéfique des rendements des cultures, particulièrement les C_3 , pourrait se produire suite à la hausse de la C_a . D'où, notre décision d'inclure cet effet sur les rendements.
- Dans leurs analyses, Singh et Stewart (1991) ont utilisé le modèle de culture de la FAO (organisation des Nations-Unies pour l'agriculture et l'alimentation) modifié par Stewart (1983). Ce modèle utilise l'approche de de Wit (1965) pour calculer la production de biomasse. Toutefois, comme nous le verrons au chapitre II, il a été démontré (Spitters et al., 1989) que cette approche comporte de sérieuses lacunes. D'où, la nécessité d'utiliser une approche plus fiable.

- La photosynthèse brute dépend de la concentration ambiante du CO_2 . Comme cette dernière augmente actuellement d'environ 1,8 ppm/an, et qu'on s'attend à ce que cette augmentation s'accélère dans le futur (Houghton et al., 1995), il est primordial d'utiliser la concentration ambiante de CO_2 comme variable de forçage dans les modèles de cultures. Le modèle qu'on propose (CYSS) remplit parfaitement ce critère.
- Les plantes de type C_3 fixent et respirent simultanément le CO_2 durant le jour. Le taux de cette respiration, appelée photorespiration, est approximativement proportionnel au taux de photosynthèse brute (Whisler et al., 1986). Le rapport entre les taux, de la photorespiration et de la photosynthèse brute, est fonction de la température et des concentrations de CO_2 et d' O_2 aux sites de carboxylation (Ehleringer et Bjorkman, 1977). Cependant, du fait que les concentrations de CO_2 et d' O_2 sont "virtuellement" constantes sous les conditions du champ, les chercheurs introduisent généralement une constante caractéristique du rapport O_2/CO_2 lors de l'élaboration de leurs modèles. Toutefois, l'utilisation d'un modèle de culture pour estimer la production sous différentes concentrations de CO_2 nous impose de calculer la photorespiration en fonction des concentrations de CO_2 et d' O_2 ainsi qu'en fonction de la température. C'est en effet, l'un de nos objectifs.
- La méthodologie canadienne actuelle (Stewart, 1983) utilise l'équation de Penman modifiée (Doorenbos et Pruitt, 1977) dans le calcul du taux d'évapotranspiration potentielle (*EP*). Cette équation suppose qu'il n'y a pas de résistance de la surface des feuilles à l'évaporation, ce qui est incorrect et pourrait conduire à une importante surestimation de *EP*, pouvant atteindre 30% (Allen et al., 1989). On pense alors, qu'il est essentiel d'utiliser une approche plus réaliste que celle de Penman pour l'estimation de *EP*.
- Les études faites sur l'effet de la variation du CO_2 atmosphérique sur le taux d'évapotranspiration ont montré que ce dernier diminue lorsque le CO_2 ambiant augmente.

Ainsi, dans le cadre de cette étude, on tiendra compte de l'effet du CO₂ sur l'ouverture stomatique et donc sur l'évapotranspiration des cultures.

- Deux principaux facteurs biométéorologiques agissent sur le rendement des cultures dont le stress hydrique et le temps de maturation. L'un des objectifs de cette étude est alors de mettre en lumière l'ordre d'importance de chacun de ces deux facteurs sous les conditions du climat 2xCO₂.
- Des études récentes ont démontré l'importance de prendre en compte l'effet de la variabilité climatique interannuelle dans l'analyse des impacts potentiels des changements du climat sur la production agricole (e.g. Semenov et Porter, 1995; Riha et al., 1996). D'où notre objectif d'évaluer cet effet sur l'agriculture québécoise.

Avant de procéder aux détails de notre approche et afin de mieux la cerner, nous donnerons dans le prochain chapitre (Chapitre II) une revue de la littérature sur l'effet direct du CO₂ sur différents processus se produisant lors de la croissance des cultures. Cette revue nous permettra de comprendre l'effet physiologique (photosynthèse, transpiration et respiration) du CO₂ sur les couverts végétaux et sur les plantes agricoles en particulier. Il nous permettra aussi de comprendre le possible effet direct de la hausse du CO₂ atmosphérique sur la production agricole ainsi que les méthodes existantes pour intégrer cet effet dans les modèles de culture. Par la suite, nous détaillerons notre nouvelle approche (modèle CYSS) que nous avons élaboré et nous estimons meilleure que l'actuelle méthodologie canadienne (Stewart, 1983) pour évaluer les effets de la hausse du CO₂ atmosphérique sur l'agriculture au Québec. Comme suite logique nous procéderons dans le chapitre IV à la validation de notre modèle (CYSS), à l'évaluation de la réponse de plusieurs cultures aux effets de la hausse du CO₂ atmosphérique aux douze régions agricoles au Québec et à la comparaison des simulations des modèles FAOm (Stewart, 1983) et CYSS. Dans le chapitre V, nous étudierons l'effet du changement de la variabilité climatique interannuelle sur les rendements des cultures. Ceci nous permettra d'évaluer l'importance de prendre en compte le changement de la variance des séries climatiques dans l'analyse des impacts

des changements climatiques sur le rendement des cultures. Enfin, nous procéderons dans le dernier chapitre à la synthèse des résultats obtenus et à la partie recommandation.

Chapitre II

EFFETS DIRECTS DE LA HAUSSE DE LA CONCENTRATION ATMOSPHERIQUE DU CO₂ SUR LES CULTURES

2.1 Introduction

Le CO₂, première source de carbone et substance nécessaire à la croissance des plantes, n'a cessé d'augmenter dans l'atmosphère tout au long de ce siècle (Houghton et al., 1995). S'il subsiste encore une incertitude quant à l'induction d'un réchauffement climatique suite à l'augmentation de sa concentration atmosphérique, il existe un commun accord parmi les physiologistes qu'un taux de CO₂ atmosphérique plus élevé que le taux actuel (360 ppm environ) causerait plusieurs effets sur la croissance des plantes (Goudriaan et Zadoks, 1995). Des effets primaires dont la stimulation de la photosynthèse et la réduction de la photorespiration, et des effets secondaires dont la réduction de l'ouverture stomatique et le changement du mécanisme de répartition des assimilats. D'une manière plus générale, l'augmentation du CO₂ atmosphérique induit une stimulation de la photosynthèse, une réduction de la transpiration, et une augmentation de la température du tissu végétal et donc une variation de son potentiel hydrique (Acock, 1990). La combinaison de ces effets pourrait contribuer à une augmentation des taux, de croissance et du rendement. Par ailleurs, l'effet sur la respiration demeure inconnu et les études faites jusqu'à maintenant à ce sujet ne permettent pas de tirer des conclusions définitives (Gifford, 1994).

En s'appuyant sur une importante revue de littérature, ce chapitre nous permettra d'une part de nous introduire aux effets de la variation du CO₂ ambiant sur la photosynthèse, la transpiration, la respiration et les rendements. D'autre part, il nous permettra d'avoir un aperçu sur les différentes méthodes ou techniques pour tenir compte de ces effets dans les modèles de cultures.

2.2 Effet de l'augmentation du CO₂ atmosphérique sur la photosynthèse

Les réactions biochimiques de la photosynthèse suivent un processus cyclique. Ces réactions sont communes à toutes les plantes vertes et se décrivent explicitement par le cycle de Calvin. L'enzyme ribulose biphosphate carboxylase-oxygénase (RUBISCO) joue un rôle particulièrement important dans le fonctionnement de ce cycle. Elle catalyse la réaction entre la molécule acceptrice ribulose 1,5-biphosphate (RubP) et le CO₂. Le produit de cette dernière réaction, le 3-phosphoglycerate (PGA), est ensuite métabolisé par d'autres enzymes de ce cycle. Ces réactions mènent à la formation de carbohydrates (CH₂O), et à la régénération de l'enzyme RubP. La synthèse des carbohydrates, caractéristique essentielle du cycle de Calvin, constitue le processus de photosynthèse.

Le cycle de Calvin illustre les réactions «nocturnes» du processus de la photosynthèse. L'énergie nécessaire pour le fonctionnement de ce cycle provient de la réaction photochimique de la photosynthèse dont le rôle est la synthèse des glucides à partir du gaz carbonique en utilisant l'énergie lumineuse. Elle se résume par la réaction suivante:



Cette réaction se décompose en deux étapes:

- Le captage de l'énergie lumineuse par les pigments chlorophylliens et sa transformation en énergie chimique (sous forme de molécules d'ATP et de NADPH) par des réactions d'oxydo-réduction.
- L'utilisation des molécules d'ATP et de NADPH pour réaliser la réduction du gaz carbonique en hydrates de carbone.

Toutefois, en raison des distinctions biochimiques qui régissent le mécanisme de fixation du CO₂, on distingue trois groupes photosynthétiques chez les plantes, C₃, C₄, et CAM. La

distinction entre ces trois groupes est la conséquence des enzymes impliquées dans le processus de photosynthèse. Les enzymes responsables de la réponse des plantes à l'enrichissement par le CO_2 sont le RUBISCO, le phosphoenolpyruvate carboxylase (PEP carboxylase) et parfois l'anhydrase carbonique (Edwards et Walker, 1983).

Chez les plantes C_3 (blé, soya ...), l'enzyme RUBISCO peut réagir soit avec une molécule de CO_2 pour initier le passage d'un atome de carbone à l'intérieur du cycle de fixation du CO_2 ou avec une molécule d'oxygène (O_2) en présence de la lumière pour initier le cycle de photorespiration. Il en résulte la perte d'une quantité de CO_2 par la plante. Les deux cycles permettent la régénération du ribulose biphosphate qui est le substrat pour lequel le CO_2 et l' O_2 entrent en compétition pour réagir avec un site actif de l'enzyme RUBISCO (Gifford, 1989).

Chez les plantes C_4 (maïs, sorgho ...), le carboxylase primaire est le PEP qui contrairement au cas des plantes C_3 , ne rencontre pas une compétition de la part de la molécule d' O_2 . Cette enzyme permet aux espèces C_4 de hausser la concentration de CO_2 à l'intérieur de la plante.

Les plantes de type CAM (*Crassulacean acid metabolism*) fixent le CO_2 selon le même mécanisme qu'utilisent les plantes C_4 (Jones, 1983). Cependant, la carboxylation initiale chez ces plantes (CAM) se produit durant la nuit. Il en résulte alors une tendance, chez ces plantes, à ouvrir leurs stomates durant la nuit et les fermer durant le jour (Jones, 1983). D'où un avantage en terme de conservation de l'eau. On retrouve généralement ces plantes dans les régions arides (e.g. cactus) et les plantes CAM les plus importantes, de point de vue économique, sont l'ananas et le sisal.

Actuellement, la concentration atmosphérique du CO_2 est proche de la concentration de saturation, en CO_2 , chez les plantes C_4 (Figure 2.1). Ceci explique le résultat de plusieurs expériences (Acock and Allen, 1985; Dracke, 1992) montrant que la photosynthèse des plantes C_4 est largement moins sensible à l'augmentation du CO_2 ambiant que celle des plantes C_3 .

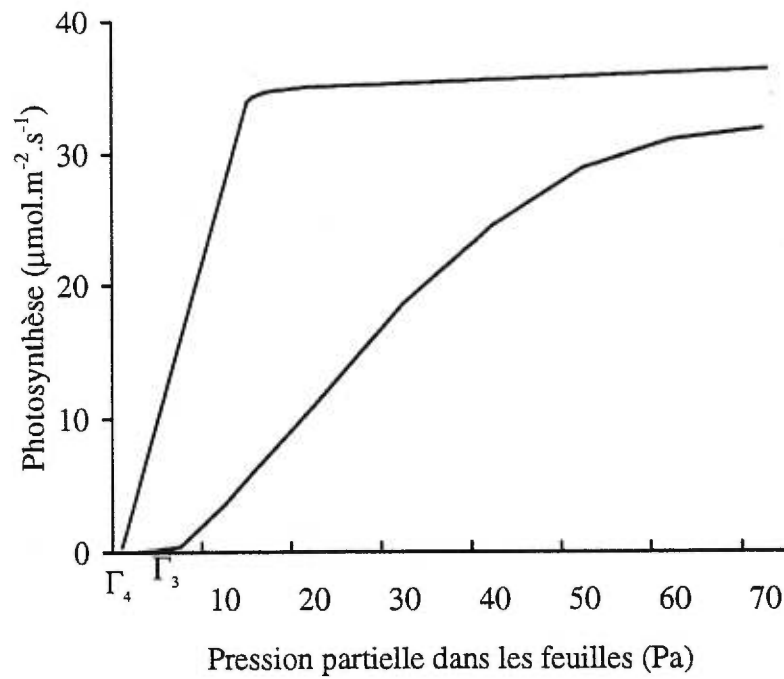


Figure 2.1: Représentation schématique de la réponse photosynthétique des plantes C₃ et C₄ à la concentration du CO₂ ambiant. Γ₃ et Γ₄ sont respectivement les points de compensation des plantes C₃ et C₄ (d'après de Goudriaan et Unsworth, 1990).

Une simple illustration de l'interaction photosynthèse-CO₂ peut être faite en utilisant l'analogie avec la loi d'Ohm qui s'écrit:

$$I_e = \frac{V_e}{R_e} \quad (2.1)$$

où I_e (A), V_e (V) et R_e (Ω) sont respectivement le courant électrique, la tension électrique et la résistance électrique.

Par analogie avec cette loi, le taux de photosynthèse, P_f , peut s'exprimer en fonction du gradient de la concentration de CO₂ entre l'air et la feuille:

$$P_f = b_1 \frac{C_a - C_g}{r_{ac} + r_{sc} + r_{mc}} \quad (2.2)$$

où C_a et C_g sont respectivement les concentrations en CO₂ de l'air et de la grana (l'organelle subcellulaire où se produit la réaction de photosynthèse), b_1 est un coefficient de proportionnalité, r_{ac} et r_{sc} sont respectivement les résistances de l'air et des stomates à la diffusion du CO₂, et r_{mc} est la résistance du mésophylle (résistance à la diffusion de la molécule du CO₂ vers la grana). Cette dernière est la résultante de différents processus physiques et chimiques qui s'opposent à cette diffusion (Rosenberg, 1981).

2.3 Effet de l'augmentation du CO₂ atmosphérique sur l'ouverture stomatique et la transpiration

L'un des effets secondaires que peut avoir la hausse du CO₂ atmosphérique sur les plantes est la fermeture partielle des stomates. Ceci cause une augmentation de la résistance des plantes aux échanges gazeux, incluant le CO₂ et la vapeur d'eau, entre la feuille et l'air ambiant (Morison,

1985; Gifford, 1989). Le degré de l'ouverture stomatique peut être considéré, d'ailleurs, comme un compromis entre la limitation des pertes d'eau et l'admission du CO₂ (Wong, 1979).

Selon la réaction des stomates, lorsque le CO₂ ambiant augmente, l'assimilation nette du CO₂ pourrait augmenter et la transpiration pourrait diminuer (Goudriaan et Unsworth, 1990). D'après la figure 2.2 montrant l'évolution du taux d'assimilation en fonction de la concentration intracellulaire C_i (courbe A), on remarque que C_i diminue lorsque le taux d'assimilation augmente (courbe B) à cause des résistances des stomates et de l'air ambiant. L'intersection des deux courbes A et B donne les taux d'assimilation et de la concentration intracellulaire en CO₂.

Une hausse du CO₂ ambiant peut conduire à un maximum d'assimilation au cas où les stomates n'y réagiraient pas (courbe B'), ou à un taux d'assimilation inférieur, ce qui est généralement le cas, si les stomates réduisent leur ouverture (courbe B''). Dans la situation extrême où C_i reste constante, l'effet de la hausse du CO₂ ambiant sur la fermeture des stomates est alors maximal et il est inexistant sur l'assimilation. Toutefois, la réponse la plus observée est celle où le rapport C_i/CO₂ ambiant reste constant (Goudriaan et Unsworth, 1990). Autrement dit, l'effet de la hausse du CO₂ ambiant se répartit entre l'assimilation et les pertes d'eau. Cette invariance du rapport C_i/CO₂ ambiant signifie que la réduction de l'ouverture stomatique est moins importante chez les plantes où l'assimilation répond fortement à la variation de C_i (plantes C₃) que chez les plantes où l'assimilation y répond moins (plantes C₄).

L'analogie avec la loi d'Ohm peut être utilisée aussi pour l'illustration de l'interaction CO₂-transpiration. Ainsi, la transpiration, *T*, de la feuille peut s'écrire:

$$T = b_2 \frac{e_f - e_a}{r_{av} + r_s} \quad (2.3)$$

où *b*₂ est un coefficient de proportionnalité, *e*_{*f*} est la pression de vapeur à l'intérieur de la feuille, *e*_{*a*} est la pression de vapeur de l'air au contact de la feuille, *r*_{*av*} est la résistance aérodynamique, et

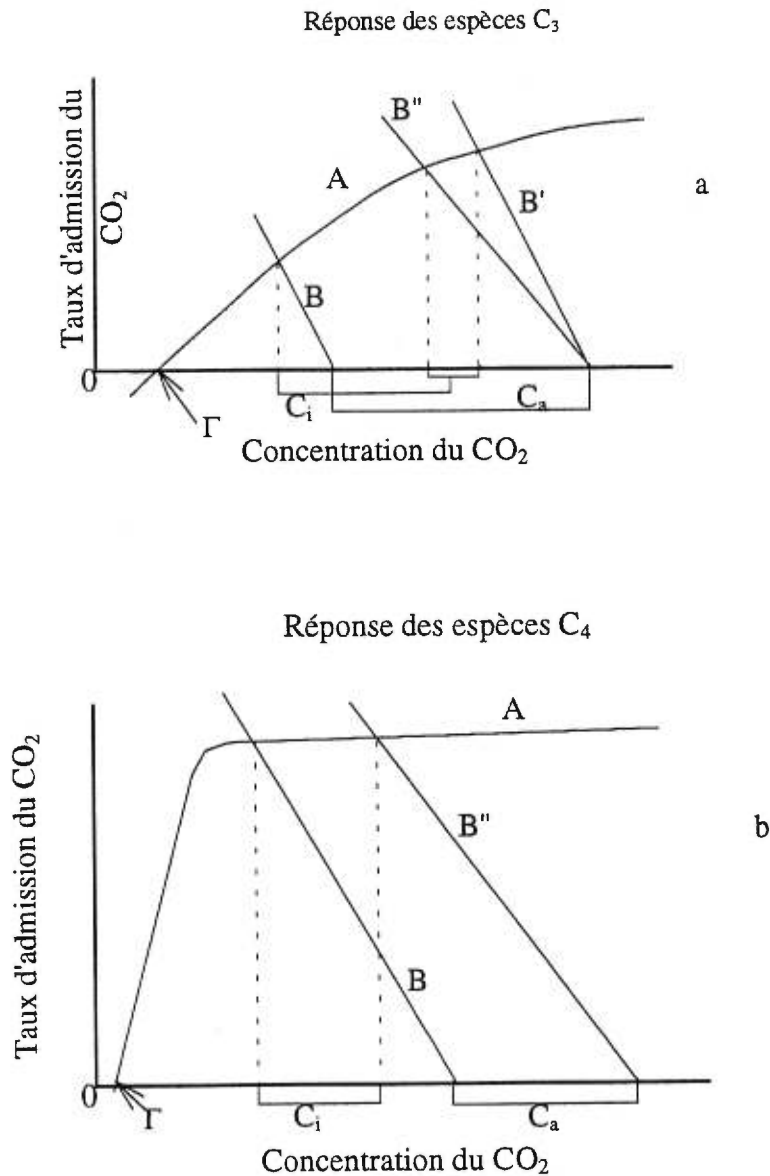


Figure 2.2: Représentation schématique de la réponse photosynthétique de la feuille à la concentration du CO_2 à l'intérieur de la cavité stomatique, C_i , (courbe A). Le taux de photosynthèse affecte aussi C_i en raison des limitations des réserves stomatiques (courbe B). Les courbes B' et B'' montrent l'effet du doublement du CO_2 lorsque aucune fermeture stomatique ne se produit (courbe B') et lorsqu'une fermeture partielle des stomates se produit (courbe B''). (a) cas des plantes C_3 (faible réponse photosynthétique au doublement du CO_2 ambiant) et (b) cas des plantes C_4 (faible réponse photosynthétique au doublement du CO_2 ambiant), (d'après Percy et Ehleringer, 1984).

r_s est la résistance stomatique.

Il faut noter qu'à cause des différences physiques entre les molécules H_2O et CO_2 , les résistances r_a et r_s sont numériquement différentes de r_{ac} et r_{sc} (équation 2.2). À titre d'exemple, sous des conditions normales, les résistances au transfert de H_2O et de CO_2 prennent respectivement des valeurs de l'ordre de 0.1-0.3, 0,2-5 et 4-10 ($s.cm^{-1}$) (Rosenberg, 1981).

2.4 Effet de l'augmentation du CO_2 atmosphérique sur la respiration

La respiration est un processus essentiel à la survie des cellules. C'est le processus biochimique qui fournit de l'énergie aux différents organes végétaux par oxydo-réduction de la photosynthèse. Il en résulte, un rejet du CO_2 vers l'atmosphère, et donc une réduction de la quantité de carbone disponible à être incorporée dans la production de la biomasse. Toutefois, malgré la corrélation positive qui existe entre les taux de croissance et de respiration des plantes (Gifford, 1989), certaines observations montrent que les plantes manifestent un taux de respiration supérieur au taux auquel on pourrait s'attendre, et donc une dissipation de CO_2 plus importante que celle nécessaire de point de vue énergétique (Lambers, 1984). Ce phénomène, semble être aussi stimulé par une production croissante des sucres (produits de la photosynthèse) dans le tissu végétal (Lambers, 1984). Ainsi, on peut raisonnablement penser qu'une hausse du CO_2 ambiant provoquerait une réduction du taux de respiration. Cependant, la compilation des résultats expérimentaux de Warrick et al. (1991) et Gifford et al. (1994) montre que la réponse de la respiration des plantes C_3 à la hausse du CO_2 ambiant est parfois positive et parfois négative, tandis que celle des plantes C_4 demeure totalement inconnue.

2.5 Effet de l'augmentation du CO_2 atmosphérique sur la production agricole

Plusieurs études ont été réalisées pour estimer l'effet de la hausse du CO_2 atmosphérique sur la production agricole dont une récente synthèse a été faite par Idso et Idso (1994). Ces

études indiquent que le doublement du CO₂ dans l'atmosphère provoquerait, généralement, une hausse des rendements comprise entre 10 et 50% pour les cultures C₃ et entre 0 et 15% pour les cultures C₄. Toutefois, le taux d'augmentation des rendements varie fortement en fonction des conditions expérimentales, telles que le stress hydrique et l'éclairement.

2.6 Description des approches existantes pour l'estimation de l'effet du CO₂ atmosphérique sur le rendement des cultures

2.6.1 Photosynthèse et production de la biomasse

Comme cela a été déjà mentionné, la façon la plus populaire de procéder à l'étude des effets, direct et indirect, de la hausse du CO₂ atmosphérique sur la production agricole est d'utiliser des modèles de cultures. EPIC (Sharpley et Williams, 1990), SUCROS (Spitters et al., 1989), CERES-Wheat (Ritchie et Otter-Nacke, 1985) et FAO modifié (Stewart, 1983) sont actuellement les modèles les plus utilisés et les plus cités dans la littérature.

Selon le modèle de la FAO modifié (Stewart, 1983), la production potentielle nette de biomasse, B_n , se calcule de la façon suivante:

$$B_n = \frac{0,36 B_{gm}}{\frac{1}{N} + 0,25 C_T} \quad (2.4a)$$

$$\text{où } B_{gm} = F b_o + (1 - F) b_c \quad (2.4b)$$

B_{gm} étant la production potentielle brute de biomasse (kgCH₂O.ha⁻¹.h⁻¹), F est la fraction du jour où le ciel est totalement couvert, b_o et b_c sont respectivement les taux de production brute de biomasse (kgCH₂O.ha⁻¹.h⁻¹) sous un ciel totalement couvert et sous un ciel clair, C_T est le

coefficient de respiration de maintien, et N est le nombre de jours nécessaires à la maturation.

Selon CERES-Wheat (Ritchie et Otter-Nacke, 1985), la production potentielle journalière de biomasse, P_c (g biomasse.m⁻².d⁻¹) utilise le déterminisme de Monteith (Monteith et Unsworth, 1990) et s'exprime comme:

$$P_c = 7,5(1 - e^{-kLAI})I_{PAR}^{0,6} \quad (2.5)$$

où k est le coefficient d'extinction de la lumière par le couvert, LAI est l'indice foliaire, et I_{PAR} est le rayonnement photosynthétiquement actif incident (MJ.d⁻¹).

Selon le modèle SUCROS (Spitters et al., 1989), l'assimilation instantanée de la feuille s'exprime comme:

$$A_L = A_m \left(1 - e^{-\frac{\alpha_e I_a}{A_m}}\right) \quad (2.6)$$

où A_L est l'assimilation brute (kgCO₂.m⁻².s⁻¹), A_m est l'assimilation brute sous saturation lumineuse (kgCO₂.m⁻².s⁻¹), α_e est l'efficacité photochimique (kgCO₂.J⁻¹), et I_a est l'énergie absorbée (J.m⁻².s⁻¹).

Selon le modèle EPIC (Sharpley et Williams, 1990), l'accumulation potentielle de la biomasse se calcule à partir d'une approche assez similaire à celle qu'utilise le modèle CERES-Wheat:

$$\Delta B_p = 0,001.B_E.I_{PAR}(1 + \Delta D)^3 \quad (2.7)$$

où ΔB_p (kg.m⁻²) est l'augmentation journalière potentielle de la biomasse, B_E (kg.MJ⁻¹) est le

coefficient de conversion de l'énergie en biomasse, I_{PAR} (MJ.m^{-2}) est le rayonnement photosynthétiquement actif incident, et ΔD (h.d^{-1}) est la variation de la longueur du jour (>0 au printemps).

Comme on peut le constater, aucune de ces approches ne tient compte directement de la concentration ambiante du CO_2 . Pour contourner cet obstacle, dans l'étude de l'effet direct du CO_2 sur la production agricole, certaines méthodes, estimant l'effet de la variation du CO_2 ambiant sur la photosynthèse et la production de la biomasse, ont vu le jour durant les dernières années. La plus simple de ces méthodes consiste à augmenter la capacité photosynthétique lorsqu'on augmente la concentration ambiante du CO_2 par un simple facteur multiplicatif (Peart et al., 1989; Rosenzweig, 1989). D'autres auteurs, Goudriaan et al. (1985), Okamoto et al. (1991) et Stockle et al. (1992), ont proposé des modèles empiriques.

Goudriaan et al. (1985) ont proposé deux modèles. Le premier décrit la réponse des plantes à l'augmentation du CO_2 ambiant d'une façon logarithmique, et s'écrit:

$$Y = Y_o \left[1 + \beta \text{Ln} \left(\frac{C}{C_o} \right) \right] \quad (2.8)$$

où Y exprime la réponse de la plante en terme de production de biomasse, pour un taux C de CO_2 , Y_o est la production de référence à une concentration C_o de CO_2 et β est le facteur de réponse et vaut 0,5 quand C_o est égale à 300ppm. Ln étant le logarithme népérien.

Le deuxième modèle de Goudriaan et al. (1985) exprime l'efficience photochimique, α_e , et le taux maximum de photosynthèse de la feuille sous des conditions de saturation lumineuse, P_{max} , en fonction de la concentration ambiante du CO_2 , de la façon suivante:

$$\alpha_e = \left(\frac{C - \Gamma_c}{C + 2\Gamma_c} \right) \alpha_o \quad (2.9)$$

$$P_{\max} = \left(\frac{C - \Gamma_c}{350 - \Gamma_c} \right) P_{\max,350} \quad (2.10)$$

où C (ppm) est la concentration ambiante de CO_2 , Γ_c (ppm) est le point de compensation, $P_{\max,350}$ est le taux maximum de photosynthèse de la feuille sous saturation lumineuse lorsque C est égale à 350 ppm, et α_o ($\mu\text{gCO}_2.\text{J}^{-1}$) est l'efficacité photochimique définie comme égale à P_{\max}/E où E est l'énergie lumineuse pour laquelle la photosynthèse de la feuille est égale à $P_{\max}/2$.

Okamoto et al. (1991) ont proposé une autre approche qui s'écrit:

$$\Delta Y = S \left[1 - e^{-\frac{\theta \Delta C}{S}} \right] \quad (2.11)$$

où ΔY est la variation du rendement due à la variation du CO_2 ambiant (ΔC), θ est la pente de la réponse du rendement à l'augmentation du CO_2 et S est le taux maximum d'augmentation du rendement due à l'augmentation de C .

Stockle et al. (1992), de leur part, ont proposé un autre modèle qui ressemble à ceux de Goudriaan et al. (1985) et de Okamoto et al. (1991). Ce dernier, qui a été intégré dans le modèle de culture EPIC (Sharpley et Williams, 1990), ajuste la valeur de l'efficacité lumineuse des cultures (RUE : quantité de matière sèche produite par unité de rayonnement photosynthétiquement actif) lorsque la concentration ambiante du CO_2 varie, de la façon suivante:

$$RUE = 100 \frac{C}{C + b_1 e^{-b_2 C}} \quad (2.12)$$

où RUE est l'efficacité lumineuse (g.MJ^{-1}), C est la concentration atmosphérique de CO_2 (ppm) et b_1 et b_2 sont des paramètres qui s'obtiennent en résolvant l'équation (2.12) graphiquement en

satisfaisant deux points connus de la réponse de *RUE* à la variation de *C*.

Ces modèles (équations 2.8 à 2.12) sont très utiles pour résumer les résultats des observations. Cependant, à cause de leurs caractères empiriques qui les privent de toute signification physiologique, ils demeurent seulement indicatifs de l'effet de la hausse du CO_2 ambiant sur les cultures.

2.6.2 Évapotranspiration

À notre connaissance, seulement trois approches ont été proposées et introduites dans différents modèles de culture pour tenir compte de la variation du CO_2 atmosphérique dans le calcul de l'évapotranspiration potentielle (EP) des cultures.

La première de ces approches, très simple, a été utilisée dans l'étude de Wolf et van Diepen (1995) portant sur l'évaluation des effets, direct et indirect, de la hausse du CO_2 sur la production du maïs en Europe. Elle consiste à réduire le taux de l'EP de 25% lorsqu'on double la concentration du CO_2 ambiant, s'appuyant en cela sur les résultats des travaux de Goudriaan et al. (1985).

La deuxième approche, élaborée par Stockle et al. (1992), introduit l'effet de la variation du CO_2 ambiant sur le déficit de l'air à la saturation et sur la conductance stomatique dans le calcul de l'EP. Cependant, et comme l'avait signalé ces mêmes auteurs, l'utilisation de ce modèle requiert l'utilisation d'un nombre important de paramètres d'entrée dont la plupart ne peuvent être tirées que de résultats d'expériences faites sur les cultures dans des conditions très différentes de celles du champ. D'où, un inconvénient majeur qui pose une sérieuse limitation à son utilisation. Par ailleurs, cette méthode comporte un autre inconvénient de taille à notre avis. En effet, l'algorithme qui permet l'extraction des températures horaires à partir de la température moyenne journalières (équation 11 dans Stockle et al., 1992) nous semble incorrect et ne peut refléter la variation horaire de cette variable climatique. En effet la forme de cette équation peut

conduire à des températures horaires très inférieures à la température minimale journalière et des températures horaires très supérieures à la température maximale journalière.

La troisième de ces approches a été proposée par Allen et al. (1985) et sera discutée dans le prochain chapitre.

Chapitre III

MODÉLISATION DES EFFETS, DIRECT ET INDIRECT, DE LA HAUSSE DU CO₂ ATMOSPHERIQUE SUR LA CROISSANCE ET LE RENDEMENT DES CULTURES: DESCRIPTION DU MODÈLE PROPOSÉ, CYSS¹

3.1 Introduction

Jusqu'à maintenant, la méthodologie canadienne qu'on associe au modèle de la FAO modifié (FAOm) (Stewart, 1983) a été largement utilisée pour l'évaluation de l'effet du changement du climat sur l'agriculture en différentes régions du Canada (Bootsma, et al., 1984; Stewart et al., 1984; Singh et Stewart, 1991; El Maayar et al., 1997). Selon cette méthodologie, qui repose sur le modèle de production de de Wit (1965), l'assimilation journalière du couvert se calcule comme la moyenne pondérée des valeurs de l'assimilation qu'on obtient sous les conditions d'un ciel clair et d'un ciel parfaitement couvert. Cependant, l'étude de Spitters et al. (1986) a démontré l'invalidité de cette approche. En effet, cette dernière surestime la quantité du rayonnement direct sous des conditions de ciel intermédiaires. Il en résulte une sous-estimation du taux d'assimilation du couvert pouvant atteindre 20%. En même temps, ces auteurs (Spitters et al., 1986) ont démontré que l'équation hyperbolique de la photosynthèse est celle qui permet la meilleure estimation possible du taux d'assimilation. Par ailleurs, dans la mesure où l'on souhaite étudier la sensibilité de la production agricole à la variation de la concentration ambiante du CO₂, l'utilisation de l'approche de de Wit (1965) comporte un autre inconvénient majeur, à savoir qu'elle ne tient pas compte de l'effet physiologique (stimulation de la photosynthèse) qu'induirait la variation du CO₂ ambiant sur la croissance des cultures.

¹ Une partie du contenu de ce chapitre a été soumise pour publication dans la revue *Agricultural Systems*.

Au niveau de la production actuelle, le modèle de Stewart (1983) (FAO_m) utilise l'approche de Penman modifiée (Doorenbos et Pruitt, 1977) pour calculer le taux d'évapotranspiration potentielle. Cependant, le modèle de Penman ne tient compte ni de la résistance de la plante au transfert de la vapeur d'eau, ni de l'effet de la hausse du CO₂ ambiant sur ce transfert. D'où l'inconvénient d'utiliser ce modèle pour l'estimation du taux d'évapotranspiration des cultures sous de variables climats et de variables concentrations ambiantes du CO₂.

Ainsi, dans le but d'évaluer les effets, direct (physiologique) et indirect (changement climatique), sur la croissance et le rendement d'une large variété de cultures au Québec, un nouveau modèle, CYSS (Crop Yield Simulation System), est proposé. Ce dernier simule, en un pas de temps égal au jour, la photosynthèse, la respiration et l'évapotranspiration des cultures en fonction de la concentration du CO₂ ambiant, de la compétition CO₂/O₂, de la compétition CO₂-rayonnement solaire/température, des caractéristiques photosynthétiques de la culture, et des caractéristiques climatiques de la région de l'étude.

3.2 Calcul du taux instantané de la photosynthèse nette à l'échelle de la feuille

Le taux instantané de la photosynthèse brute de la feuille, $P_{f,i}$ (kgCO₂.m⁻².s⁻¹), est décrit par l'équation de Charles-Edwards (1981):

$$P_{f,i} = \frac{\alpha_e I_a \phi C}{\alpha_e I_a + \phi C} \quad (3.1)$$

où α_e (kgCO₂.J⁻¹) est l'efficacité photochimique, I_a (J.m⁻².s⁻¹) est l'énergie photosynthétiquement active absorbée par unité d'indice foliaire, C (kgCO₂.m⁻³) est la concentration ambiante de CO₂, et ϕ (m.s⁻¹) est la conductance au CO₂.

ϕ s'exprime en fonction de C , de la conductance de carboxylation de la feuille, τ , et du taux maximum de photosynthèse qu'on obtient sous un éclairage et une concentration ambiante de CO_2 non limitants, $1/\chi$:

$$\phi(C) = \frac{\tau}{(1 + \chi\tau C)} \quad (3.2)$$

$1/\chi$ étant égale à $1,8 \cdot 10^{-6} \text{ kgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ (Goudriaan et Zadocks, 1995).

Le taux maximum de photosynthèse brute, $P_{f,max}$, s'obtient en combinant les équations (3.1) et (3.2), et en calculant la limite de $P_{f,i}$ lorsque I_a tend vers l'infini :

$$P_{f,max} = \lim_{I_a \rightarrow \infty} P_{f,i} \approx \frac{\tau C}{(1 + \chi\tau C)} \quad (3.3)$$

Le taux de photosynthèse nette s'obtient en introduisant l'effet de la photorespiration sur la production photosynthétique. Pour ce faire, nous avons utilisé le modèle d'Acock (1991):

$$\alpha_e = \alpha_m \left(1 - \frac{\beta_{co} O}{\tau C}\right) \quad (3.4)$$

où α_m est l'efficacité photochimique maximale de la feuille, O est la concentration ambiante d'oxygène (21%) et β_{co} est le coefficient de carboxylation relatif à O_2 .

3.3 Réponse photosynthétique des feuilles à l'intensité lumineuse

La réponse photosynthétique des feuilles à l'intensité lumineuse est caractérisée par sa pente sous un faible éclairage, l'efficacité photochimique (α_e), et son taux maximum sous

saturation lumineuse, $P_{f,max}$.

3.3.1 Efficience photochimique

Dans le cas des plantes C_3 , l'efficience photochimique, α_e , décroît lorsque la température augmente, en raison de la photorespiration. L'effet de la température est, cependant, relativement faible: pour une variation de la température de 1°C, α_e varie d'environ 1% (Ehleringer, 1978; Farquhar et al., 1980; Leverenz et Öquist, 1987). Dans le cas des plantes C_4 , la variation de la température n'affecte pas α_e en raison de l'absence de la photorespiration. Par ailleurs, les valeurs de l'efficience photochimique maximale, α_m , pour les plantes de la même espèce (C_3 ou C_4) ne présentent pas de différences notables et valent $12,5 \cdot 10^{-9} \text{ kgCO}_2 \cdot \text{J}^{-1}$ environ (Ehleringer et Pearcy, 1983).

Dans le présent modèle, CYSS, l'effet de la température sur l'efficience photochimique des plantes C_3 a été introduit en exprimant le rapport β_{co}/τ , qui est constant pour toutes les plantes C_3 (Charles-Edwards, 1981), en fonction de la température de la feuille en utilisant la relation d'Acocck (1991) qui s'écrit:

$$\frac{\beta_{co}}{\tau} = 1,2 \cdot 10^{-4} e^{0,0295T_f} \quad (3.5)$$

où T_f (°C) est la température de la feuille.

T_f est calculée à partir de l'expression de Campbell (1977):

$$T_f = T_a + \frac{\gamma^*}{s + \gamma^*} \left[\frac{r_e (R_a - 2\epsilon\sigma T_{ak}^4)}{\rho_a C_p} - \frac{e_s - e_a}{\gamma^*} \right] \quad (3.6)$$

où T_a (°C) et T_{ak} (K) sont les températures moyennes de l'air, γ^* est la constante psychrométrique apparente ($0,93\gamma$; γ étant la constante psychrométrique qui vaut $0,066 \text{ kPa} \cdot \text{°C}^{-1}$), s est la pente de la courbe saturante ($\text{kPa} \cdot \text{°C}$; équation 3.34), R_a ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) est le rayonnement absorbé (courtes et grandes longueurs d'ondes), e_s (kPa) est la pression de vapeur saturante, e_a (kPa) est la pression de vapeur actuelle, ρ_a ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) est la densité de l'air, C_p ($1,004 \cdot 10^{-3} \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$) est la capacité calorifique de l'air à pression constante, σ ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) est la constante de Stefan-Boltzmann, ε ($=0,97$) est l'émissivité de la végétation, et r_e ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$) est la résistance effective au transfert de la chaleur.

Le calcul de r_e se fait selon l'expression de Campbell (1977):

$$\frac{1}{r_e} = \frac{1}{r_{af}} + \frac{2}{r_r} \quad (3.7)$$

où r_r ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$) est la résistance au transfert radiatif, et s'écrit :

$$r_r = \frac{\rho_a C_p}{4\sigma T_{ak}^3} \quad (3.8)$$

et r_{af} ($\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$) est la résistance aérodynamique au transfert de la chaleur par la feuille, qui s'exprime selon Monteith (1973) comme:

$$r_{af} = 0,76r_{ca} \quad (3.9)$$

où r_{ca} est la résistance au transfert du CO_2 , prise égale à $30 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$ (Rosenberg, 1981).

Selon Monteith et Unsworth (1990), les proportions du rayonnement global, réfléchi et transmise, par une feuille sont de l'ordre de 0,25. De ce fait, la quantité absorbée du rayonnement

global par une feuille, R_a (équation 3.6), a été fixée à 50%.

3.3.2 Capacité photosynthétique des feuilles

La littérature fait état d'une grande variation des valeurs mesurées de $P_{f,max}$ (Spitters et al., 1989). Cette variation est due principalement aux conditions de mesure de la température et de la concentration du CO_2 ambiant, et à la différence des propriétés physiologiques et anatomiques des feuilles. Pour des variétés de la même culture, le coefficient de variation de $P_{f,max}$ est de l'ordre de 5-10% (Spitters et Kramer, 1986). Les valeurs de $P_{f,max}$, caractéristiques des espèces C_3 et C_4 , sont comprises entre 15 et 50 $\text{kgCO}_2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ et entre 40 et 95 $\text{kgCO}_2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ respectivement (Spitters et al., 1989; FAO, 1978). Ainsi, dans l'absence de valeurs standards ou largement reconnues, nous avons utilisé les approximations de la FAO (FAO, 1978), à savoir que sous la concentration actuelle du CO_2 atmosphérique, $P_{f,max}$ est égale à 30 et 95 $\text{kgCO}_2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ pour les cultures de type C_3 et C_4 respectivement.

3.4 Distribution et absorption de la lumière par le couvert

Le rayonnement solaire reçu à la surface d'une feuille est partiellement absorbé et dispersé (réflexion et transmission). La distribution de ce rayonnement à l'intérieur du couvert végétal est caractérisée par le coefficient d'extinction du couvert. Toutefois, seule une partie du rayonnement solaire incident peut être utilisée pour la photosynthèse. Cette gamme de longueurs d'onde, appelée rayonnement photosynthétiquement actif (PAR), est définie par la fraction du spectre d'absorption des pigments chlorophylliens (chlorophylles a et b) et des caroténoïdes (carotène et xanthophylles) des organes végétaux.

On connaît deux définitions du PAR. La communauté scientifique européenne et nord-américaine utilise pour définition du PAR la gamme 400-700 nm, alors que l'ex-URSS et les pays de l'Est le définissent comme compris entre 380 et 710 nm (Ross, 1975). En ce qui nous

concerne, nous adopterons la définition de McCree (1972), soit la gamme 400-700 nm.

Le PAR n'est pas mesuré en routine dans les stations météorologiques. Hors atmosphère, l'efficacité climatique, ϵ_c , qui exprime le rapport PAR/rayonnement global est connue et vaut environ 0,38 (Thekaekara, 1976). Cependant, la composition spectrale du rayonnement solaire est modifiée lors de la traversée de l'atmosphère. Ainsi, certains modèles estimant ϵ_c en fonction des constituants atmosphériques et de l'élévation solaire ont vu le jour (Avaste et al., 1962; Katz et al., 1981). Malheureusement, les paramètres d'entrée de ces modèles (épaisseur d'eau condensable, trouble atmosphérique ...) ne sont pas des données météorologiques classiques. Aussi, on utilise généralement des valeurs moyennes de ϵ_c caractéristiques d'une région et d'un type de journée, en considérant sa variation avec l'élévation solaire comme négligeable (Stanhill et Fuchs, 1977; Varlet-Grancher et al., 1981). Pour notre étude, nous avons utilisé l'estimation de Varlet-Grancher et al. (1981, 1989) qui à partir de mesures précises ont conclu que la valeur de ϵ_c reste remarquablement constante et égale à 0,48 pour différentes élévations solaires et conditions atmosphériques.

3.5 Interception du rayonnement par le couvert végétal

Le rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) incident, au sommet du couvert, est considéré comme égale à 48% de la valeur du rayonnement solaire global (Varlet-Grancher, 1981) et l'intensité du PAR à chaque niveau du couvert, I_z , est calculée selon l'équation de Saeki (1963):

$$I_z = (1 - \rho) \frac{0,48 I_o}{1 - m} e^{-kL} \quad (3.10)$$

où I_o ($J.m^{-2}.s^{-1}$) est le rayonnement solaire incident, ρ est la proportion réfléchiée de I_o , k est le coefficient d'extinction du couvert, et L est l'indice foliaire. m , dont la valeur est égale à 0,1

(Monteith et Unsworth, 1990), est le coefficient de transmission de la feuille qui varie peu d'une feuille à l'autre à l'intérieur du couvert et peut être considéré comme une caractéristique de la culture (Acock, 1991).

La quantité du PAR absorbé par unité de surface foliaire, I_a ($J.m^{-2}.s^{-1}$), s'écrit alors:

$$I_a = -\frac{dI_z}{dL} = (1 - \rho) \frac{0,48I_o}{1 - m} ke^{-kL} \quad (3.11)$$

La fraction du PAR réfléchi, ρ , est calculée à partir de l'expression de Goudriaan (1977):

$$\rho = \left(\frac{1 - (1 - \sigma)^{1/2}}{1 + (1 - \sigma)^{1/2}} \right) \left(\frac{2}{1 + 1,6 \sin \beta} \right) \quad (3.12)$$

où le premier terme exprime la réflexion d'un couvert constitué de feuilles ayant une distribution horizontale et le second terme exprime une correction approximative pour les feuilles ayant une distribution sphérique. β est l'élévation solaire et σ ($=0,2$) est le coefficient de diffusion de la lumière par les feuilles dans le domaine visible du spectre électromagnétique.

Le sinus de l'élévation solaire β , à l'heure h , se calcule de la façon suivante :

$$\sin \beta = \sin \lambda \cdot \sin \delta + \cos \lambda \cdot \cos \delta \cdot \cos(15(h-12)) \quad (3.13)$$

où λ est la latitude du site et δ est la déclinaison solaire (en degré) qui varie en fonction du jour de l'année, J , de la façon suivante :

$$\sin \delta = -\sin(23,45) \cos\left(\frac{360(J+10)}{365}\right) \quad (3.14)$$

3.6 Effets de la position de la feuille à l'intérieur du couvert sur la conductance au CO₂

Charles-Edwards (1981) a étudié l'effet de la position de la feuille à l'intérieur du couvert sur ses caractéristiques photosynthétiques. Des données obtenues de α_e et ϕ en différents horizons du couvert (Tableau 3.1) ont montré que selon que la feuille se situe en haut, au milieu ou en bas du couvert, la conductance globale au CO₂ (ϕ) varie d'une façon assez importante. La différence entre les valeurs de ϕ pour les feuilles se situant en haut du couvert et les feuilles se situant en bas du couvert, ne semble pas être due à l'âge de ces feuilles. En effet, d'une part, la valeur de ϕ pour les feuilles d'âge jeune situées à l'ombre, au milieu du couvert (nombre de feuilles: 20), est inférieure à celle des feuilles plus âgées situées en bas du couvert, exposées à un faible éclairage (nombre de feuilles: 9). D'autre part, les feuilles de plus jeune âge, totalement éclairées (haut du couvert), ont aussi une valeur inférieure à celle d'âge plus avancé, placées sous le même éclairage. Ainsi, on peut supposer raisonnablement que la baisse de ϕ à l'intérieur du couvert est due à la plus faible intensité lumineuse reçue par les feuilles. Par ailleurs, contrairement à ϕ , la position de la feuille à l'intérieur du couvert ne semble pas avoir un effet important sur la valeur de α_e .

Pour illustrer la variation de ϕ à l'intérieur du couvert, Charles-Edwards (1981) estime que la loi de Beer offre une approximation raisonnable. ϕ s'écrit alors:

$$\phi = \phi_o e^{-kL} \quad (3.15)$$

où ϕ_o est la valeur de ϕ en haut du couvert, k est le coefficient d'extinction de la lumière et L est l'indice foliaire.

Tableau 3.1: Valeurs de l'efficience photochimique (α_e) et de la conductance au CO_2 (ϕ) pour différentes positions des feuilles à l'intérieur du couvert végétal (d'après Charles-Edwards, 1981):

Nombre de feuilles	$\alpha_e/10^{-6}$ ($\text{gCO}_2\cdot\text{J}^{-1}$)	$\phi/10^{-3}$ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Notes
20	10,4 ($\pm 0,9$)	1,7 ($\pm 0,2$)	a
20	11,4 ($\pm 1,2$)	1,8 ($\pm 0,1$)	a
20	14,1 ($\pm 1,8$)	2,1 ($\pm 0,2$)	a
20	13,1 ($\pm 2,9$)	0,6 ($\pm 0,1$)	b
12	12,2 ($\pm 3,0$)	0,4 ($\pm 0,1$)	b
9	10,0 ($\pm 4,0$)	0,2 ($\pm 0,1$)	b
9	15,6 ($\pm 2,6$)	1,1 ($\pm 0,1$)	c

a: feuilles éclairées (haut du couvert); b: feuilles à l'ombre (milieu du couvert); c: feuilles partiellement éclairées (bas du couvert).

3.7 Correction du taux maximum de photosynthèse par rapport à la température

L'influence de la température sur le taux maximum de photosynthèse foliaire, $P_{max,t}$, est introduite en se basant sur les estimations de la FAO (1978; Figure 3.1) :

- Pour les cultures C₃, nous avons utilisé l'expression de Stewart (1983) :

$$P_{max,t}(\text{kgCO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}) = -16,585 + 5,1685T_{mdt} - 0,142T_{mdt}^2 \quad (3.16)$$

- Pour les cultures C₄, nous avons développé une nouvelle expression qui reproduit les valeurs de $P_{max,t}$ mieux que celle de Stewart (1983). Elle s'écrit:

$$P_{max,t}(\text{kgCO}_2 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}) = -232,98 + 33,835T_{mdt} - 1,085T_{mdt}^2 + 0,01079T_{mdt}^3 \quad (3.17)$$

où T_{mdt} (°C) est la température moyenne durant la partie claire du jour.

Selon Stewart (1983), T_{mdt} s'exprime en fonction des températures journalières, moyenne (T_a), maximale (T_{max}), et minimale (T_{min}):

$$T_{mdt} = T_a + \frac{2(T_{max} - T_{min})}{3,1416} \quad (3.18)$$

L'influence de la hausse du CO₂ ambiant sur $P_{max,t}$ est introduite en se basant sur l'étude de Lawlor et Mitchell (1991). En effet, la compilation des résultats expérimentaux faits au champ montrent que le doublement de la concentration ambiante actuelle du CO₂ serait responsable d'une augmentation de 50% et de 10% de la photosynthèse des plantes C₃ et C₄ respectivement.

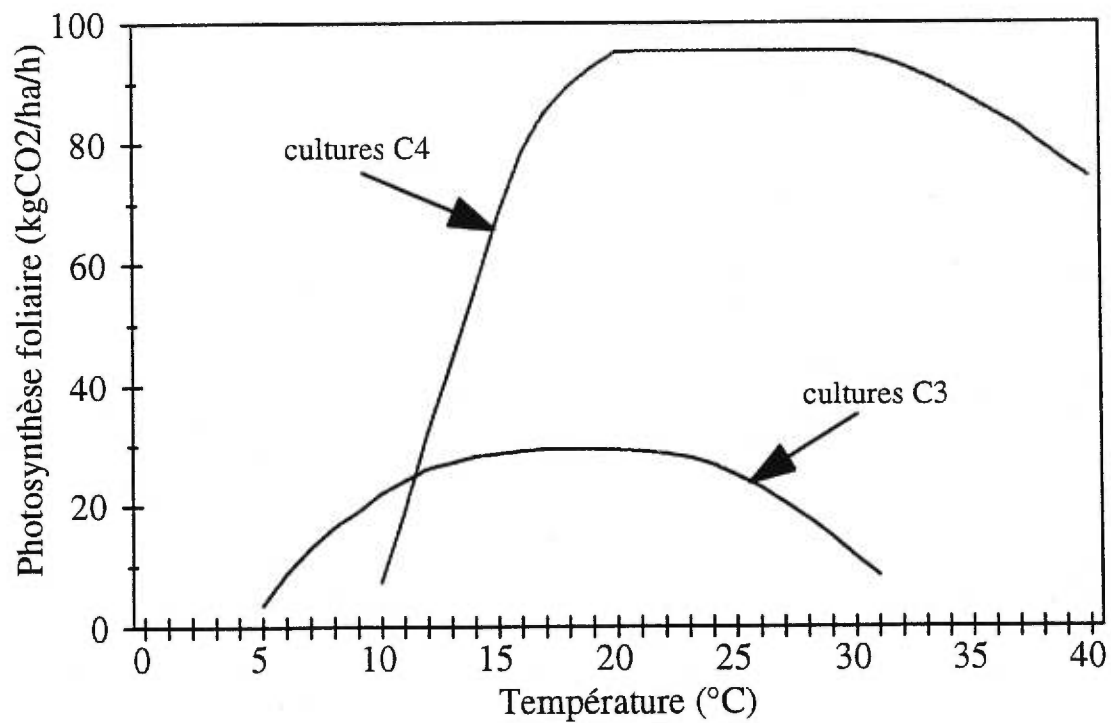


Figure 3.1: Relation entre la température et la photosynthèse foliaire des cultures C₃ et C₄ adaptées aux régions tempérées (d'après FAO, 1978).

3.8 Calcul de l'assimilation journalière nette à l'échelle du couvert

L'assimilation journalière nette à l'échelle du couvert est définie comme la différence entre le taux journalier de photosynthèse nette à l'échelle du couvert et le taux de respiration. La photosynthèse journalière nette à l'échelle du couvert se calcule en deux étapes:

1. intégration du taux instantané de photosynthèse nette à l'échelle de la feuille à l'intérieur de l'intervalle $[0, L]$ (L étant l'indice foliaire). On obtient alors le taux instantané de photosynthèse nette à l'échelle du couvert.
2. intégration de l'expression obtenue en (1) à l'intérieur de l'intervalle $[0, D]$ (D étant la longueur du jour). On obtient alors le taux journalier de photosynthèse à l'échelle du couvert.

Les taux, instantané et journalier, de photosynthèse nette à l'échelle du couvert sont obtenus à partir d'une intégration analytique et d'une intégration numérique, respectivement. L'intégration numérique est effectuée au moyen de la méthode de Gauss (Fortin, 1995). Bien entendu, pour effectuer une intégration spatiale ou temporelle, d'autres méthodes numériques peuvent être utilisées dont celle de Simpson, celle d'Euler ou celle de Runge-Kutta. Ces deux dernières, en plus de leur fiabilité, permettent d'évaluer les rétroactions du taux de la valeur de la variable intégrée (variable d'état). Toutefois, lorsque le profil de la variable en question est connu d'avance, la méthode de Gauss est suffisamment précise et utilise moins de temps de calcul que les trois dernières méthodes (Goudriaan, 1986; Fortin, 1995). D'où notre option pour la méthode de Gauss (Gauss-Legendre selon certains auteurs [Maron et Lopez, 1991]). Le modèle de culture SUCROS (Spitters et al., 1989) utilise par ailleurs cette méthode.

3.8.1 Photosynthèse nette instantanée à l'échelle du couvert (intégration spatiale)

Le taux instantané de la photosynthèse nette à l'échelle de la feuille, $P_{f,i}$ ($\text{kgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), est déduit à partir de la combinaison des équations 3.1 à 3.11 et 3.15:

$$P_{f,i} = \frac{AI_o\phi_o C}{AI_o + \phi_o C} e^{-kL} \quad (3.19)$$

où
$$A = \frac{0,48\alpha_e k(1-\rho)}{1-m}$$

Le taux instantané de la photosynthèse nette du couvert, $P_{c,i}$ ($\text{kgCO}_2\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), s'obtient alors en intégrant $P_{f,i}$ par rapport à l'indice foliaire:

$$P_{c,i} = \int_0^{LAI} P_{f,i} dL = \frac{AI_o\phi_o C}{k(AI_o + \phi_o C)} (1 - e^{-kLAI}) \quad (3.20)$$

3.8.2 Principe de la méthode de Gauss

Soit $f(x)$ la fonction à intégrer à l'intérieur de l'intervalle $[a,b]$. On souhaite donc évaluer:

$$\int_a^b f(x) dx$$

On cherche alors des points à l'intérieur de l'intervalle d'intégration de sorte que:

$$\int_a^b f(x) dx = \sum_{i=1}^n w_i f(t_i) \quad (3.21)$$

où les t_i sont appelés les points d'intégration et les w_i sont les poids d'intégration (Tableau 3.2).

Les poids d'intégration (w_i) et les points d'intégration (t_i) peuvent être déterminés en résolvant un système non linéaire de $2n$ équations que l'on obtient en prenant:

$$g(t) = t^k \quad \text{pour } k = 0, 1, 2, \dots, (2n-1)$$

On peut également démontrer que les points d'intégration de Gauss (t_i) sont les racines des polynômes de Legendre définis par la relation de récurrence suivante:

$$L_0(x) = 1$$

$$L_1(x) = x$$

$$(n+1)L_{n+1}(x) = (2n+1)L_n(x) - nL_{n-1}(x)$$

On peut alors démontrer que:

$$L_2(x) = (1/2)(3x^2 - 1) \text{ dont les racines sont } \pm \sqrt{1/3} = \pm 0,5773502629 .$$

et

$$L_3(x) = (x/2)(5x^2 - 1) \text{ dont les 3 racines sont } 0 \text{ et } \pm \sqrt{3/5} = \pm 0,774596669 .$$

ainsi de suite.

Le degré de précision est égal à $2n-1$.

Dans le calcul de $\int_a^b f(x)dx$, on effectue le changement de variable suivant:

$$x = \frac{(b-a)t + (a+b)}{2} \quad \text{et} \quad dx = \frac{b-a}{2} dt$$

qui envoie l'intervalle $[-1, 1]$ sur un intervalle quelconque $[a, b]$.

Ce changement de variable nous permet d'écrire que :

$$\int_a^b f(x)dx = \int_{-1}^1 f\left(\frac{(b-a)t + (a+b)}{2}\right) \frac{b-a}{2} dt = \frac{b-a}{2} \int_{-1}^1 g(t)dt \quad (3.22)$$

où
$$g(t) = f\left(\frac{(b-a)t + (a+b)}{2}\right)$$

On cherche par la suite des expressions de la forme:

$$\int_{-1}^1 g(t) dt = \sum_{i=1}^n w_i g(t_i) \quad (3.23)$$

3.8.3 Photosynthèse journalière nette à l'échelle du couvert (intégration temporelle)

La photosynthèse journalière nette à l'échelle du couvert, $P_{c,j}$, est obtenue à partir de l'intégration de, $P_{c,i}$, à l'intérieur de l'intervalle $[0,D]$ où D est la longueur du jour. Pour ce faire, la méthode numérique de Gauss à trois points est utilisée. Ce nombre de points (3), comme il a été démontré par Goudriaan (1986), est celui qui permet d'obtenir le meilleur rapport précision/temps de calcul. En effet, en appliquant trois points d'intégration, l'écart entre la solution analytique et la solution numérique de l'équation hyperbolique de la photosynthèse est inférieur à 1% (0,7% environ).

Pour tenir compte de la variation horaire de l'intensité lumineuse, l'algorithme de Charles-Edwards (1981) est utilisé:

$$I_o = \frac{S}{D} \left[1 + \sin\left(\frac{2\pi t}{D} + \frac{3\pi}{2}\right) \right] \quad 0 \leq t \leq D \quad (3.24)$$

$$I_o = 0 \quad t > D$$

où S est l'énergie lumineuse journalière incidente et D est la longueur du jour.

Tableau 3.2: Principales quadratures de Gauss (d'après Fortin, 1995).

n	Points d'intégration t_i	Poids d'intégration w_i	Degré de précision
1	0	2	1
2	-0,577 350 262 9 0,577 350 262 9	1 1	3
3	-0,774 596 669 0 0,774 596 669	0,555 555 556 0,888 888 889 0,555 555 556	5
4	-0,861 136 312 -0,339 981 044 0,339 981 044 0,861 136 312	0,347 854 845 0,652 145 155 0,652 145 155 0,347 854 845	7
5	-0,906 179 846 -0,538 469 310 0 0,538 469 310 0,906 179 846	0,236 926 885 0,478 628 670 0,568 888 889 0,478 628 670 0,236 926 885	9

La longueur du jour, D (h), se calcule selon l'expression suivante :

$$D = 12 + \left(\frac{24}{100}\right) \arcsin(\operatorname{tg}\lambda - \operatorname{tg}\delta) \quad (3.25)$$

où λ est la latitude du site, δ est la déclinaison solaire (en degré; équation 3.14) et tg étant la fonction tangente.

Les trois points d'intégration répondant au critère de Gauss ont été sélectionnés entre midi et la fin de la journée :

$$t_h = 12 + 0,5D(0,5 + p(0,15)^{1/2}) \quad p = -1, 0, 1 \quad (3.26)$$

Le taux journalier de photosynthèse nette à l'échelle du couvert, $P_{c,j}$ ($\text{kgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), est alors obtenu comme le poids moyen du taux instantané de la photosynthèse nette à l'échelle du couvert, $P_{c,i}$, aux trois points sélectionnés :

$$P_{c,j} = \frac{D}{3,6} (P_{c,i,-1} + 1,6P_{c,i,0} + P_{c,i,1}) \quad (3.27)$$

Dans le processus de photosynthèse, le CO_2 est réduit sous forme de carbohydrates (CH_2O). Pour chaque kilogramme de CO_2 absorbé, 30/44 kg de CH_2O est formé. Les valeurs numériques, 30 et 44, représentent respectivement les poids moléculaires du CH_2O et du CO_2 .

3.8.4 Respiration

La respiration se produit dans les mitochondries des cellules vivantes et est appelée respiration "mitochondriales" ou "nocturne". Elle implique l'oxydation du carbone à travers la suppression de H^+ et des électrons, et le rejet du CO_2 .

Les mesures du taux de respiration en absence de lumière (durant la nuit) ont montré que son amplitude dépend du taux de photosynthèse durant le jour précédant, qui elle-même (la photosynthèse) dépend de l'intensité lumineuse durant le jour (Baker et al., 1972; Sale, 1974). En plus de l'influence de l'intensité lumineuse durant le jour, le taux de respiration des cultures dépend fortement de la température (Baker et al., 1972; Sale, 1974). En effet, le taux de respiration augmente en fonction de la température selon l'équation suivante (Biscoe et Gallagher, 1977):

$$R_2 = R_1 Q_{10}^{\left(\frac{T_2 - T_1}{10}\right)} \quad (3.28)$$

où R_1 et R_2 sont les taux de respiration aux températures T_1 et T_2 respectivement et Q_{10} est le taux d'augmentation de la respiration lorsque la température augmente de 10°C.

Cependant, s'il est commun de trouver dans la littérature que la valeur de Q_{10} généralement admise est égale à 2 (Penning de Vries et van Laar, 1982; Kase et Catsky, 1984; Weir et al., 1984; Conroy et al., 1994), certains auteurs (Biscoe et Gallagher, 1977; Gifford, 1994) rapportent que beaucoup d'expériences ont montré que Q_{10} peut avoir des valeurs largement différentes de 2.

McCree (1970, 1974) a accordé un double rôle à la respiration: croissance et entretien. La respiration d'entretien est proportionnelle à la masse de matière sèche du matériel végétal. Il s'agit ici de la dégradation d'anciennes molécules protéiques (Thornley, 1977) qui libère une énergie inhérente au maintien des cellules de l'organisme en vie. La respiration de croissance est proportionnelle à la photosynthèse; elle correspond à l'énergie de transformation des assimilats primaires de la photosynthèse. Ainsi, selon McCree (1970), la respiration, R_p , peut s'exprimer comme:

$$R_p = aP_{c,j} + C_T W \quad (3.29)$$

où $P_{c,j}$ est la production photosynthétique, W (kg.m^{-2}) est le poids de matière sèche accumulé par la culture, a est la fraction de $P_{c,j}$ respirée lors de la synthèse du nouveau matériel cellulaire et C_T est la fraction de W respirée chaque jour pour le maintien de la structure cellulaire déjà existante.

La relation de McCree (équation 3.29) a été développée d'après les travaux effectués sur le trèfle blanc croissant sous un environnement contrôlé à une température de 20°C et une intensité lumineuse (PAR) de 100 W.m^{-2} . Les valeurs de a et de C_T observées sont 0,25 et 0,15 respectivement (McCree, 1970). Plus tard, Penning de Vries (1972) et McCree (1974) ont démontré que les valeurs de a et de C_T qu'avait déterminées McCree (1970) pour le trèfle blanc sont applicables aux cultures du sorgho et du maïs croissant sous un environnement contrôlé. Par ailleurs, d'autres expériences réalisées sur le coton au champ, à 20 °C, par Backer et al. (1972) ont montré que les valeurs, de a et de C_T , sont de l'ordre de 0,37 et 0,013 respectivement. Enfin, les observations faites par Biscoe et al. (1975) s'étalant sur une période de 11 semaines, sur l'orge croissant sous les conditions du champ, ont permis de conclure que l'équation 3.29 décrit adéquatement le taux de respiration et que les valeurs de a et de C_T pour cette culture sont égales à 0,34 et 0,012 respectivement. De ce fait, d'une part, la valeur 0,34 est utilisée dans CYSS pour le coefficient de respiration de croissance. D'autre part, pour le calcul du coefficient de respiration de maintien, C_T , l'expression de McCree (1974) qui exprime ce dernier en fonction de la température, selon que la culture est du type légumineuse ou non légumineuse, est utilisée :

$$C_T = C_{30} (0,044 + 0,0019T_a + 0,0010T_a^2) \quad (3.30)$$

où T_a (°C) est la température moyenne de l'air et C_{30} est la valeur du coefficient de respiration de maintien à 30°C. C_{30} étant égale à 0,0283 et 0,0108 respectivement pour les cultures légumineuses et non-légumineuses.

3.8.5 Assimilation nette

Finalement le taux journalier d'assimilation nette, $A_{n,j}$ ($\text{kgCH}_2\text{O.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$), s'obtient en calculant la différence entre la production photosynthétique et les pertes par respiration:

$$A_{n,j} = P_{c,j} - R_p \quad (3.31)$$

3.8.6 Rendements, potentiel et actuel

Le rendement potentiel en matière sèche, RP (kg.ha^{-1}), s'obtient alors comme:

$$RP = HI. \sum_{j=DSC}^{FSC} A_{n,j} \quad (3.32)$$

où HI est l'indice de récolte, DSC est le début de la saison de croissance, et FSC est la fin de la saison de croissance.

Tandis que le rendement actuel en matière sèche, RA (kg.ha^{-1}) s'obtient comme:

$$RA = RP . FSH . WP . SI \quad (3.33)$$

où FSH est le facteur de stress hydrique, WP est la faisabilité de la récolte (emprunté du terme anglais "workability"), et SI est l'indice du sol qui exprime la qualité du sol spécifique à chaque culture.

La classification de la qualité du sol relative à chaque culture, de Dumanski et Stewart (1983), a été utilisée: les sols appropriés ont un SI égale à 1, les sols moyennement appropriés ont un SI égale à 0,75, et les sols non appropriés à la culture ont un SI égale à 0.

3.9 Calcul du coefficient de stress hydrique

L'expression de Doorenbos et Kassam (1979) est utilisée pour évaluer la perte du rendement due au stress hydrique. Cette expression s'écrit:

$$FSH = 1 - K_y \left(1 - \frac{EA}{EP}\right) \quad (3.34)$$

où FSH est le facteur de stress hydrique, K_y est le coefficient du rendement, EA est l'évapotranspiration actuelle, et EP est l'évapotranspiration potentielle.

3.9.1 Calcul de l'évapotranspiration potentielle

Durant les vingt dernières années, le calcul de l'évapotranspiration des cultures se faisait en procédant selon l'une des quatre méthodes recommandées par Doorenbos et Pruitt (1975). Parmi ces méthodes, on trouve celle de Penman qui est la plus couramment utilisée (Smith et al., 1996), notamment dans le modèle de culture de la FAO modifié (Stewart, 1983). Cependant, d'après ces mêmes auteurs, les tests effectués sur la performance de cette méthode dans plusieurs régions du monde ont montré que son utilisation peut conduire à une surestimation du taux réel d'évapotranspiration, pouvant atteindre 30%. D'autres auteurs, Allen et al. (1989), ont évalué la performance de plusieurs modèles, en différentes régions du monde, en utilisant des données lysimétriques. Ils ont conclu que le modèle de Penman-Monteith (P-M dans la suite du texte; Monteith, 1965) est celui qui permet d'obtenir la meilleure estimation du taux d'évapotranspiration. Ces résultats sont, en effet, tout à fait prévisibles pour la raison suivante: le modèle de P-M, contrairement à celui de Penman, tient compte de la résistance de la surface de la feuille à l'évaporation, traduisant ainsi la variation de l'ouverture des stomates pour répondre au déficit de l'air ambiant à la saturation. Ainsi, dans le but d'effectuer des analyses de l'effet du changement du climat sur la production agricole, il nous semble alors plus réaliste d'utiliser l'approche de P-M plutôt que celle de Penman.

Selon P-M, l'évaporation, E ($\text{kg.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ ou mm.d^{-1}), s'écrit:

$$E = \frac{1}{L_v} \cdot \frac{[s(Q^* + Q_g) + \frac{\rho_a C_p (e_s - e_a)}{r_a}]}{s + \gamma(1 + \frac{r_c}{r_a})} \quad (3.35)$$

où L (MJ.kg^{-1}) est la chaleur latente de vaporisation, Q^* ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$) est le rayonnement net, Q_g ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$) est le flux de chaleur dans le sol, ρ_a (kg.m^{-3}) est la densité de l'air, C_p ($1,004.10^{-3} \text{ MJ.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$) est la capacité calorifique de l'air, e_s (kPa) est la pression de vapeur saturante, e_a (kPa) est la pression de vapeur, r_a (d.m^{-1}) est la résistance aérodynamique au transfert de la chaleur et de masse, r_c (d.m^{-1}) est la résistance du couvert, γ ($0.066 \text{ kPa.°C}^{-1}$) est la constante psychrométrique, et s (kPa.°C^{-1}) est la pente de la courbe saturante.

Le rayonnement net, Q^* ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$), au-dessus de la culture est calculé à partir de l'équation du bilan radiatif:

$$Q^* = (1 - \alpha_a)K \downarrow + L \downarrow - L \uparrow \quad (3.36)$$

où $K \downarrow$ est le rayonnement incident de courtes longueurs d'ondes, $L \downarrow$ est le rayonnement incident de grandes longueurs d'ondes, $L \uparrow$ est le rayonnement de grandes longueurs d'ondes émis par la surface, et α_a est l'albédo de la surface (0,23; Burman et Pochop, 1994).

Le rayonnement net de grandes longueurs d'ondes, L^* (W.m^{-2}), est calculé d'après l'expression de Brunt (1932):

$$L^* = L \downarrow - L \uparrow = \varepsilon_e \sigma \left(\frac{T_{\min}^4 + T_{\max}^4}{2} \right) \quad (3.37)$$

où ε_e est l'émissivité effective de la surface (combinaison des émissivités, du sol et de la végétation), et T_{\min} (K) et T_{\max} (K) sont respectivement les températures, minimale et maximale, de l'air.

ε_e est calculée d'après l'expression de Idso et Jackson (1969):

$$\varepsilon_e = -\left(a \frac{K \downarrow}{K_c \downarrow} + b\right) \left(-0,02 + 0,261 e^{-7,77 \cdot 10^{-4} (273 - T_a)^2}\right) \quad (3.38)$$

où a et b sont des coefficients de régression caractéristiques du climat de la région d'application, $K_c \downarrow$ est le rayonnement solaire incident sous un ciel clair, et T_a (K) est la température moyenne de l'air. En ce qui nous concerne, a et b ont été prises égales à 1 et 0 respectivement. Ces valeurs sont des caractéristiques des régions humides et semi-humides (Burman et Pochop, 1994), tandis que $K_c \downarrow$ est calculé en divisant l'intensité du rayonnement photosynthétiquement actif prévu, sous un ciel parfaitement clair (de Wit, 1965), par la valeur 0,48.

Le flux de chaleur dans le sol, Q_g (MJ.m⁻².d⁻¹), est calculé selon les recommandations de Kincaid et Heermann (1974), et Wright (1982):

$$Q_g = 0,3768 \left(T_J - \frac{T_{J-1} + T_{J-2} + T_{J-3}}{3} \right) \quad (3.39)$$

où l'indice J indique le jour julien et T (°C) est la température moyenne de l'air au jour J . La forme de cette équation indique que Q_g devient négatif au printemps lorsque le sol se réchauffe.

La chaleur latente de vaporisation, L_v (MJ.kg⁻¹), et la densité de l'air, ρ_a (kg.m⁻³), sont calculées respectivement à partir des expressions de Burman et al. (1987) et Jones (1983):

$$L_v = 2,501 - 0,02360IT_a \quad (3.40)$$

$$\rho_a = 1,29 - 0,0041T_a \quad (3.41)$$

où T_a (°C) est la température moyenne de l'air.

Les pressions de vapeur, saturante et actuelle, e_s et e_a (kPa), sont calculées à partir des expressions de Tetens (1930) :

$$e_s = 0,611e^{\frac{17,27T_a}{T_a+237,3}} \quad (3.42)$$

$$e_a = 0,611e^{\frac{17,27T_{\min}}{T_{\min}+237,3}} \quad (3.43)$$

où T_{\min} (°C) est la température minimale de l'air.

La pente de vapeur saturante, s (kPa.°C⁻¹), est calculée selon l'approximation de Dillely (1968) :

$$s = \frac{2502,9}{(T_a + 237,2)^2} e^{\frac{17,27T_a}{T_a+237,3}} \quad (3.44)$$

La résistance aérodynamique, r_a (m.d⁻¹), est calculée selon l'expression recommandée par Campbell (1977):

$$r_a = \frac{\text{Ln}\left(\frac{Z_r - 0,774H}{0,026H}\right)\text{Ln}\left(\frac{Z_r - 0,64H}{0,13H}\right)}{0,16u} \quad (3.45)$$

où Z_r (m) est la hauteur de référence, H (m) la hauteur de la plante, et u (m.d⁻¹) est la vitesse du vent. Z_r étant égale à 2m/3m pour les cultures dont la hauteur maximale de la plante, H_{max} , est inférieure/supérieure à 2m.

La hauteur de la culture au jour i , H_i , est calculée à partir de l'expression de Sharpley et Williams (1990):

$$H_i = H_{max} (HUF_i)^{1/2} \quad (3.46)$$

où H_{max} est la hauteur maximale que peut atteindre la culture, et HUF_i est le facteur d'unités thermiques au jour i calculé comme:

$$HUF_i = \frac{HUI_i}{HUI_i + e^{(ah_1 - ah_2 HUI_i)}} \quad (3.47)$$

où ah_1 et ah_2 sont des paramètres spécifiques à la culture, et HUI_i est l'indice thermique pour le jour i calculé comme:

$$HUI_i = \sum_{k=1}^i \frac{HU_k}{PHU} \quad (3.48)$$

où PHU est l'accumulation potentielle des unités thermiques et HU_k est l'accumulation journalière des unités thermiques. Selon les cultures, les unités thermiques sont exprimées soit en degrés jours de croissance, DD_t (l'indice t exprime la température de base), soit en unités thermiques maïs,

UTM. Les expressions de HU_k sont :

- degrés jours de croissance, DD_t :

$$HU_k = T_{a,k} - T_b, HU_k \geq 0 \quad (3.49)$$

où $T_{a,k}$ (°C) est la température moyenne de l'air au jour k , T_b (°C) est la température de base spécifique à chaque culture (aucune croissance ne se produit lorsque T_a est inférieure ou égale à T_b).

- unités thermiques maïs, UTM (Brown, 1978):

$$HU_k = [1,8f_{min} + (3,33f_{max}) - (0,084f_{max}^2)] \quad (3.50)$$

$$\text{avec } f_{max} = T_{max} - 10 \geq 0$$

$$f_{min} = T_{min} - 4,44 \geq 0$$

où T_{min} (°C) et T_{max} (°C) sont respectivement les températures, minimale et maximale, de l'air.

Du fait que les feuilles éclairées contribuent plus que les feuilles à l'ombre au taux d'évaporation, seulement la moitié de l'indice foliaire a été considérée comme effective. Cette considération est supportée par des évidences expérimentales sur les échanges gazeux (Tanner et Fuchs, 1968; Szeicz et Long, 1969) et par des observations de l'effectivité de l'indice foliaire dans la transpiration (Allen et al., 1985; Allen et al., 1989). Ainsi, pour le calcul de la résistance du couvert, r_c , l'équation d'Allen et al. (1989) est utilisée :

$$r_c = \frac{r_s}{0,5LAI} \quad (3.51)$$

où r_s (m.d^{-1}) est la résistance stomatique et LAI est l'indice foliaire.

L'effet de l'augmentation du CO₂ ambiant sur l'évapotranspiration est introduit en utilisant les expressions d'Allen et al. (1985). Ces dernières reproduisent les résultats expérimentaux de Rodgers et al. (1983a; 1983b) d'expériences effectuées dans des chambres ouvertes (Open-Top chambers) pour des quantités de CO₂ variant de 340 à 1000 ppm. Ces résultats montrent que la résistance stomatique, r_s (m.s⁻¹), du soya (culture C₃) et du maïs (culture C₄) obéissent, respectivement, aux équations (3.52a) et (3.52b):

$$r_s = \frac{1}{4,85 \cdot 10^{-2} - 7 \cdot 10^{-5} C + 3,4 \cdot 10^{-8} C^2} \quad (3.52a)$$

$$r_s = \frac{1}{3,28 \cdot 10^{-2} - 5,49 \cdot 10^{-5} C + 2,96 \cdot 10^{-8} C^2} \quad (3.52b)$$

où C (ppm) est la concentration ambiante du CO₂.

Les équations 3.52a et 3.52b indiquent que d'une part, tant dans le cas du soya que dans celui du maïs, r_s augmente lorsque C augmente, et que d'autre part, r_s (C₄) est supérieure à r_s (C₃) sous de faibles concentrations de CO₂ comme sous des concentrations plus élevées.

Le développement de la culture caractérisé par l'augmentation de l'indice foliaire, est simulé le long de la saison de croissance au moyen de l'expression de Stewart (1983) déduite des travaux de Watson (1971) et Thorns (1971):

- pendant les 42 premiers jours de la saison de croissance:

$$LAI = 2,77 \cdot 10^{-5} LSC^{3,113} \quad (3.53)$$

- pour le reste de la saison de croissance:

$$LAI = 6,691 - 0,9106LSC + 0,0398LSC^2 - 6,529 \cdot 10^{-4} LSC^3 + 4,693 \cdot 10^{-6} LSC^4 - 1,257 \cdot 10^{-8} LSC^5 \quad (3.54)$$

où LSC est la longueur de la saison de croissance.

3.9.2 Calcul de l'évapotranspiration actuelle (EA)

Le déficit hydrique relatif est calculé selon la méthode du bilan hydrique (Baier et al., 1979) qui s'écrit sous la forme:

$$\frac{EA}{EP} = \frac{\sum_{i=DSC}^{FSC} (P_i + \Delta Hs - R_i)}{\sum_{i=DSC}^{FSC} EP_i} \quad (3.55)$$

où DSC est le début de la saison de croissance, FSC est la fin de la saison de croissance, P_i (mm) est la précipitation au jour i , EA (mm) est l'évapotranspiration actuelle, EP (mm) est l'évapotranspiration potentielle, ΔHs (mm) est la variation de l'humidité du sol entre le début de la saison de croissance et le jour i , et R (mm) est le ruissellement.

ΔHs est calculée durant la saison de croissance sur une base journalière, à partir de l'expression suivante:

$$Hs_i = Hs_{i-1} - EP_{s_i} \left(\frac{EA_s}{EP_{s_i}} \right) - EP_{p_i} \left(\frac{EA_p}{EP_{p_i}} \right) + P_i - R_i \quad (3.56)$$

où Hs_i est l'humidité du sol disponible à la fin du jour i , Hs_{i-1} est l'humidité du sol au début de la journée; EP_s et EP_p sont respectivement l'évaporation et la transpiration, potentielles, du sol et de

la plante; EA_s et EA_p sont respectivement l'évaporation et la transpiration, actuelles, du sol et de la plante.

Pour résoudre les équations 3.55 et 3.56, l'algorithme de Ritchie et Johnson (1990), séparant la contribution de la plante et celle du sol à l'évapotranspiration, est utilisé. Pour ce faire, l'évaporation du sol, EP_s , est calculée en utilisant l'équation de Priestley-Taylor (Priestley et Taylor, 1972) :

$$E = \frac{1}{L_v} \alpha_{pt} \frac{s(Q_s^* + Q_g)}{s + \gamma} \quad (3.57)$$

où E est l'évaporation (mm.d⁻¹), α_{pt} est un coefficient empirique et vaut 1,26, et Q_s^* est le rayonnement net au dessous du couvert végétal. Pour les autres variables, voir équation 3.35.

L'expression de Ritchie (1972) est utilisée pour le calcul de Q_s^* :

$$Q_s^* = Q_g^* \cdot e^{-0,4LAI} \quad (3.58)$$

Pour les plantes, les mesures effectuées par Ritchie et Johnson (1990) montrent que la transpiration, EP_p , tend asymptotiquement vers une limite qui est pratiquement atteinte lorsque l'indice foliaire est égal à 3 :

$$EP_p = EP (1 - e^{-LAI}) \quad LAI \leq 3 \quad (3.59a)$$

$$EP_p = EP \quad LAI > 3 \quad (3.59b)$$

L'évapotranspiration de référence, EP , étant calculée selon l'équation 3.35.

Les relations 3.57 et 3.59 doivent satisfaire, bien évidemment, à la condition suivante:

$$EP_p + EP_s \leq EP \quad (3.60)$$

L'évaporation actuelle du sol, EA_s , et la transpiration actuelle de la plante, EA_p , sont obtenues graphiquement à partir de la technique d'extrapolation de Baier et al. (1979). Selon cette dernière, le rapport EA/EP se déduit en fonction de l'humidité disponible du sol (Figure 3.2). Pour ce faire, quatre capacités maximales de rétention de l'eau par le sol, CMRS, sont sélectionnées pour représenter les différentes textures de sol qu'on rencontre au Québec (Stewart, 1983): les loam sableux ont une CMRS de 100 mm, les loam sableux dont le sable est très fin ont une CMRS de 150 mm, les loam limoneux et les loam argileux ont une CMRS de 200 mm, et les argiles limoneux et les argiles lourdes ont une CMRS de 280 mm. Les trois courbes de la figure 3.2 sont alors utilisées de la façon suivante:

- la courbe C assume qu'aucune proportion de l'eau contenue dans le sol n'est disponible tandis que les courbes G et H assument que 30 et 50 %, respectivement, de cette eau est disponible pour l'évaporation.
- pour les quatre CMRS, l'évaporation du sol est caractérisée par la courbe C.
- la transpiration de la plante est caractérisée par la courbe H pour les sols ayant des CMRS de 100 et 150 mm, et par la courbe G pour les sols ayant des CMRS de 200 et 280 mm.

Il faut noter que l'algorithme de Baier et al. (1979) suppose que le sol est séparé en deux couches:

- une couche de surface contenant 25% de la capacité maximale de rétention de l'eau par le sol (CMRS). L'humidité de cette couche sert à répondre à la demande évaporative du sol comme celle de la plante.
- une couche racinaire contenant 75% de la CMRS. L'humidité de cette couche sert à répondre seulement à la demande évaporative de la plante.

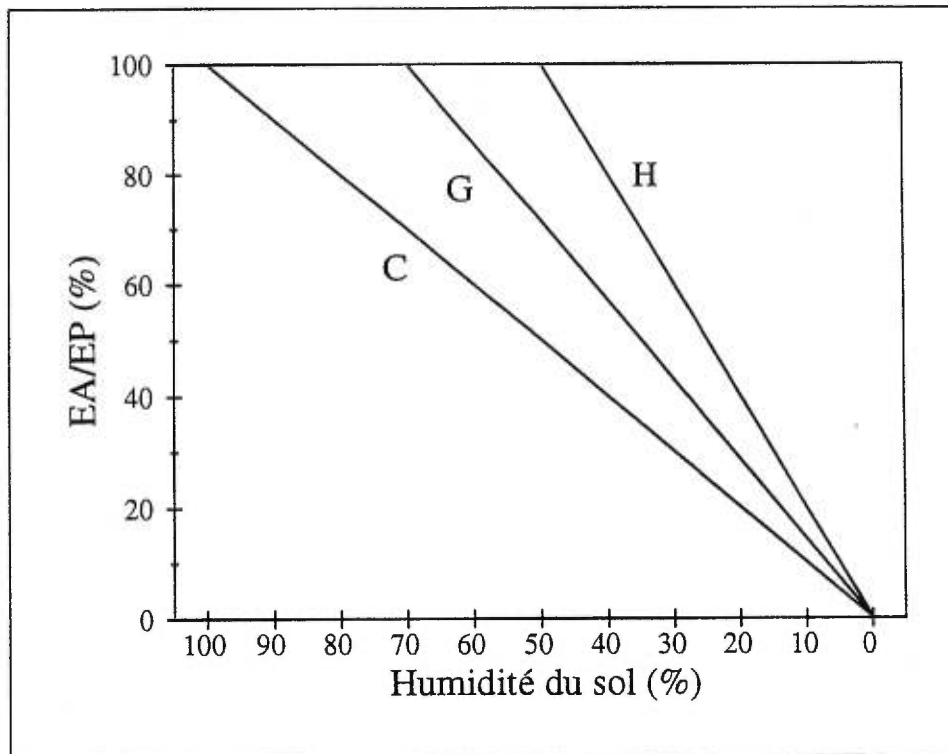


Figure 3.2: Relation entre EA/EP et l'humidité du sol (d'après Baier et al., 1979). EA étant l'évapotranspiration actuelle et EP l'évapotranspiration potentielle.

Le calcul du bilan hydrique est assumé commencer le jour où la valeur de EP excède celle des précipitations, P . Aussi, on nomme cette date le début de la saison de croissance humide (DSCH).

Dans le cas où le sol demeurerait gelé après la date où EP excède P , Baier et al. (1979) considèrent que les pertes d'eau par la surface à travers l'évaporation du sol sont négligeables tant que la couche de surface n'est pas complètement dégelée. Ceci se produit 9 jours après que la température moyenne de l'air ait excédé 0°C . Ainsi, dans le cas où la date où EP deviendrait supérieure à P avant que la température moyenne de l'air n'ait dépassé 0°C , le DSCH se produit 9 jours après la date où la température moyenne de l'air ait dépassé 0°C .

L'humidité totale du sol en réserve au début de la saison de croissance humide, S_{DSCH} , est calculée à partir du rapport P/EP :

- si P/EP est supérieur ou égal à 1 alors S_{DSCH} prend la valeur de la capacité au champ, S_{CC} , (i.e. 100, 150, 200 ou 280 mm).
- si P/EP est inférieur à 1 alors S_{DSCH} est égal à $S_{CC} \times P/EP$.

De plus, Stewart (1983) considère que la réduction de l'humidité du sol disponible ne se fait pas de façon égale entre la couche de surface et la couche racinaire. En effet:

$$S_{DSCH} = 0,25S_{CC} + 0,75S_{CC} - [S_{CC} (1 - \frac{EA}{EP})] = S_s + S_p \quad (3.61)$$

où S_s (mm) est l'humidité du sol disponible dans la couche de surface et S_p (mm) est l'humidité du sol disponible dans la couche racinaire.

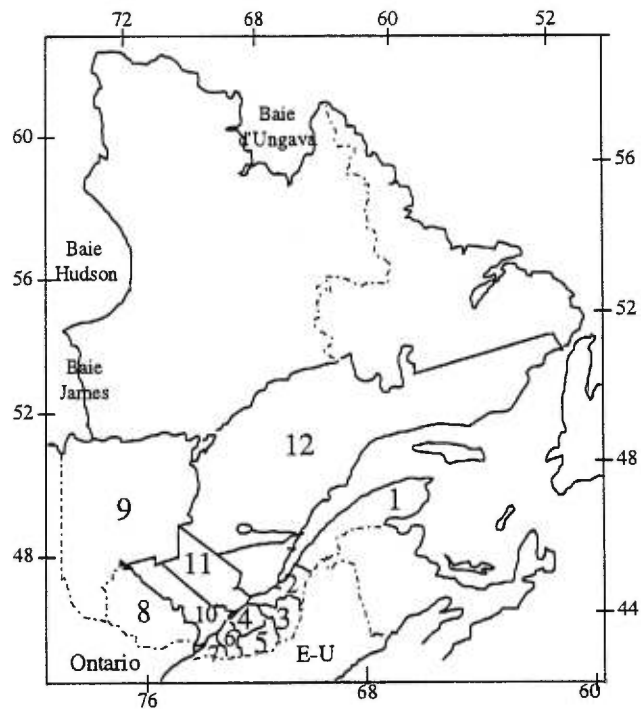
Chapitre IV

VALIDATION DE CYSS ET SIMULATION DES EFFETS, DIRECT ET INDIRECT, DE LA HAUSSE DU CO₂ ATMOSPHERIQUE SUR LE RENDEMENT DES CULTURES¹

4.1 Validation de CYSS

Cette partie de l'étude a comme objectif la validation de CYSS, la comparaison entre sa performance et celle de FAOm, et l'évaluation des effets de l'augmentation du CO₂ atmosphérique sur dix des cultures pratiquées aux douze régions agricoles du Québec. Ces cultures comprennent des céréales C₃ (blé, orge et avoine) une céréale C₄ (maïs), des cultures légumineuses (soya, fèves et pois-vert), une culture oléagineuse (tournesol), une culture végétale (tomate) et une culture spéciale (pomme de terre). Pour la validation de CYSS, les rendements simulés sous les conditions climatiques actuelles ont été comparés aux rendements observés, rapportés par la division des statistiques du ministère de l'agriculture des pêches et de l'alimentation du Québec (MAPAQ), dans chacune des douze régions agricoles du Québec (Figure 4.1). Pour le blé, l'orge, l'avoine, le soya et la pomme de terre, les rendements observés n'existent que pour la période 1985-1992, tandis que pour la tomate, les publications du MAPAQ ne donnent, malheureusement, que la valeur du rendement moyen observé au Québec. Finalement, pour les autres cultures étudiées (fèves, pois-vert et tournesol), la consultation de ces publications et les contacts entrepris auprès du MAPAQ ne nous ont pas permis d'avoir les rendements observés. De ce fait, notre validation de CYSS portera seulement sur sept des dix cultures étudiées.

¹ Ce chapitre comporte certains résultats publiés dans *Agricultural and Forest Meteorology* et des résultats soumis pour publication dans la revue *Agricultural Systems*.



- | | | |
|-----------------------------|--------------|---------------------------|
| 1: Bas -St-Laurent-Gaspésie | 2: Québec | 3:Beauce-Appalaches |
| 4: Bois-Francs | 5: Estrie | 6: Richelieu-St-Hyacinthe |
| 7: Montréal-Sud | 8: Outaouais | 9: Abitibi Témiscamingue |
| 10: Montréal-Nord | 11: Mauricie | 12: Saguenay-Lac-St-Jean |

Figure 4.1: Régions agricoles du Québec.

Comme variables climatiques d'entrée, CYSS requiert les valeurs journalières des températures, moyenne, maximale et minimale, de l'air; des précipitations, de la vitesse du vent, de la pression de vapeur et du rayonnement solaire. Pour notre climat actuel, nous avons utilisé les moyennes mensuelles des normales climatiques correspondant à la période 1961-90. Le tableau 4.1 illustre les caractéristiques agroclimatiques de chacune de douze régions agricoles du Québec. Les données climatiques enregistrées aux stations météorologiques figurant au tableau 4.2 ont été utilisées (Environnement Canada, 1993). L'extraction des valeurs journalières des températures, moyennes, maximales et minimales; et du rayonnement solaire est réalisée au moyen de l'algorithme de Brooks (1943), tandis que les valeurs journalières des précipitations et de la vitesse du vent sont calculées comme le rapport des valeurs mensuelles sur le nombre de jours dans le mois.

Les valeurs des paramètres agronomiques, et relatifs à la qualité du sol et à la faisabilité de la récolte sont données dans les tableaux 4.3, 4.4 et 4.5 respectivement. Aussi, on note que les valeurs de l'indice de récolte, *HI*, utilisées pour nos simulations sont différentes de celles utilisées dans El Maayar et al. (1997). En effet, les valeurs de *HI* utilisées dans El Maayar et al. (1997) sont prises de Doorenbos et Kassam (1979), tandis que celles utilisées ici sont prises de Williams et al. (1990) du fait qu'elles reflètent mieux les valeurs observées de ce paramètre sous les conditions agricoles Nord-Américaines.

En comparant les rendements moyens observés et simulés, on constate que généralement CYSS reproduit d'une façon satisfaisante les rendements observés (Figure 4.2). C'est dans le cas du maïs (culture C₄) où la différence relative entre l'observation et la simulation est la plus importante (~26%). Toutefois, il faut noter que selon cette simulation, le maïs requiert 2700 unités thermiques (*UTM*) pour atteindre la maturation (Tableau 4.3). Cependant, l'étude de Blain et al. (1995) avait clairement démontré que dans le but d'obtenir les rendements les plus élevés possibles, la majorité des agriculteurs ontariens cultivent des variétés du maïs nécessitant 2900 *UTM* même si cela comporte le risque que le taux d'accumulation des *UTM* durant la saison de croissance n'atteint pas 2900. Ainsi, dans la mesure où cette pratique existe aussi au Québec, il est

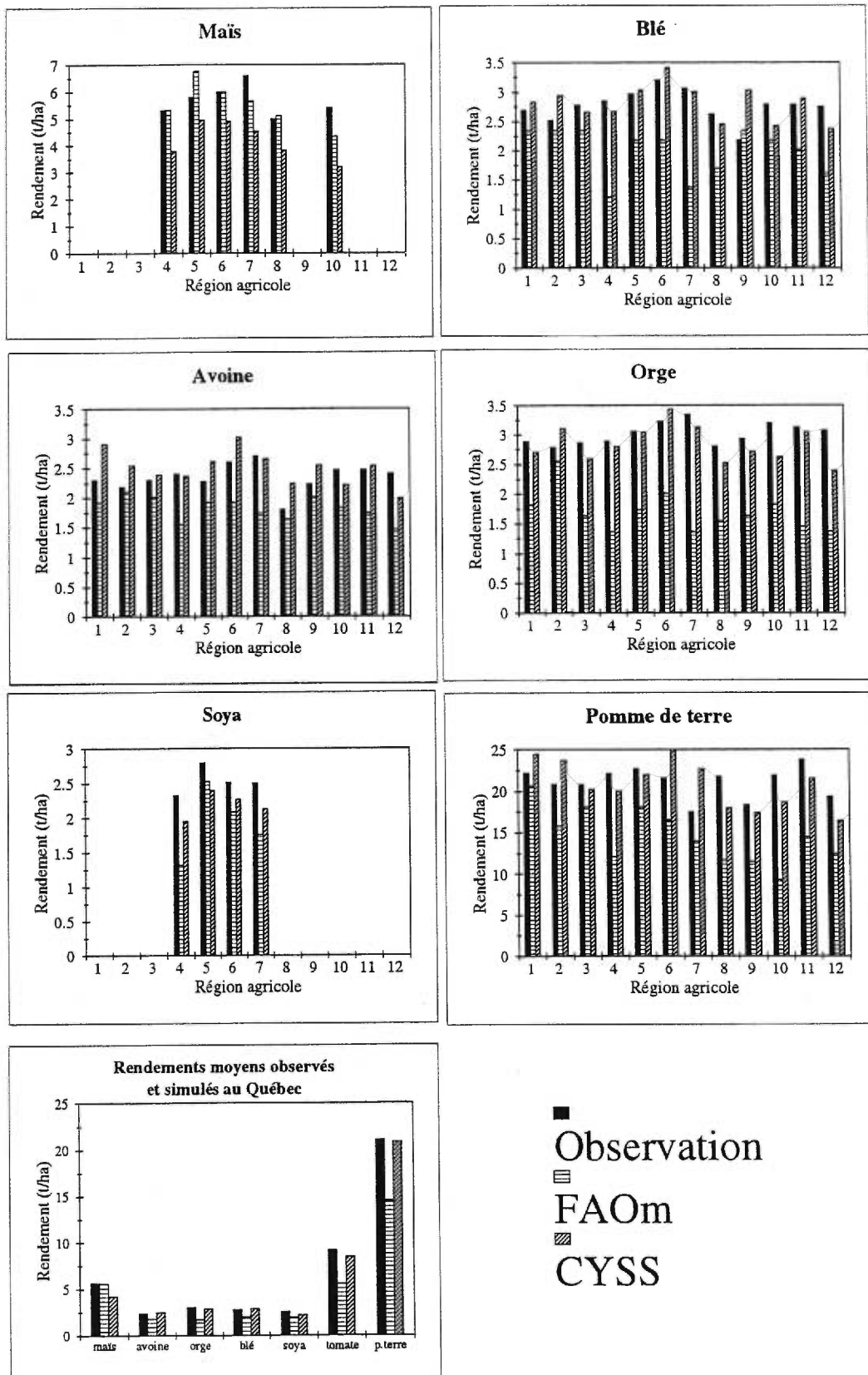


Figure 4.2: comparaison entre les rendements moyennes observés et simulés par CYSS et FAOM.
Source des rendements observés: Statistiques Agricoles (1992).

Tableau 4.1: Facteurs agroclimatiques relatifs aux douze régions agricoles du Québec.

Région agricole	<i>DSC</i>	<i>FSC</i>	<i>LSC</i>	<i>UTM</i>	<i>DD₅</i>	<i>P</i>	<i>TMSC</i>
Bas-St-Laurent-Gaspésie	150	260	111	1839	1092	357	15
Québec	138	267	130	2321	1362	478	16
Beauce-Appalaches	140	267	127	2246	1312	482	15.3
Bois-Francs	135	272	138	2609	1539	479	16
Estrie	136	273	138	2607	1541	473	16
Richelieu-St-Hyacinthe	128	278	151	2923	1733	514	16
Montréal-Sud	128	279	152	3017	1797	458	17
Outaouais	134	273	140	2706	1605	410	16
Abitibi-Témiscamingue	145	265	120	2082	1224	374	15
Montréal-Nord	124	284	161	2905	1720	453	17
Mauricie	136	270	135	2541	1498	470	16
Saguenay-Lac-St-Jean	145	263	119	2176	1283	383	16

DSC (d), début de la saison de croissance; *FSC* (d), fin de la saison de croissance; *LSC*(d), longueur de la saison de croissance; *P* (mm), précipitations; *DD₅*, degrés jours de croissance où la température de base est 5°C; *UTM*, unités thermiques maïs; *TMSC* (°C), température moyenne pendant la saison de croissance

Tableau 4.2: Stations météorologiques d'où les données climatiques actuelles ont été prises.

(Source : Environnement Canada, 1993).

Station météorologique	Latitude (°N)	Longitude (°O)	Élévation (m)	Années d'observation
Amos	48,34	78,08	310	1961-1990
Armagh station	46,43	70,37	312	1966-1990
Bagotville A	48,20	71,10	159	1961-1990
Barrage des quinze	47,33	79,14	265	1961-1990
Bonsecours	45,24	72,16	297	1967-1990
Bromptonville	45,30	71,58	130	1961-1990
Causapscal	48,22	67,14	168	1961-1990
Chelsea	45,31	75,47	112	1961-1990
Cheneville	45,54	75,05	223	1964-1990
Disraeli	45,55	71,19	350	1961-1990
Farnham	45,18	72,54	68	1961-1990
Ferme Neuve	46,42	75,27	213	1961-1990
Granby	45,23	72,42	168	1961-1990
Grand Lac Victoria	47,50	77,22	329	1961-1990
Lac Megantic 2	45,36	70,53	465	1963-1990
Lachute	45,39	74,20	91	1963-1990
Lennoxville CDA	45,22	71,50	159	1961-1990
Les cédres	45,18	74,03	47	1961-1990
Montréal/Dorval	45,28	73,45	31	1961-1990
Notre Dame du Laus	46,07	75,38	213	1961-1990
Ouimet	48,19	68,12	305	1963-1990
Roberval A	48,31	72,16	179	1961-1990
Sept-Iles A	50,13	66,16	55	1961-1990
Shawanigan	46,34	72,45	122	1961-1990
Shipshaw	48,27	71,13	23	1961-1990
St-Anicet	45,08	74,21	53	1961-1990
St-Charles Garnier	48,20	68,03	323	1963-1990
St-Donat	46,19	74,12	389	1964-1990
St-Flavien	46,29	71,34	137	1963-1990
St-Hyacinthe 2	45,37	72,58	31	1963-1990
Ste-Francoise Romaine	46,29	71,58	91	1963-1990
Ste-Germaine	46,25	70,28	511	1963-1990
Val d'espoir	46,22	72,36	91	1963-1990

Tableau 4.3: Valeurs des différents paramètres agronomiques utilisés pour la simulation des rendements.

	PHU	HI^*	K_y^\ddagger	H_{max}^*	ah_1^*	ah_2^*	$rs_{max}^\#$	$\tau^\#$	$k^\&$	LAI_m
maïs (C ₄)	2700UTM	0,5	1,25	2,5	15,05	50,95	0,001645	0,7	4	
avoine (C ₃)	1000DD ₅	0,42	1,2	1,2	15,01	50,95	0,0023	32	0,7	5
orge (C ₃)	BTM1	0,42	1,05	1,2	15,01	50,95	0,0023	32	0,7	5
blé (C ₃)	BTM2	0,42	1,15	1,2	15,01	50,95	0,0023	32	0,7	5
soya (C ₃)	2500UTM	0,4	1,2	1,5	15,01	50,95	0,0016	43	0,86	5
fève (C ₃)	1600DD ₅	0,4	1,15	1,5	15,01	50,95	0,0015	50	0,86	5
pois-verts (C ₃)	1600DD _{5,5}	0,4	1,15	1,5	15,01	50,95	0,0015	43	0,86	5
tomate (C ₃)	1000DD ₆	0,25	1,05	1,5	15,01	50,95	0,0023	43	0,65*	4
tournesol (C ₃)	1300DD _{7,2}	0,2	0,95	2,5	15,01	50,95	0,0016	45	0,97	4
pomme de terre (C ₃)	1250DD ₂	1,12	1,10	0,8	15,01	50,95	0,0023	32	0,65*	4

PHU , accumulation potentielle des unités de chaleur; DD_t , degrés jours de croissance au dessus de la température t ; UTM , unités thermiques maïs; HI , indice de récolte; K_y , coefficient du rendement; H_{max} , hauteur maximale de la culture (m); rs_{max} , résistance stomatique maximale à la diffusion de l'H₂O (d.m⁻¹); τ , conductance stomatique maximale au CO₂ (m.s⁻¹); k , coefficient d'extinction de la lumière; LAI_m , indice foliaire maximum; ah_1 et ah_2 , paramètres spécifiques à la culture; BTM1, biometeorological time-scale (Williams, 1974); BTM2, biometeorological time-scale (Robertson, 1968).

le type de culture, C₃ ou C₄, est indiqué entre parenthèses.

* Williams et al. (1990)

‡ Doorenbos et Kassam (1979)

& Monteith et Unsworth (1990)

Körner et al. (1979)

Tableau 4.4: Indices des sols (SI) utilisés. (d'après Dumanski et Stewart,1983).

Type de sol*	maïs	avoine	orge	blé	soya	fèves	pois verts	tournesol	tomate	pomme de terre
C1016	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
C2002	0	1	1	1	1	0,75	0,75	0	0,75	0,75
C2107	1	0,75	0,75	0,75	0	0	0	0	0	0
D3001	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
D3007	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
D3008	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
D3021	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
D3039	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D3040	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1
D3055	0	0,75	0,75	0,75	0	0	0,75	0	0,75	0,75
D3058	0,75	1	1	1	1	1	1	0	1	1
D3060	0,75	1	1	1	1	1	1	0	1	1
D3066	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0	0,75	0	0,75	0,75
D3084	0	0,75	0,75	0,75	0	0	0,75	0	0,75	0,75
D3120	0	0,75	0,75	0,75	0,75	1	1	0	1	1
D3133	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	1	0	1	1
D3135	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0	0,75	0,75
D3136	0	0,75	0,75	0,75	0	0	0	0	0	0
D3137	0	0,75	0,75	0,75	0	0	0	0	0	0
D3140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D3141	0,75	0,75	0,75	0,75	1	0,75	1	0	1	1
D3150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E1010	1	1	1	1	1	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
E1011	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
E1012	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
E3067	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
E3068	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E3069	0	0,75	0,75	0,75	0	0,75	0,75	0	0,75	0,75
E3072	0	0,75	0,75	0,75	0	0,75	0,75	0	0,75	0,75
E3073	0	1	1	1	1	1	1	0	1	1
G1001	0	1	1	1	1	1	1	0,75	1	1
G1002	1	1	1	1	1	1	1	0,75	1	1
G1004	1	1	1	1	1	1	1	0,75	1	1
G2027	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
G2028	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
G2029	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75

* Le type de sol est donné selon la classification canadienne.

Tableau 4.5: Valeurs de la faisabilité de la récolte (WP) utilisées. (d'après Dyer et al.,1978).

Type de sol*	maïs	avoine	orge	blé	soya	fèves	pois verts	tournesol	tomate	pomme de terre
C1016	0,6	0,95	0,95	0,95	0,6	0,95	0,6	0,94	0,95	0,95
C2002	0	0,8	0,8	0,8	0,4	0,8	0,4	0	0,8	0,8
C2107	0	0,75	0,75	0,75	0	0	0	0	0	0
D3001	0,78	0,95	0,95	0,95	0,78	0,95	0,78	0	0,95	0,95
D3007	0,75	0,95	0,95	0,95	0,75	0,95	0,75	0	0,95	0,95
D3008	0,78	0,95	0,95	0,95	0,78	0,95	0,78	0	0,95	0,95
D3021	0,65	0,9	0,9	0,9	0,65	0,9	0,65	0	0,9	0,9
D3039	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D3040	0	0,8	0,8	0,8	0	0,8	0	0	0	0
D3055	0	0,95	0,95	0,95	0	0	0	0	0,95	0,95
D3058	0,72	0,95	0,95	0,95	0,72	0,95	0,72	0	0,95	0,95
D3060	0,5	0,9	0,9	0,9	0,5	0,9	0,5	0,75	0,9	0,9
D3066	0,5	0,93	0,93	0,93	0,5	0	0,5	0	0,93	0,93
D3084	0	0,95	0,95	0,95	0	0	0	0	0,95	0,95
D3120	0	0,8	0,8	0,8	0,2	0,8	0,2	0	0,8	0,8
D3133	0,3	0,75	0,75	0,75	0,3	0,75	0,3	0	0,75	0,75
D3135	0	0,85	0,85	0,85	0,7	0,85	0,7	0	0,85	0,85
D3136	0	0,95	0,95	0,95	0	0	0	0	0	0
D3137	0	0,95	0,95	0,95	0	0	0	0	0	0
D3140	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
D3141	0,55	0,8	0,8	0,8	0,55	0,8	0,55	0	0,8	0,8
D3150	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E1010	0,78	0,95	0,95	0,95	0,78	0,95	0,78	0,91	0,95	0,95
E1011	0,75	0,95	0,95	0,95	0,75	0,95	0,75	0,91	0,95	0,95
E1012	0,75	0,95	0,95	0,95	0,75	0,95	0,75	0,9	0,95	0,95
E3067	0,7	0,95	0,95	0,95	0,7	0,95	0,7	0	0,95	0,95
E3068	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E3069	0	0,92	0,92	0,92	0	0,92	0	0	0,92	0,92
E3072	0	0,75	0,75	0,75	0	0,75	0	0	0,75	0,75
E3073	0	0,75	0,75	0,75	0	0,75	0	0	0,75	0,75
G1001	0	0,95	0,95	0,95	0,75	0,95	0,75	0,98	0,95	0,95
G1002	0,75	0,95	0,95	0,95	0,75	0,95	0,75	0,9	0,95	0,95
G1004	0,75	0,95	0,95	0,95	0,75	0,95	0,75	0,95	0,95	0,95
G2027	0,4	0,82	0,82	0,82	0,4	0,82	0,4	0,5	0,82	0,82
G2028	0,5	0,88	0,88	0,88	0,5	0,88	0,5	0,75	0,88	0,88
G2029	0,6	0,91	0,91	0,91	0,6	0,91	0,6	0,85	0,91	0,91

* Le type de sol est donné selon la classification canadienne.

alors normal d'observer une différence relativement élevée (26%) entre les rendements observés et les rendements simulés de cette culture. Par ailleurs, le modèle CYSS reproduit mieux les rendements observés des cultures C_3 que celui de la FAOm.

Toutefois, pour avoir une meilleure idée sur, tant la validité de FAOm que celle de CYSS, une analyse de régression a été effectuée (Figure 4.3). Concernant les céréales C_3 (blé, orge et avoine; Figure 3.4a) cette analyse montre clairement que la simulation CYSS est bien meilleure que celle de FAOm. En effet, d'une part, le coefficient de corrélation entre les rendements observés et les rendements simulés par CYSS ($r_2=0,54$; Figure 4.3a) est nettement plus élevé que celui obtenu entre l'observation et la simulation FAOm ($r_1=0,03$). D'autre part, le nuage de points correspondant aux rendements simulés par CYSS est plus distribué autour de la droite de pente 1 que celui correspondant aux rendements simulés par FAOm. Par ailleurs, les résultats du test de signification de Pearson (Scherrer, 1984) au seuil de 95% ont montré que r_2 est significativement différent de zéro tandis que r_1 est significativement non différent de zéro. En effectuant la même analyse pour toutes les cultures C_3 (blé, orge, avoine, soya, pomme de terre et tomate; Figure 4.3b) et pour toutes les cultures, incluant le maïs (culture C_4 ; Figure 4.3c), on obtient une corrélation plus élevée entre l'observation et la simulation CYSS ($r_2=0,98$) qu'entre l'observation et la simulation FAOm ($r_1=0,96$). Les résultats du test de Pearson ont montré que r_1 et r_2 sont significativement différents de zéro mais une plus grande correspondance entre l'observation et la simulation CYSS qu'entre l'observation et la simulation FAOm.

4.2 Effet du changement du climat sur les rendements

Dans cette partie de l'étude, la sensibilité des rendements à plusieurs scénarios du changement du climat est évaluée. Le premier de ces scénarios repose sur la projection de la 2^{ème} version du modèle de circulation général (MCG) du Centre Canadien du Climat (CCC) pour un doublement de la concentration atmosphérique du CO_2 . La résolution spatiale de ce MCG est de $3,75^\circ$ latitude / $3,75^\circ$ longitude. Cependant, les données utilisées ont une résolution de 1°

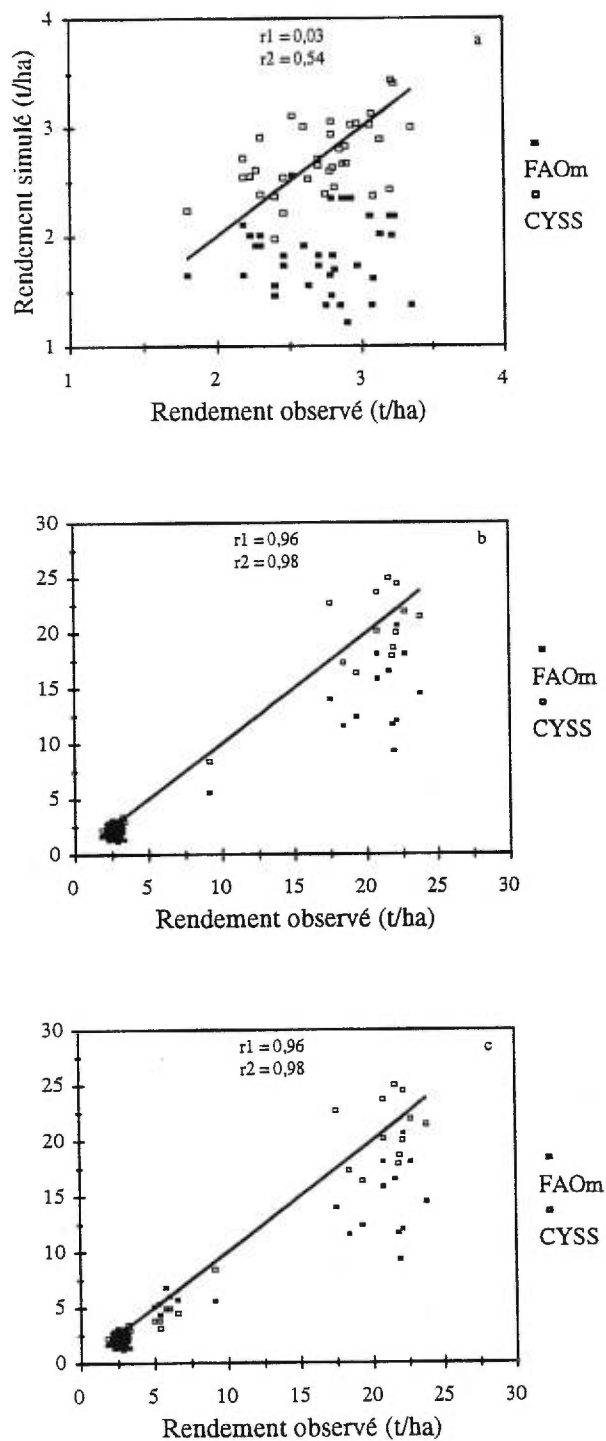


Figure 4.3: Régression entre les rendements observés et simulés par FAOm et CYSS.
 a, céréales C₃ (blé, orge et avoine); b, toutes les cultures C₃ (blé, orge, avoine, soya, pomme de terre et tomate); c, maïs + toutes les cultures en a et b.

1°latitude/1° longitude, obtenues à partir de l'interpolation des données 3,75°latitude / 3,75°longitude (Louie, 1993). L'algorithme de cette interpolation utilise les quatre points les plus proches du CCC-MCG et les pondèrent par l'inverse du carré de la distance. La plus haute résolution spatiale obtenue offre alors une meilleure correspondance entre les points de grilles et les régions agricoles à l'étude.

Selon la projection du CCC-MCG, d'une part, la température mensuelle moyenne augmenterait dans toutes les régions agricoles du Québec. Cette augmentation serait comprise entre 3 et 5°C durant la période Avril-Octobre (période de végétation au Québec) (Figure 4.4). D'autre part, les précipitations mensuelles pourraient augmenter ou diminuer selon le mois de l'année et la région agricole en question. Toutefois, durant la saison de végétation, elles diminueraient de moins de 10% environ dans la région agricole du Bas-St-Laurent, et augmenteraient de moins de 10% dans les autres régions (Figure 4.5).

Les autres scénarios sont obtenus en augmentant ou en diminuant les valeurs moyennes actuelles (1961-90) de la température et des précipitations. Ces ajustements se basent sur l'étude de Mortsch et Quinn (1996) qui résume les projections du climat futur correspondant à un doublement de la concentration atmosphérique du CO₂, pour la région des Grands Lacs et du Bassin du St-Laurent, de plusieurs MCG dont celui du CCC, du Goddard Institute for Space Studies (GISS), du Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL) et de l'Oregon State University (OSU). Les scénarios de température sont la température actuelle, la température actuelle +2°C et +4°C; tandis que les scénarios de précipitations sont les précipitations actuelles, les précipitations actuelles -30%, -15%, +15% et +30%.

Pour toutes les cultures et dans toutes les régions agricoles, une augmentation des précipitations provoquerait une augmentation des rendements et vice versa, tandis qu'une augmentation de la température (2 ou 4°C) mènerait à une diminution des rendements dans la majorité des cas (Figure 4.6). On constate aussi que, le taux de diminution des rendements induit par la diminution des précipitations de 15 ou 30% est généralement deux fois plus élevé que le

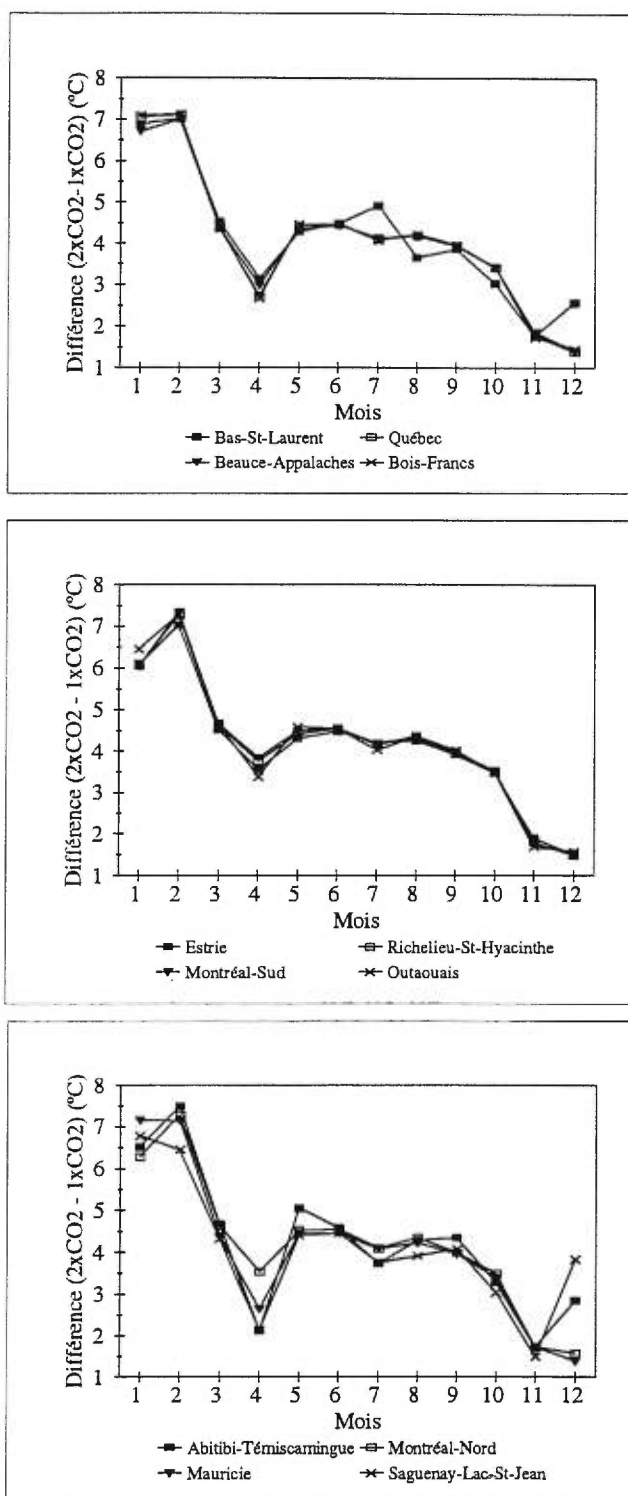


Figure 4.4: Changements projetés par le CCC-MCG des valeurs mensuelles de la température moyenne, pour un doublement de CO₂ atmosphérique, aux douze régions agricoles.

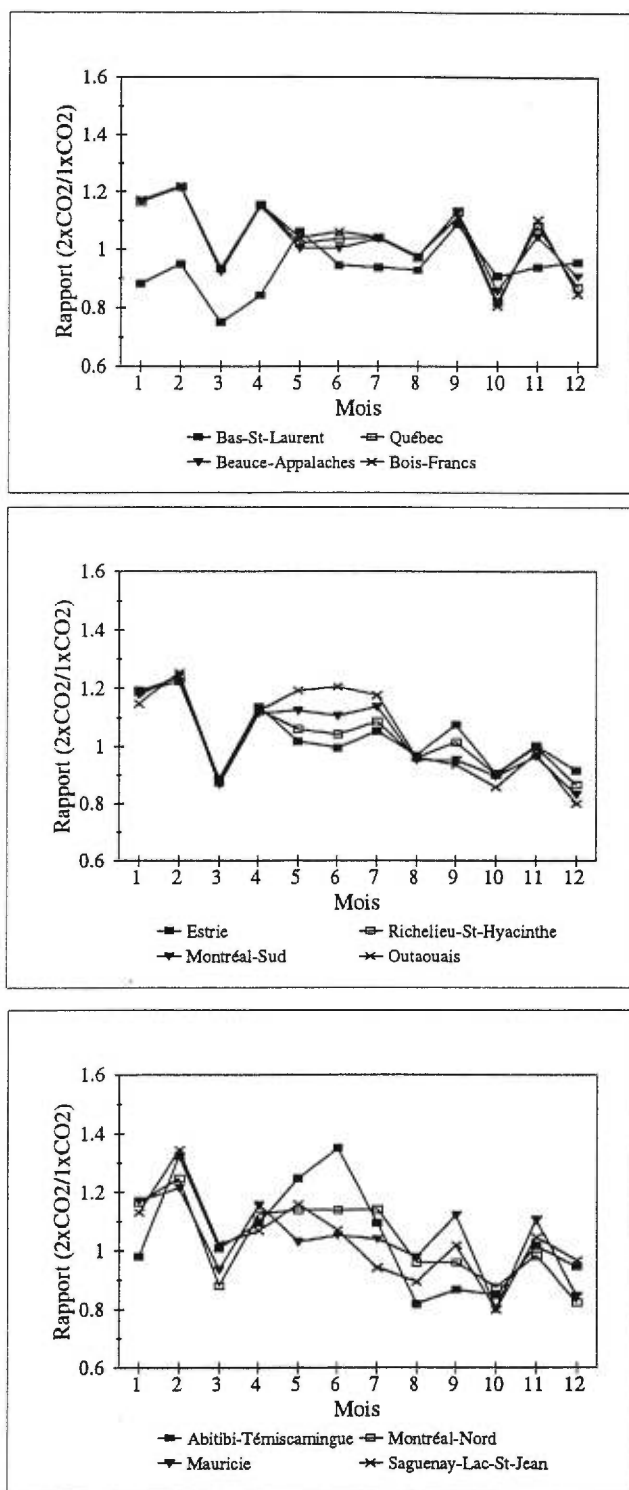


Figure 4.5: Changements projetés par le CCC-MCG des valeurs mensuelles des précipitations, pour doublement de CO₂ atmosphérique, aux douze régions agricoles.

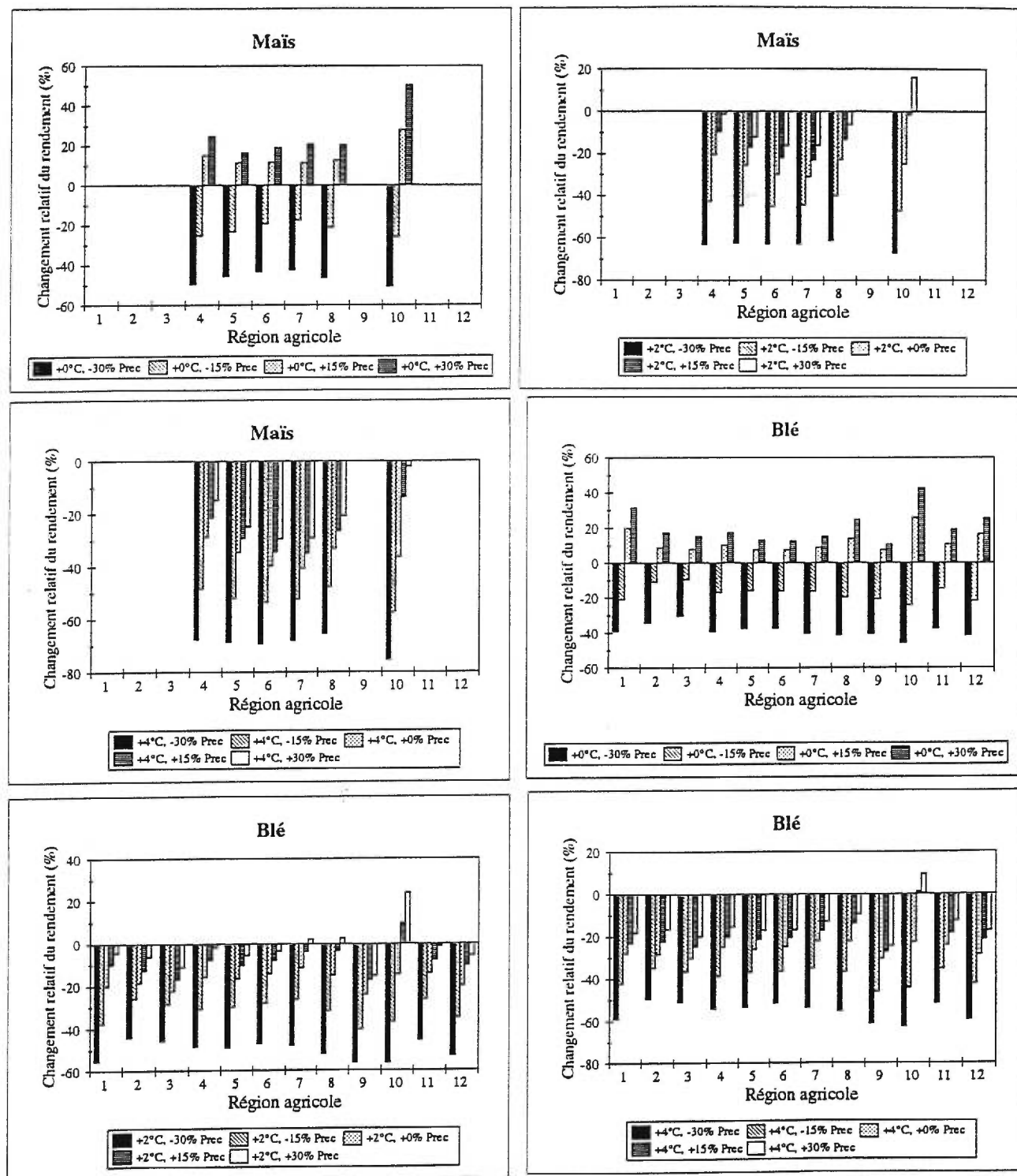


Figure 4.6: Sensibilité des rendements aux changements des valeurs moyennes de la température et des précipitations.

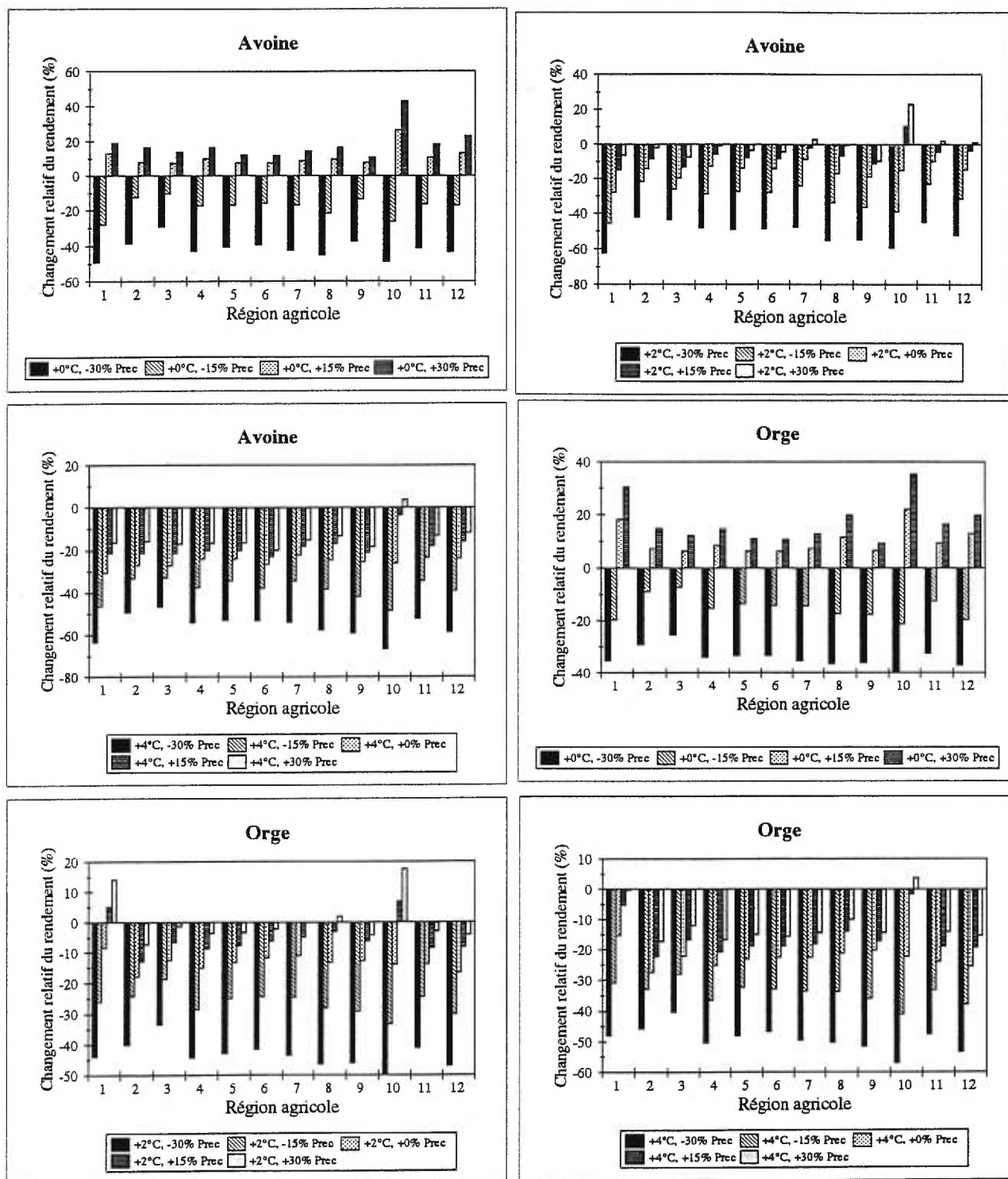


Figure 4.6: Suite.

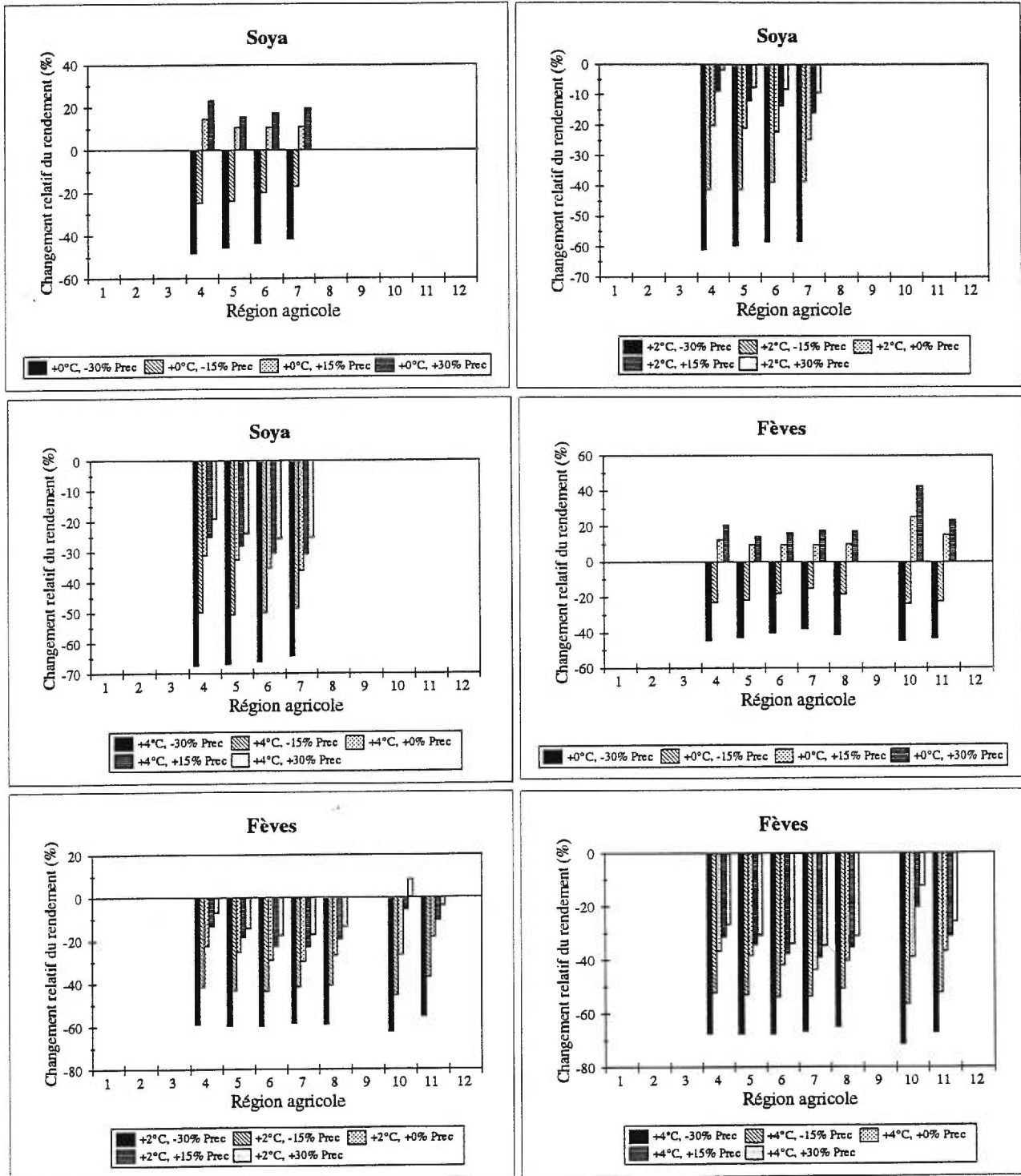


Figure 4.6: Suite.

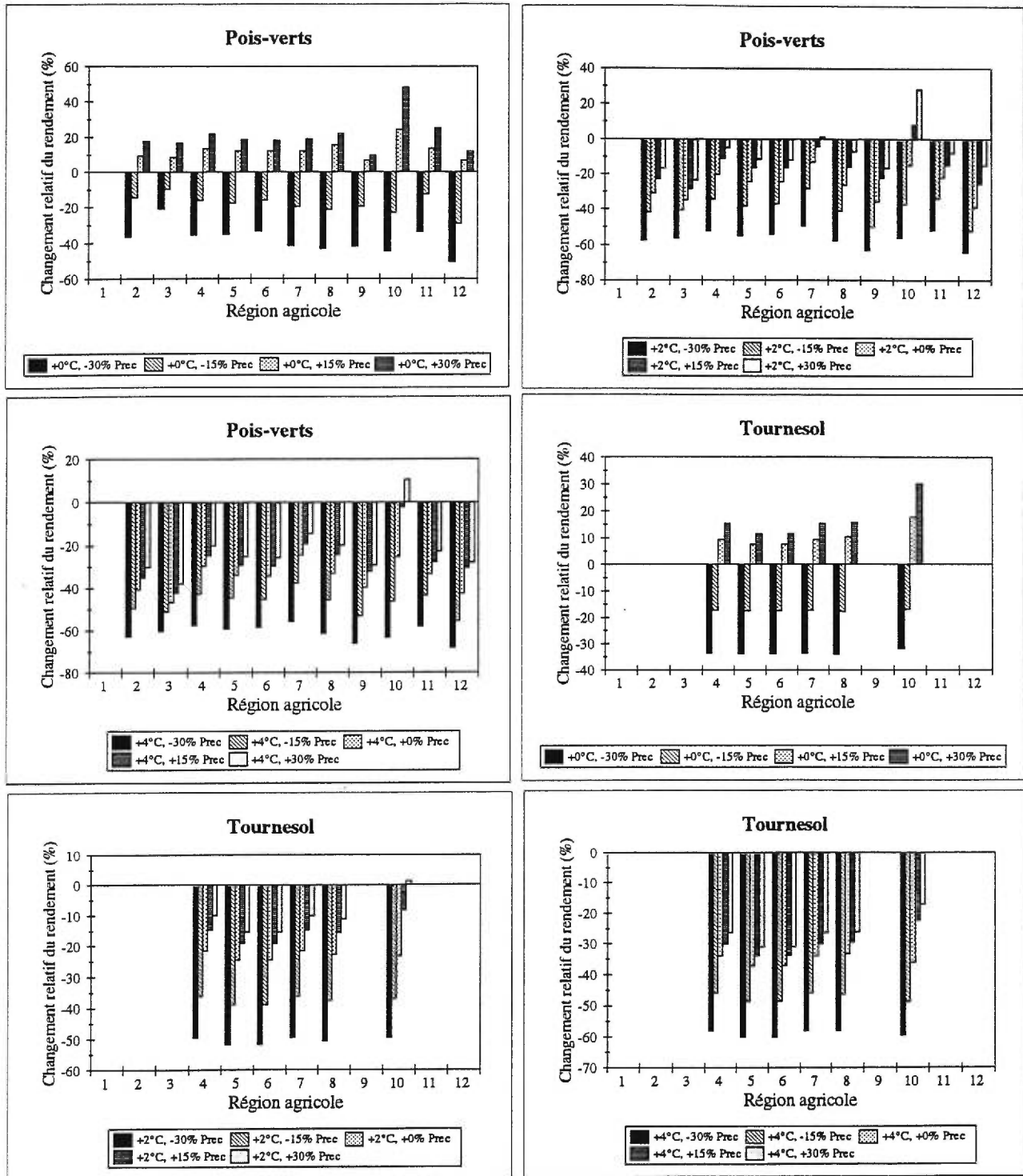


Figure 4.6: Suite.

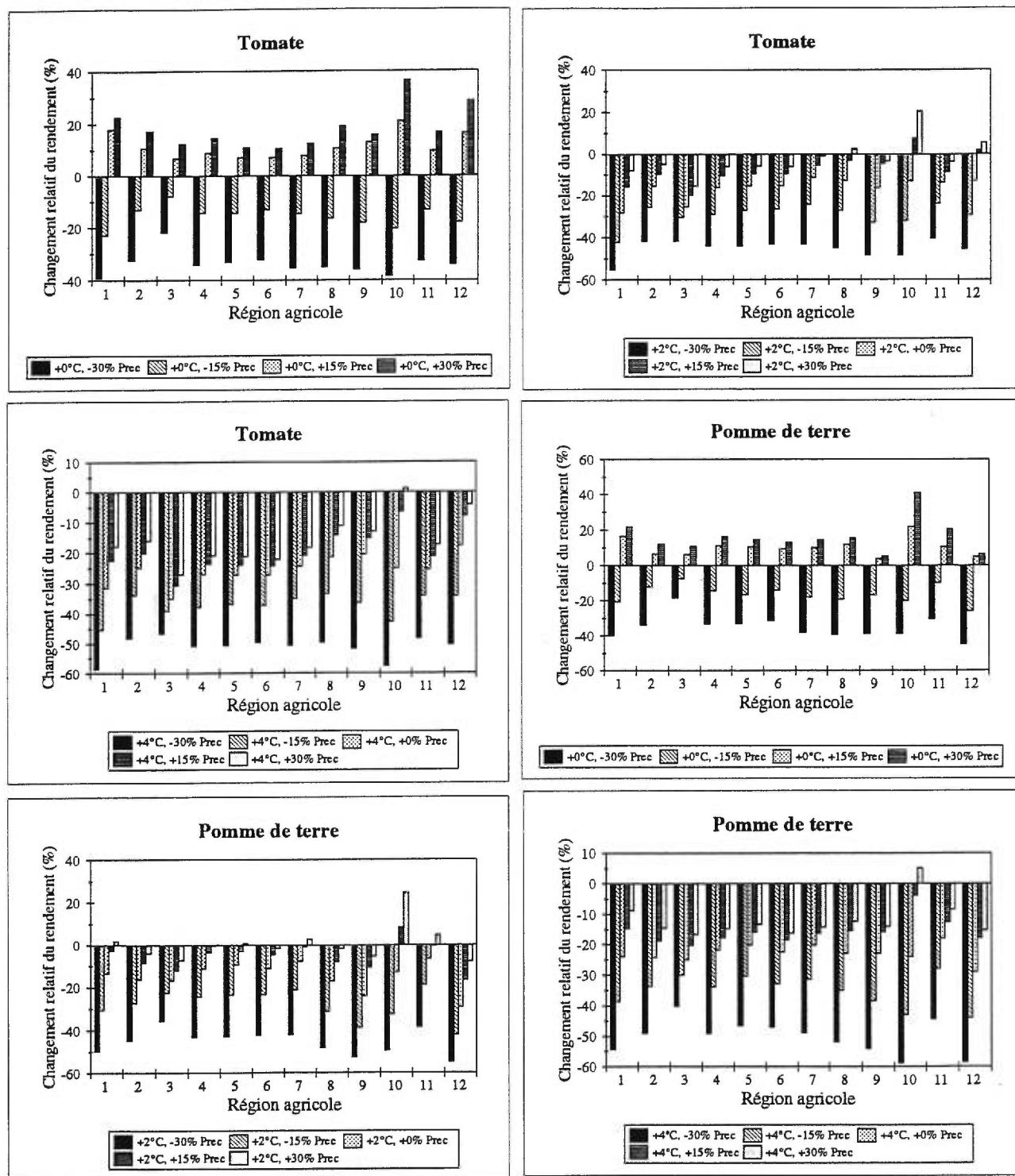


Figure 4.6: Suite.

taux d'augmentation des rendements induit par l'augmentation des précipitations de 15 ou 30% respectivement.

La figure 4.6 nous indique aussi que, pour la majorité des cultures étudiées, il faudrait une augmentation des précipitations d'au moins 30% pour éliminer l'effet négatif de l'augmentation de la température de 2°C. Finalement, de manière générale, pour éliminer l'effet négatif de l'augmentation de la température de 4°C sur les rendements, il faudrait une augmentation des précipitations largement plus importante que 30%.

La figure 4.7, illustrant le taux de changement des rendements qu'induirait le changement climatique projeté par le scénario du CCC-MCG, indique qu'on pourrait avoir une diminution des rendements de toutes les cultures. Toutefois, on remarque que pour les cultures C₃, la diminution des rendements serait moins importante aux régions agricoles situées au sud du Québec (régions 4, 5, 6, 7 et 8) qu'aux autres régions. Ceci s'explique, d'une part, par le fait que le taux d'augmentation de précipitations projeté par le CCC-MCG dans les régions du sud est supérieur à celui projeté pour les régions 1, 2 et 3 (Figure 4.5), et que, d'autre part, les cultures subissent une accélération moins importante du taux de maturation dans les régions du sud que dans les autres régions. Une explication plus détaillée des effets, du stress hydrique et de l'accélération de la maturation, sur les rendements est donnée dans la section suivante.

4.3 Effets de l'accélération de la maturation et du stress hydrique sur les rendements

Le temps de maturation et le stress hydrique font partie des principaux facteurs qui agissent sur le rendement des cultures (Maytín et al, 1995; El Maayar et Singh, 1996; El Maayar, 1998; Singh et al., 1998). La figure 4.8 illustre l'effet de chacun de ces deux effets sur les rendements. *ISH* exprime le rapport des valeurs du facteur du stress hydrique (*FSH*; équation 3.31) obtenues sous le climat 2xCO₂ projeté par le scénario du CCC-MCG et sous le climat actuel

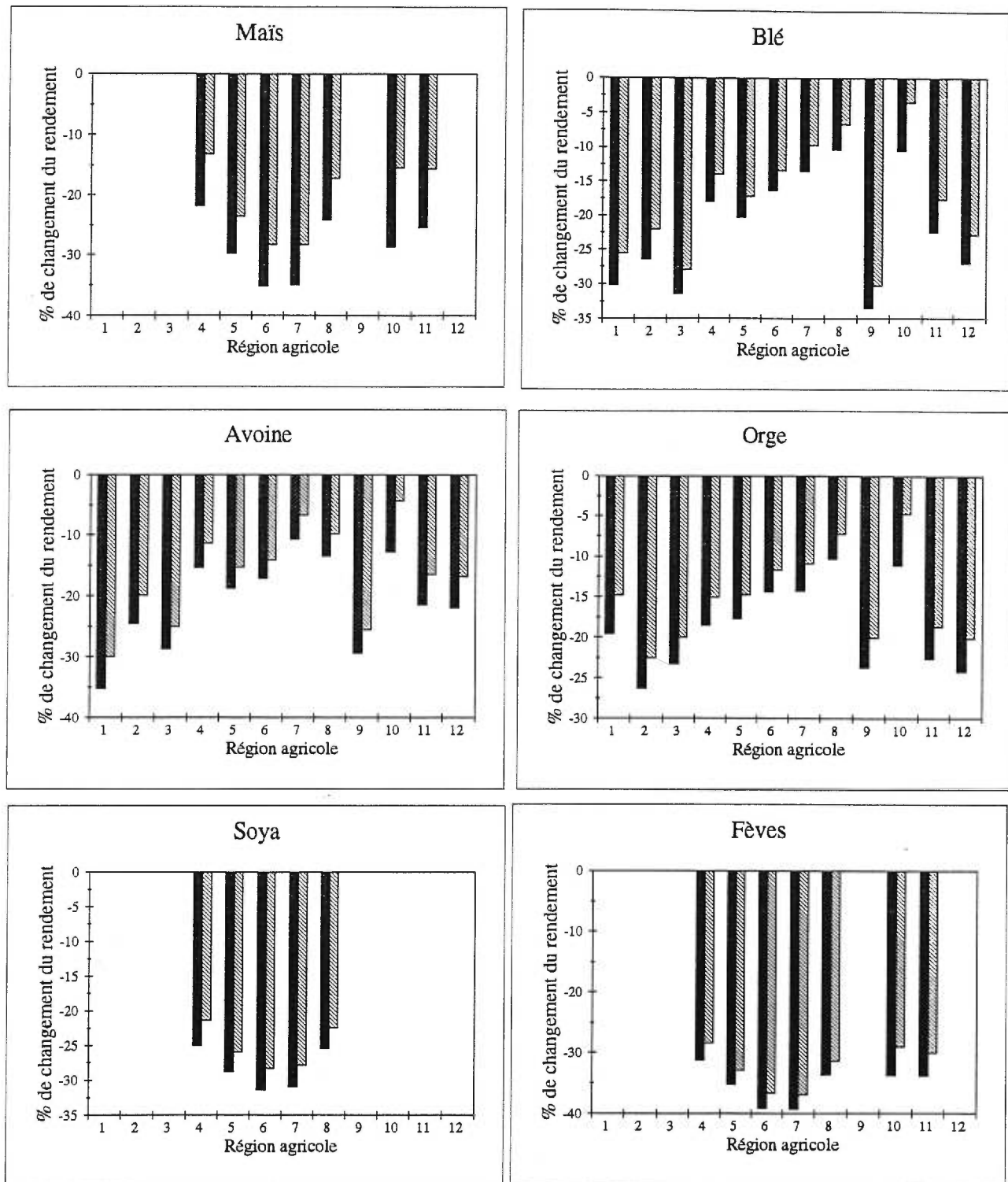


Figure 4.7: Sensibilité des rendements au:

- i) changement climatique projeté par le CCC-GCM (barres noires).
- ii) à la combinaison de l'effet du changement climatiques projeté par le CCC-GCM et de l'effet direct dû à l'augmentation de la concentration ambiante du CO₂ de 360 ppm à 550 ppm (barres rayées).

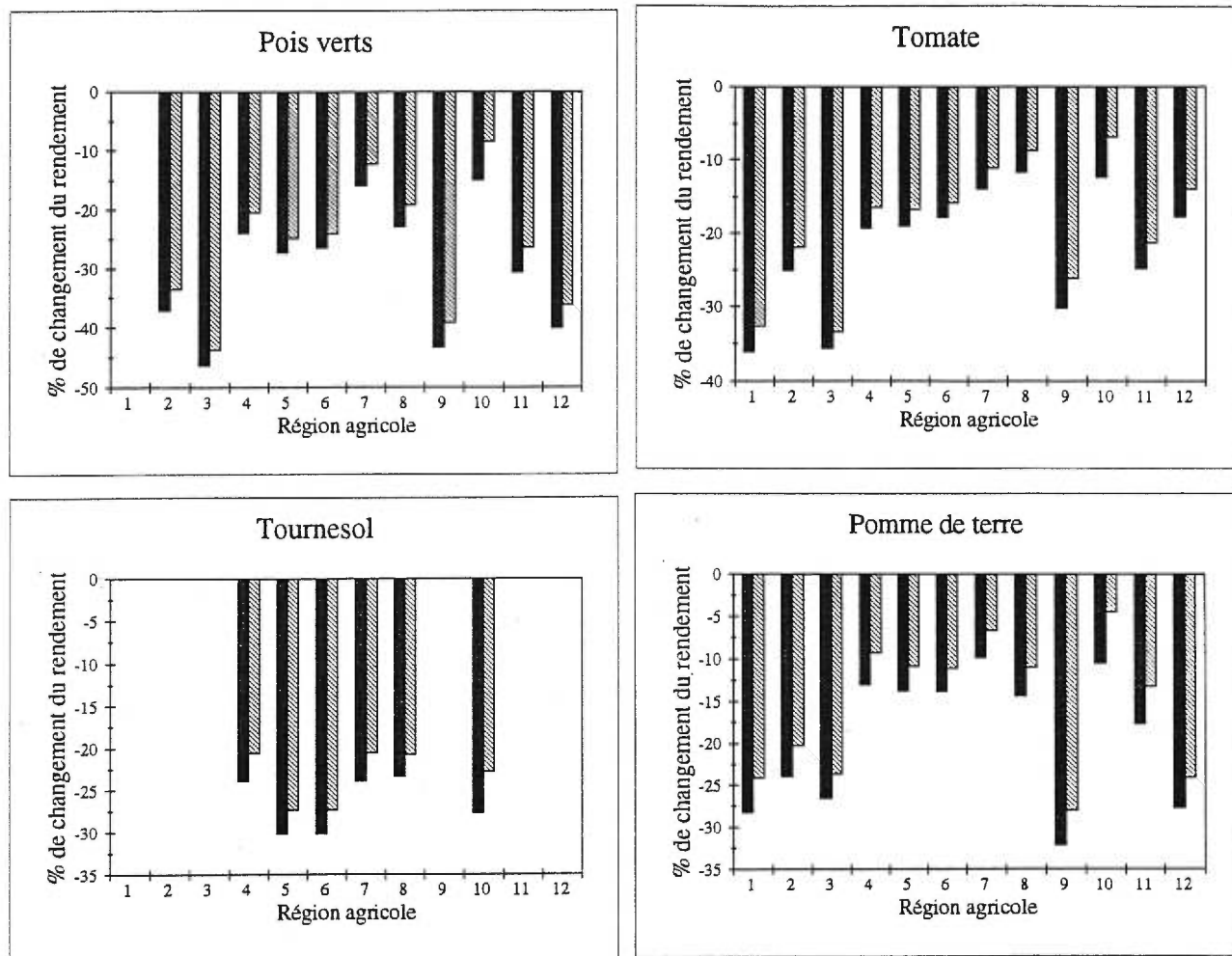


Figure 4.7: Suite.

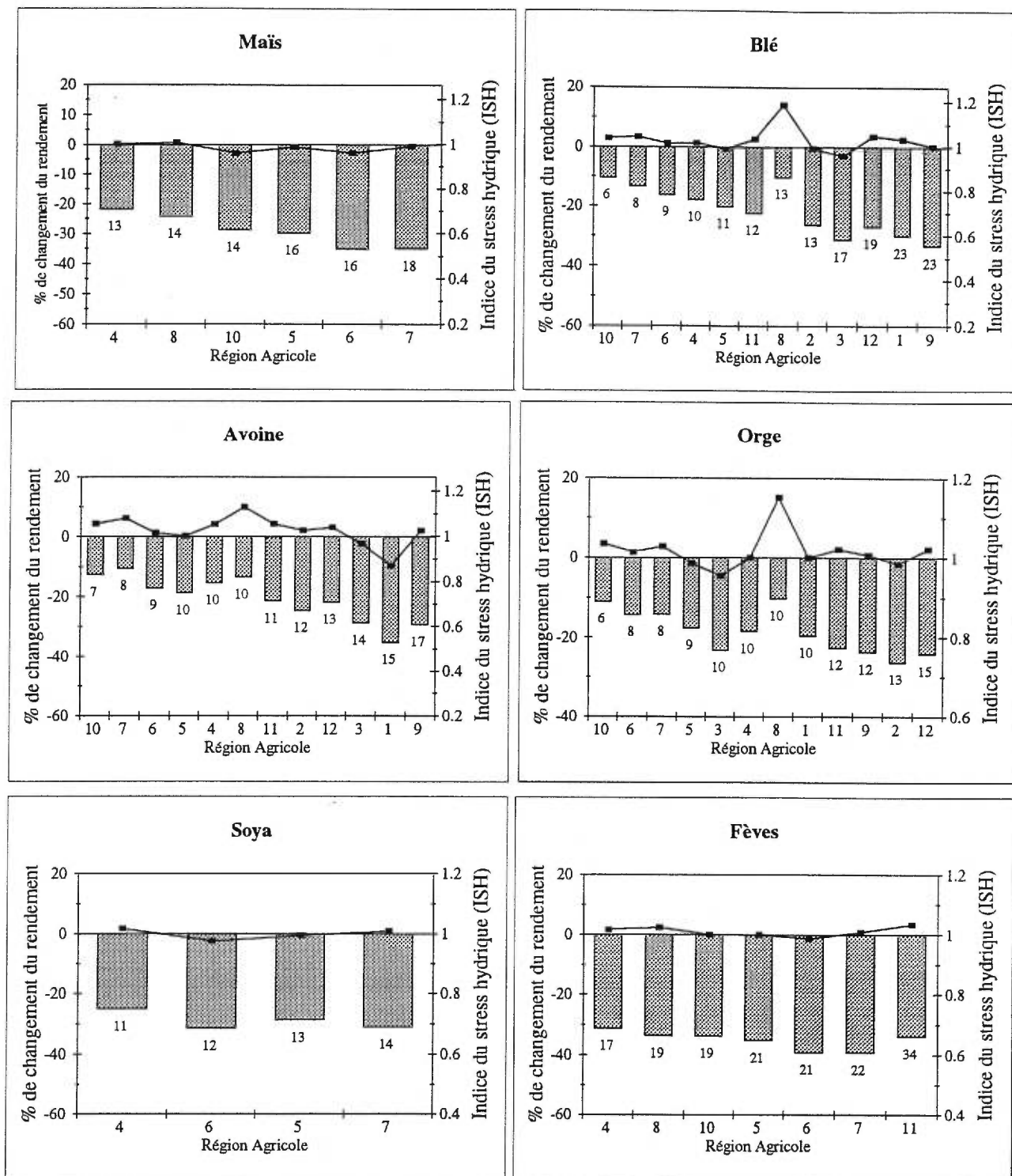


Figure 4.8 : Illustration des effets de l'accélération de la période de maturation et du stress hydrique sur les rendements.

L'indice du stress hydrique (ISH) représente le rapport $FSH(2xCO_2)/FSH(1961-90)$.

Les chiffres en dessous des barres indiquent le nombre de jours d'accélération de la maturation.

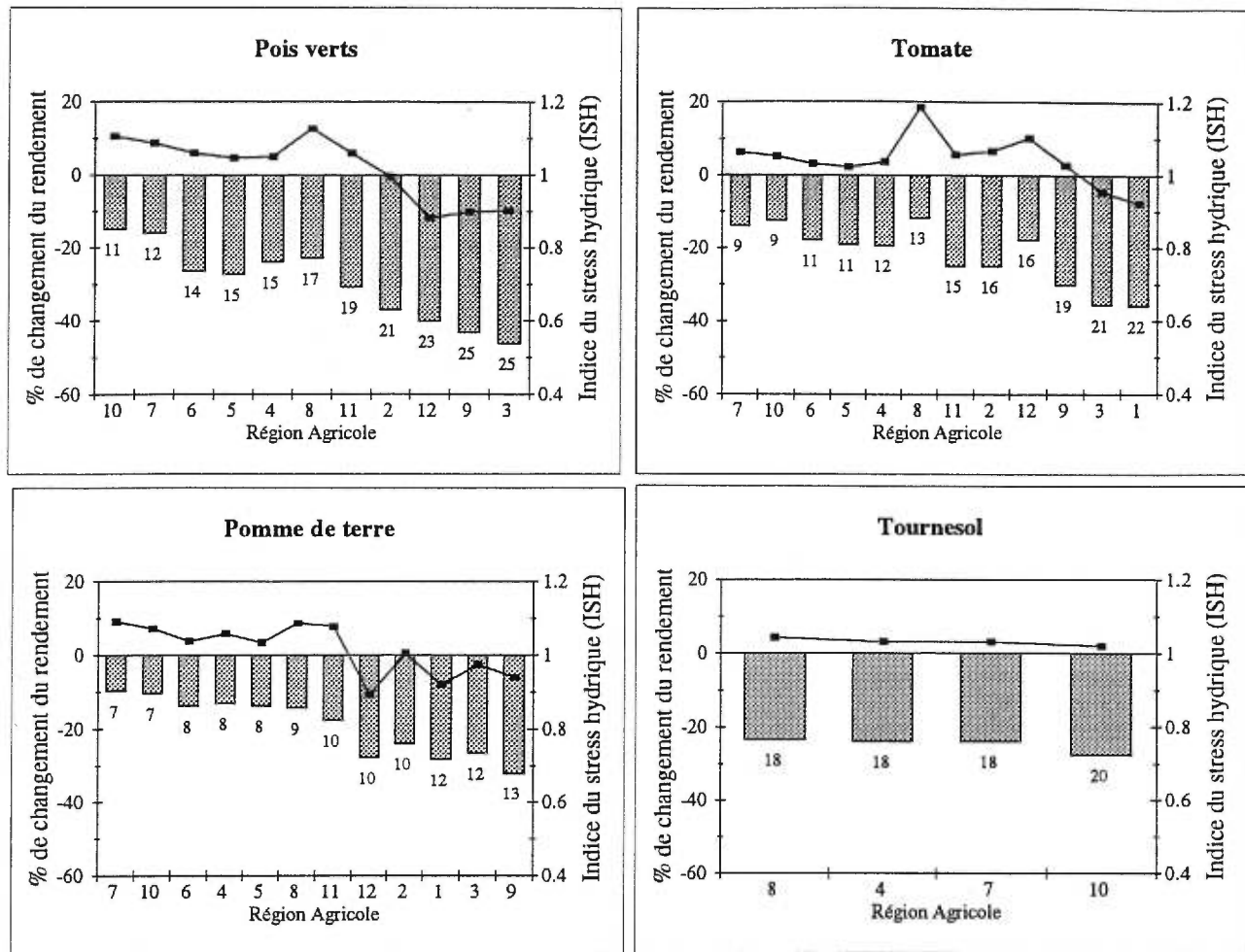


Figure 4.7 : Suite.

(1961-90). D'où, d'après la forme de l'équation 3.31, les valeurs supérieures à 1 de *ISH* impliquent que le stress hydrique est moins important sous le climat 2xCO₂ que sous le climat actuel. Ainsi, d'après la figure 4.8, on constate que les conditions de stress hydrique sont généralement plus favorables sous le climat 2xCO₂ que sous le climat actuel. Il s'ensuit que la baisse des rendements est due principalement à l'accélération du temps de maturation. En effet, d'une part, concernant le maïs (culture C₄), le soya, les fèves et le tournesol où les rendements diminueraient en réponse au changement climatique projeté par le CCC-MCG, les conditions du stress hydrique sous les climats, actuel et 2xCO₂, seraient pratiquement similaires (Figure 4.8). La diminution, relativement importante (> 20%), des rendements de ces cultures est donc clairement due à l'accélération du temps de maturation. D'autre part, en prenant l'exemple du blé qui peut être généralisé aux autres cultures, on observe une diminution du rendement de cette culture dans la région de l'Outaouais (région 8) malgré une diminution du stress hydrique (*ISH* > 1). Ce qui nous démontre encore une fois que cette diminution du rendement du blé dans cette région (10% environ) est due uniquement à l'accélération du temps de maturation (13 jours).

Par ailleurs, en éliminant l'effet du stress hydrique (i.e. en imposant la valeur 1 à *ISH*), on constate qu'il existe une très forte corrélation ($r=0,87$) entre la baisse des rendements et l'accélération du temps de maturation (Figure 4.9). Le test statistique de Pearson montre que cette corrélation est significativement différente de zéro, ce qui confirme la forte influence de la période de maturation sur les rendements.

4.4 Effets combinés du changement du climat et de l'augmentation du CO₂ atmosphérique sur les rendements

Dans le but d'éviter la redondance, seulement l'effet du changement climatique projeté par le CCC, pour un doublement du CO₂ atmosphérique, a été combiné avec l'effet direct de la hausse du CO₂ sur les rendements. La concentration ambiante du CO₂ a été augmentée de 360 ppm (concentration actuelle) à 550 ppm. Cette dernière représente la concentration propre du CO₂

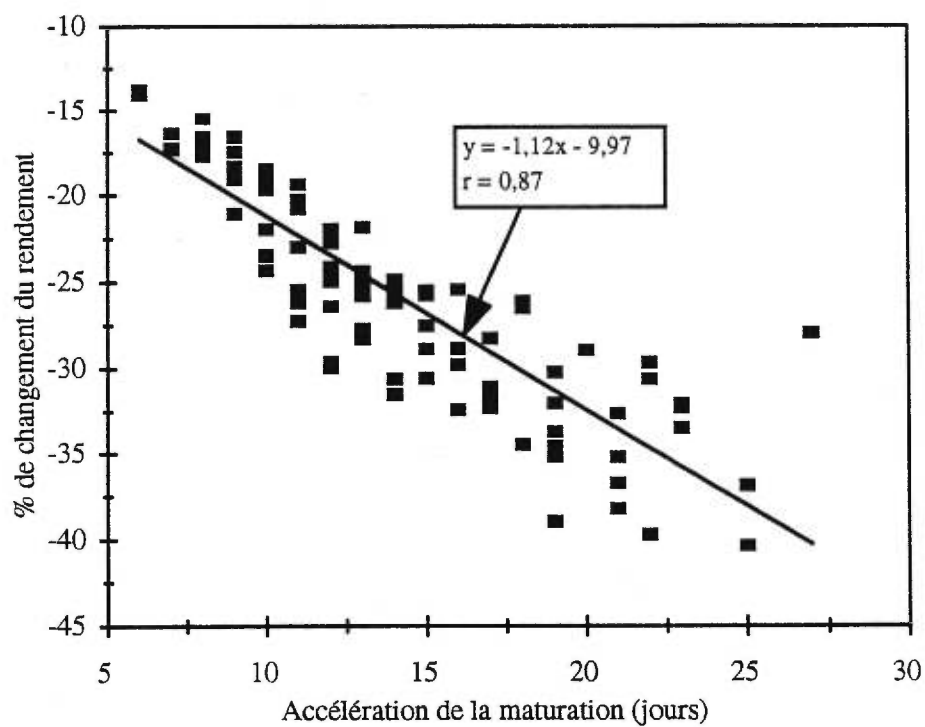


Figure 4.9: Changement relatif des rendements en fonction de l'accélération de la période de maturation (ISH=1). On tient compte ici des résultats obtenus sur toutes les cultures.

lorsque, de point de vue radiatif, on parle d'un doublement effectif du CO₂ atmosphérique (Hansen et al., 1988).

L'augmentation du CO₂ ambiant semble avoir un effet positif sur les rendements et tend à réduire l'effet négatif induit par le climat futur projeté par le CCC (Figure 4.7). Cependant, cet effet positif demeure néanmoins faible: l'atténuation de la diminution des rendements due à l'effet direct de la hausse du CO₂ ambiant ne dépasse pas 5%, en général. Un examen de l'équation 3.19 nous fournit une explication analytique à cette observation. En effet, d'une part, la capacité photosynthétique des cultures qui est fonction du produit de la conductance des stomates au CO₂ et de la concentration ambiante du CO₂ apparaît à la fois au numérateur et au dénominateur de cette équation. D'autre part, le terme de gauche du dénominateur (AI_a) a toujours une valeur très inférieure aux valeurs du terme de droite ($\phi_o C$). Ainsi, même lorsqu'on augmente d'une façon importante le taux du CO₂, la valeur de la capacité photosynthétique change peu. Par ailleurs, des observations faites au champ (Sinha, 1992; Mooney et Koch, 1994) s'accordent avec la présente simulation. En effet, l'analyse effectuée par Sinha (1992) à partir d'observations faites en Inde sur les pois-secs, le canola et la moutarde, prises entre 1895 et 1985 où le CO₂ atmosphérique a augmenté de 180 ppm à 350 ppm environ (une augmentation nette de 25%), a révélé que l'augmentation de la productivité des cultures est exclusivement liée à l'amélioration génétique des variétés et des techniques d'aménagement. D'autre part, les résultats de Mooney et Koch (1994) obtenues à partir d'expériences faites dans des microcosmes, des chambres à ciel ouvert (open top-chambers), et en utilisant la technologie FACE (Free Air CO₂ Enrichment) indiquent que l'augmentation du CO₂ ambiant s'observe principalement au niveau des racines. En effet, cette augmentation stimule le transfert du carbone principalement vers la partie de la plante qui se trouve en dessous de la surface. D'autres auteurs (Tubiello et al., 1995) ayant utilisé la même équation de base de Charles-Edwards (1981) (équation 3.1) que celle utilisée dans CYSS, dans le modèle de culture CERES-Wheat ont abouti à des résultats comparables aux nôtres concernant l'effet direct du CO₂ sur le rendement du blé. En effet, leurs simulations ont montré que pour une faible application de l'azote, le doublement de la concentration ambiante du CO₂ de 330 ppm à 660 ppm n'induit qu'une faible augmentation du rendement. Cette augmentation est inférieure à

10% et est de l'ordre de 2% lorsque la culture croît sans irrigation et sous irrigation respectivement.

Par ailleurs, la simulation des effets, direct (fertilisant) et indirect (changement du climat), de la hausse du CO₂ atmosphérique sur les rendements, faite par CYSS a été comparée à celle faite par le modèle FAOm. L'approche empirique d'Okamoto et al. (1991) (équation 2.11 et Figure 4.10) a été utilisée pour tenir compte de l'effet direct du CO₂ sur les rendements simulés par le modèle FAOm. Les valeurs des paramètres S et θ (Figure 4.10) ont été obtenues en résolvant graphiquement l'équation 2.11 en satisfaisant simultanément à deux points de la réponse $\Delta Y=f(\Delta C)$ de chaque culture. Pour des valeurs très faibles et très élevées de ΔC , les tendances asymptotiques de ΔY sont les suivantes:

- si $\Delta C \rightarrow 0$ alors $\Delta Y \rightarrow \theta \Delta C$
- si $\Delta C \rightarrow \infty$ alors $\Delta Y \rightarrow S$

θ et S ont été calculées, pour chaque culture, en utilisant les résultats de Kimball (1983) et Cure et Acock (1986), obtenus à partir d'expériences réalisées dans des chambres expérimentales (Tableau 4.6). Concernant le maïs, le blé, l'orge et le soya, les valeurs de ces deux paramètres ont été calculées en utilisant les résultats de Cure et Acock (1986) obtenues sur l'effet du doublement du CO₂ sur l'accumulation de la biomasse. L'utilisation des données des résultats obtenues sur les rendements aurait été plus appropriée. Cependant, la fluctuation par rapport à la moyenne des valeurs expérimentales obtenues dans le cas de l'accumulation de la biomasse est largement inférieure à celle des valeurs obtenues dans le cas des rendements, et c'est la raison de ce choix. Pour les autres cultures, les données de Kimball (1983) ont été utilisés. Toutefois, pour les fèves et les pois verts, à cause de la très grande erreur observée concernant l'effet du doublement du CO₂ sur les rendements de ces cultures ($1,29 \leq Y(660 \text{ ppm})/Y(330 \text{ ppm}) \leq 2,59$ pour les fèves et $1,32 \leq Y(660 \text{ ppm})/Y(330 \text{ ppm}) \leq 2,70$ pour les pois verts), la valeur moyenne correspondante à l'effet du doublement du CO₂ sur toutes les cultures légumineuses a été utilisée. Finalement, pour

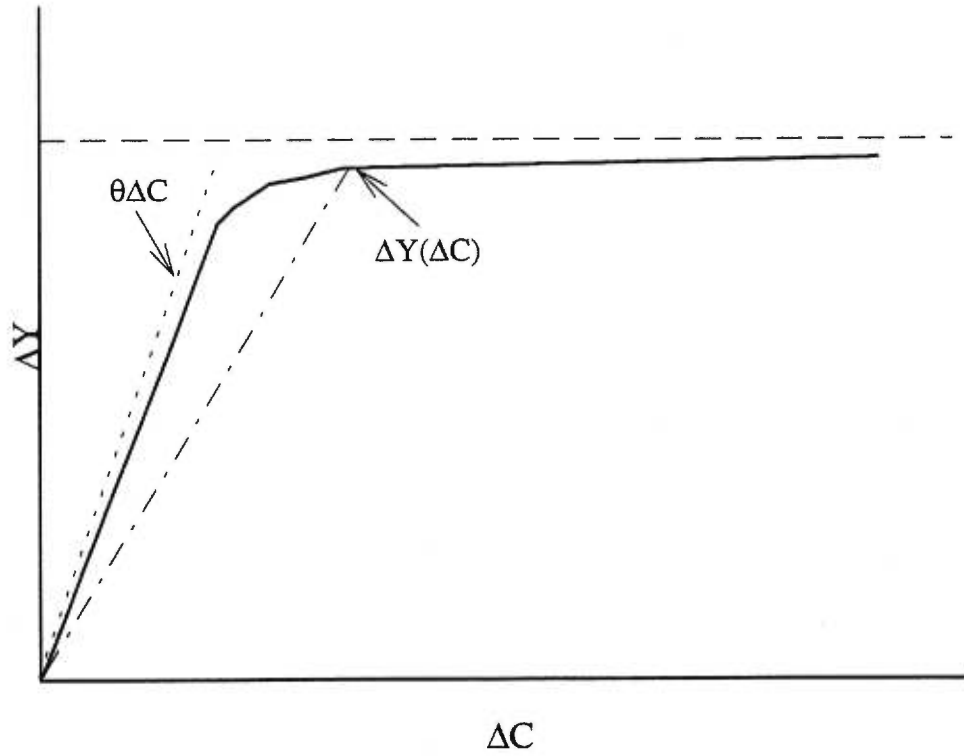


Figure 4.10: Illustration de la variation du rendement des cultures (ΔY) en réponse à la variation du CO₂ atmosphérique (ΔC) (d'après Okamoto et al., 1991).

Tableau 4.6: Données utilisées pour le calcul des paramètres S et θ . Les nombres entre parenthèses indiquent le nombre d'observations.

Culture	% d'augmentation du rendement	Source
maïs ¹	9 ± 5 (31)	Cure et Acock (1986)
blé ¹	31 ± 16 (23)	Cure et Acock (1986)
orge ¹	30 ± 17 (12)	Cure et Acock (1986)
avoine ²	$32 \pm \frac{10}{9}$ (34) *	Kimball (1983)
soya ¹	39 ± 5 (45)	Cure et Acock (1986)
fèves ²	$54 \pm \frac{23}{20}$ (31) ¶	Kimball (1983)
pois verts ²	$54 \pm \frac{23}{20}$ (31) ¶	Kimball (1983)
pomme de terre ²	$64 \pm \frac{50}{39}$ (12)	Kimball (1983)
tomate ²	$20 \pm \frac{4}{5}$ (72)	Kimball (1983)
tournesol ²	$32 \pm \frac{10}{9}$ (34) *	Kimball (1983)

¹ Accumulation de la biomasse

² Rendement

* Moyenne des résultats des céréales C₃

¶ Moyenne des résultats des légumineuses

§ Moyenne des résultats des oléagineuses

Kimball (1983): le CO₂ est élevé de 330 à 660 ppm

Cure et Acock (1986): le CO₂ est élevé de 340 à 680 ppm

l'avoine et le tournesol, les valeurs moyennes des résultats obtenus pour toutes les céréales C_3 et les cultures oléagineuses ont été utilisées respectivement pour ces deux cultures. Les valeurs estimées de S et θ sont données dans le tableau 4.7.

Généralement, la simulation faite au moyen du modèle FAOm montre que le changement projeté par le CCC-MCG pour un doublement de la concentration atmosphérique du CO_2 pourrait conduire à une augmentation du rendement du maïs (culture C_4) et une diminution des rendements des autres (cultures C_3). Cependant, l'introduction de l'effet direct de cette augmentation du CO_2 , sur les rendements en couplant le modèle FAOm avec celui d'Okamoto et al. (1991) éliminerait, généralement, l'effet négatif de ce scénario du changement du climat ou conduirait à une augmentation, parfois considérable, des rendements des cultures C_3 (Figure 4.11). Ces résultats évidemment en désaccord avec ceux obtenues à partir de la simulation faite au moyen de CYSS où les rendements des cultures C_3 comme celui du maïs (culture C_4) diminueraient en réponse au scénario du changement du climat du CCC-MCG, et où l'effet direct de l'augmentation du CO_2 ambiant sur les cultures demeure relativement modeste. La divergence entre les résultats de ces deux simulations (CYSS et FAOm) peut être attribuée, en grande partie, à la structure de ces deux modèles. En effet, la production potentielle est simulée par CYSS selon une approche totalement dynamique tandis que la structure du modèle de FAOm comporte un grand caractère empirique.

Tableau 4.7: Valeurs estimées de S et θ pour chacune des cultures étudiées, ainsi que les valeurs de θ disponibles dans la littérature.

	S estimée	θ estimée	θ observée
maïs	0.12	0.0005	0.00032 < θ < 0.00071 (Wong, 1979)
blé	0.37	0.002	0.00111 (Riley et Hodges, 1969); 0.0025 (Gifford, 1977)
orge	0.35	0.002	0.00073 (Ford et Thorne, 1967)
avoine	0.39	0.002	
soya	0.55	0.002	0.00104 (Carlson et Bazzaz, 1980) 0.00112 (Paterson et Flint, 1980)
fèves	0.71	0.003	0.001 (Tognoni et al., 1967)
pois verts	0.71	0.003	0.00077 (Phillips et al., 1976)
pomme de terre	0.66	0.007	
tomate	0.42	0.0008	0.000728 (Madsen, 1974)
tournesol	0.47	0.002	0.00054 (Carlson et Bazzaz, 1980)

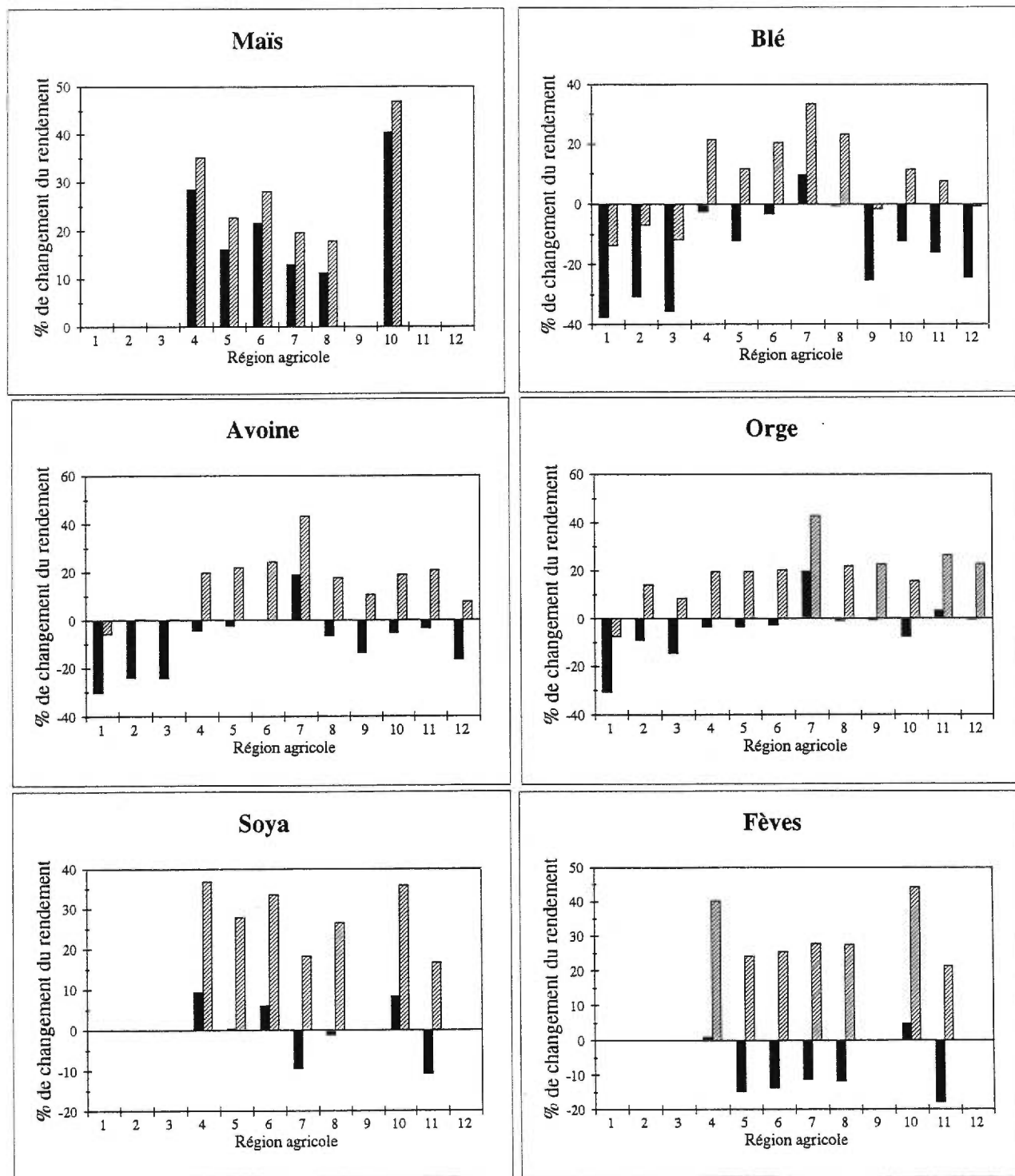


Figure 4.11: Changement relatif des rendements des cultures étudiées dû:

i) au changement climatique projeté par le CCC-MGC (barres noires).

ii) à la combinaison de l'effet du changement du climat projeté par le CCC-MGC et de l'effet direct de l'augmentation du CO₂ ambiant (barres rayées).

Les rendements sont simulés au moyen du modèle FAOm et l'effet direct de l'augmentation du CO₂ ambiant est introduit selon l'approche empirique d'Okamoto et al. (1991).

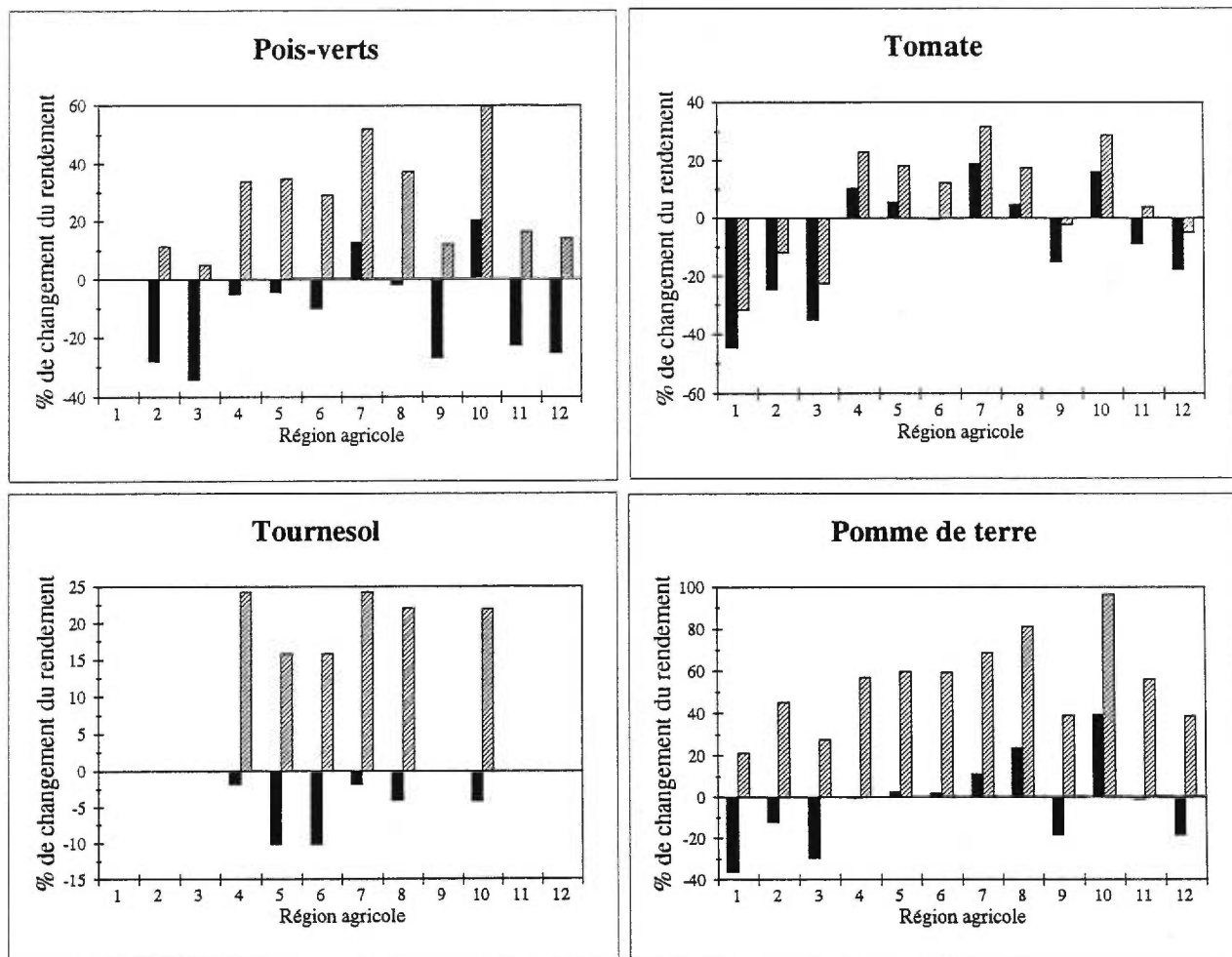


Figure 4.11: Suite.

Chapitre V

EFFET DE LA VARIABILITÉ CLIMATIQUE INTERANNUELLE SUR LE RENDEMENT DES CULTURES ¹

5.1 Introduction

La réponse la plus manifeste des MCG au doublement du CO₂ atmosphérique est une augmentation de la température moyenne annuelle de l'ordre de 1,5-4,5°C à l'échelle globale (Houghton et al., 1995). À des échelles spatiales plus réduites, leurs résultats divergent et leurs climats de contrôle (climats 1xCO₂) ne reproduisent pas convenablement les climats observés. Ceci est particulièrement vrai dans le cas des précipitations (Grotch et McCracken, 1991). De plus, à des échelles temporelles plus fines, les statistiques des climats de contrôle des MCG et des climats observés diffèrent considérablement (Mearns et al., 1990). Ainsi, dans l'étude des impacts d'un possible changement climatique sur les ressources naturelles, les chercheurs se limitaient à l'ajustement des moyennes des normales climatiques. L'adoption de cette approche, qui ne tient pas compte de la variabilité interannuelle du climat (VIC), et les analyses subséquentes pourraient donc mener à une image irréaliste de l'effet du possible changement climatique futur sur ces ressources (Katz et Brown, 1992; Nonhebel, 1994; Semenov et Porter, 1995; Mearns et al, 1997; El Maayar et al., 1998). Davantage, une récente étude faite au Québec a insisté sur la nécessité de la connaissance de la sensibilité de la production agricole à la VIC pour l'élaboration de modèles d'adaptations aussi fiables que possible (Bryant et al., 1997).

Toutefois, s'il s'avère difficile, voire impossible ou irréaliste, d'utiliser des sorties des MCG pour intégrer l'effet de la VIC dans l'étude des impacts des changements climatiques, il est

¹ Une partie des résultats présentés dans ce chapitre a été soumise pour publication dans la revue *Agricultural Systems*.

tout à fait possible de le faire en utilisant les générateurs de données météorologiques (GDM) (Wilks, 1992; Riha et al., 1996; Mearns et al., 1997). C'est d'ailleurs l'alternative qui connaît actuellement de plus en plus d'explorations (Wilks et Riha, 1996). En effet, Les paramètres des GDM peuvent être manipulés de façon à obtenir des séries temporelles de différentes variables climatiques reflétant différents types et amplitudes du changement climatique.

La question qui se pose est alors la suivante: si la notion du changement climatique inclut des changements à la fois de la moyenne et de la variance, quelle serait alors la portion des impacts conséquents, sur l'agriculture dans notre cas, qu'on pourrait attribuer au changement de la moyenne, au changement de la variance et à leur interaction? Les recherches effectuées à ce sujet sont peu nombreuses et traitent principalement du cas du blé (Semenov et Porter, 1995; Mearns et al., 1996; Riha et al., 1996; Mearns et al., 1997). Concernant la variabilité interannuelle de la température, ces études ont abouti, globalement, à des résultats similaires. En effet, lorsque la variabilité de la température augmente, la moyenne du rendement diminuerait et son coefficient de variation augmenterait. Tandis que lorsque la variabilité interannuelle des précipitations augmente, ces études indiquent que la variation conséquente du rendement dépend fortement des caractéristiques climatiques de la région de l'étude.

Dans cette partie de l'étude nous développerons l'approche que nous avons adopté pour analyser les effets de la VIC sur les rendements des cultures étudiées. Cette approche consiste à utiliser la version du générateur de données météorologique WXGEN (Richardson, 1981) adaptée aux études d'impacts des changements climatiques par Wilks (1992) pour le développement de scénarios du changement de la VIC et à son couplage avec CYSS pour analyser les effets possibles de ces scénarios sur les rendements. Pour répondre à notre question du paragraphe précédent, nous analyserons l'amplitude de la différence entre les rendements simulés obtenue, en deux localisations (Montréal et Québec), en procédant au changement de la moyenne des valeurs de la température et des précipitations, et au changement à la fois de la moyenne et de la variance. Il faut noter qu'à notre connaissance, cette étude de l'effet de la VIC sur le rendement des cultures est la première du genre au Canada.

5.2 Description du générateur de données météorologiques WXGEN

Les premiers GDM ont été développés durant les années cinquante pour différentes raisons dont la principale a été de fournir des données en remplacement des données météorologiques manquantes (Hutchison, 1991). Ils comportent des modèles stochastiques, généralement la chaîne de Markov pour simuler les séquences de jours humides et de jours secs, et des modèles probabilistes. Un générateur de nombre aléatoire est utilisé en conjonction avec les modèles de probabilité pour générer des séries aléatoires.

WXGEN (Richardson, 1981) avait été développé spécialement pour les conditions climatiques Nord-Américaines. Il simule des séries temporelles journalières des températures, maximale et minimale, du rayonnement solaire incident, et des précipitations. La chaîne de Markov d'ordre 1, à deux états, est utilisée pour générer l'occurrence des jours humides et secs. Ce processus tient compte de la dépendance stochastique des séries humides et sèches. Les paramètres estimés sont les probabilités de transition p_{11} , probabilité d'occurrence d'un jour humide après un jour humide, et p_{01} , probabilité d'occurrence d'un jour humide après un jour sec. La quantité de précipitation, x , est simulée, pour les jours humides, par l'intermédiaire de la loi de probabilité Gamma dont la fonction de densité s'écrit:

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1} \exp(-x\beta^{-1})}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \quad ; \quad x \geq 0 \quad (5.1)$$

où α est le paramètre de forme, β est le paramètre d'échelle, et Γ est la fonction Gamma.

La moyenne de cette distribution est $\alpha\beta$, et sa variance est $\alpha\beta^2$.

Les températures, maximale et minimale, et le rayonnement solaire sont générés par un processus autorégressif multivariable de premier ordre :

$$x_i(j) = Ax_{i-1}(j) + B\varepsilon_i(j) \quad (5.2)$$

où $x_i(j)$ est une matrice rectangulaire (3x1) dont les éléments sont les valeurs réduites de la température maximale ($j=1$), de la température minimale ($j=2$) et du rayonnement solaire ($j=3$), et l'indice i représente le jour de l'année; $\varepsilon_i(j)$ est la matrice (3x1) des composantes aléatoires indépendantes de la distribution normale réduite; A et B sont des matrices carrées (3x3) construites à partir des matrices de corrélations croisées dont les pas de temps (en jours) sont égaux à 0 et 1, respectivement pour les trois éléments. Les expressions de A et B sont :

$$A = \begin{vmatrix} 0,567 & 0,086 & -0,002 \\ 0,253 & 0,504 & -0,05 \\ -0,006 & -0,039 & 0,244 \end{vmatrix} \quad B = \begin{vmatrix} 0,781 & 0 & 0 \\ 0,328 & 0,637 & 0 \\ 0,238 & -0,341 & 0,873 \end{vmatrix}$$

Les valeurs journalières de la variable j , $X_{i,k}$, au jour i pour l'état d'occurrence de précipitation k (1 pour les jours humides et 0 pour les jours secs) sont alors déduites de la façon suivante :

$$X_{i,k}(j) = x_{i,k}(j) \cdot s_{i,k}(j) + m_{i,k}(j) \quad (5.3)$$

où $s_{i,k}(j)$ et $m_{i,k}(j)$ sont respectivement l'écart type et la moyenne de la variable j au jour i relatif à l'état k .

Les variations saisonnières de la moyenne et de l'écart type des éléments j sont déterminées par les harmoniques de Fourier construites à partir des données mensuelles observées.

La moyenne, μ , et la variance, V , mensuelles des précipitations sont reliées aux valeurs journalières par les relations suivantes:

$$\mu = N\pi\alpha\beta \quad (5.4)$$

$$V = N\pi\alpha\beta^2 \left[1 + \alpha(1-\pi) \frac{1+d}{1-d} \right] \quad (5.5)$$

où N est le nombre de jours dans le mois, π est la probabilité inconditionnelle d'occurrence d'un jour humide, et d est le coefficient d'autocorrélation, relatif à un décalage de 1 jour, d'occurrence de précipitations qui caractérise les longueurs des séries de jours secs et humides. π et d sont définis par les relations suivantes:

$$\pi = \frac{p_{01}}{1 - p_{01} - p_{11}} \quad (5.6)$$

$$d = p_{11} - p_{01} \quad (5.7)$$

5.3 Test de WXGEN

5.3.1 Sites de l'étude et données climatiques utilisées

Deux stations météorologiques ont été sélectionnées pour cette partie de l'étude: Montréal-Dorval et Québec-A. Trente-trois années, de 1960 à 1992, de données journalières des températures maximale et minimale, et des précipitations prises dans chacune de ces stations ont été analysées. Toutefois, concernant le rayonnement solaire, les données journalières de cette variable ne sont disponibles que pour cinq années, de 1988 à 1992, à Montréal-Dorval alors que la station de Québec-A utilise le détecteur RF-4 permettant la mesure du rayonnement net seulement. Il n'y a pas eu par conséquent de test des données générées du rayonnement solaire à la station de Québec-A.

Comme variables d'entrée, WXGEN requiert les valeurs moyennes mensuelles des paramètres, d'échelle et de forme, de la loi de probabilité Gamma, les valeurs mensuelles des probabilités de transition p_{11} et p_{01} , et les moyennes et les écarts types annuels des températures, minimale et maximale, et du rayonnement solaire. Il requiert aussi les harmoniques annuelles de la moyenne et de l'écart type de ces trois derniers éléments météorologiques, pour les jours humides et pour les jours secs. Ces valeurs ont été calculées à partir des données observées et sont présentées dans les tableaux 5.1 et 5.2. Par ailleurs, concernant le rayonnement solaire au site de Québec A, des valeurs approximatives prises des isolignes de Hanson et al. (1994) ont été utilisées.

5.3.2 Analyses effectuées

Trente-trois années de données journalières ont été générées. Les moyennes mensuelles et les distributions des fréquences relatives, des données observées et générées, ont été comparées pour la période Mai-Octobre. Le choix de cette période découle du fait qu'elle inclut la saison de végétation au Québec.

Différents tests statistiques ont été réalisés dont le test t pour les moyennes journalières, le test F pour les écarts-types et le test de conformité de Kolmogorov-Smirnov (K-S) pour tester les différences significatives entre les distributions des valeurs observées et générées. Ce dernier repose sur le calcul de la plus grande différence entre les fréquences relatives cumulées.

5.3.3 Résultats et discussion

Mis à part le rayonnement solaire pendant les jours humides (Montréal), durant la deuxième moitié de l'année, les moyennes mensuelles ainsi que les écarts-types de la température maximale, de la température minimale et du rayonnement solaire sont bien reproduites par WXGEN (Figures 5.1 et 5.2). C'est aussi le cas du nombre de jours humides et des précipitations

Tableau 5.1: Valeurs des probabilités de transition et des paramètres, de forme et d'échelle, de la loi de probabilité Gamma calculées à partir des données observées.

	p_{11}		p_{01}		α		β	
	Montréal	Québec	Montréal	Québec	Montréal	Québec	Montréal	Québec
Janvier	0,65	0,68	0,40	0,43	0,77	0,79	6,40	7,36
Février	0,61	0,65	0,37	0,40	0,84	0,90	6,40	6,29
Mars	0,56	0,58	0,31	0,33	0,85	0,79	7,71	9,03
Avril	0,56	0,57	0,32	0,32	1,01	1,10	6,87	6,60
Mai	0,57	0,58	0,32	0,33	1,19	0,93	5,73	9,22
Juin	0,56	0,59	0,31	0,34	0,85	0,89	9,05	12,41
Juillet	0,54	0,58	0,29	0,33	1,03	0,90	9,08	11,41
Août	0,56	0,59	0,31	0,34	0,97	1,01	10,29	9,56
Septembre	0,54	0,56	0,29	0,35	0,88	0,86	11,52	14,06
Octobre	0,57	0,56	0,32	0,35	1,09	0,88	7,46	9,63
Novembre	0,63	0,67	0,39	0,42	0,98	0,92	7,13	7,49
Décembre	0,65	0,72	0,40	0,47	0,84	0,78	6,95	7,94

p_{11} Probabilité d'occurrence d'un jour humide après un jour humide.

p_{01} Probabilité d'occurrence d'un jour humide après un jour sec.

α Paramètre de forme de la loi de probabilité Gamma.

β Paramètre d'échelle de la loi de probabilité Gamma (mm).

Tableau 5.2 : Moyennes, écarts-types et amplitudes des harmoniques annuelles (AHA) des températures maximale et minimale, et du rayonnement solaire, calculés à partir des données observées.

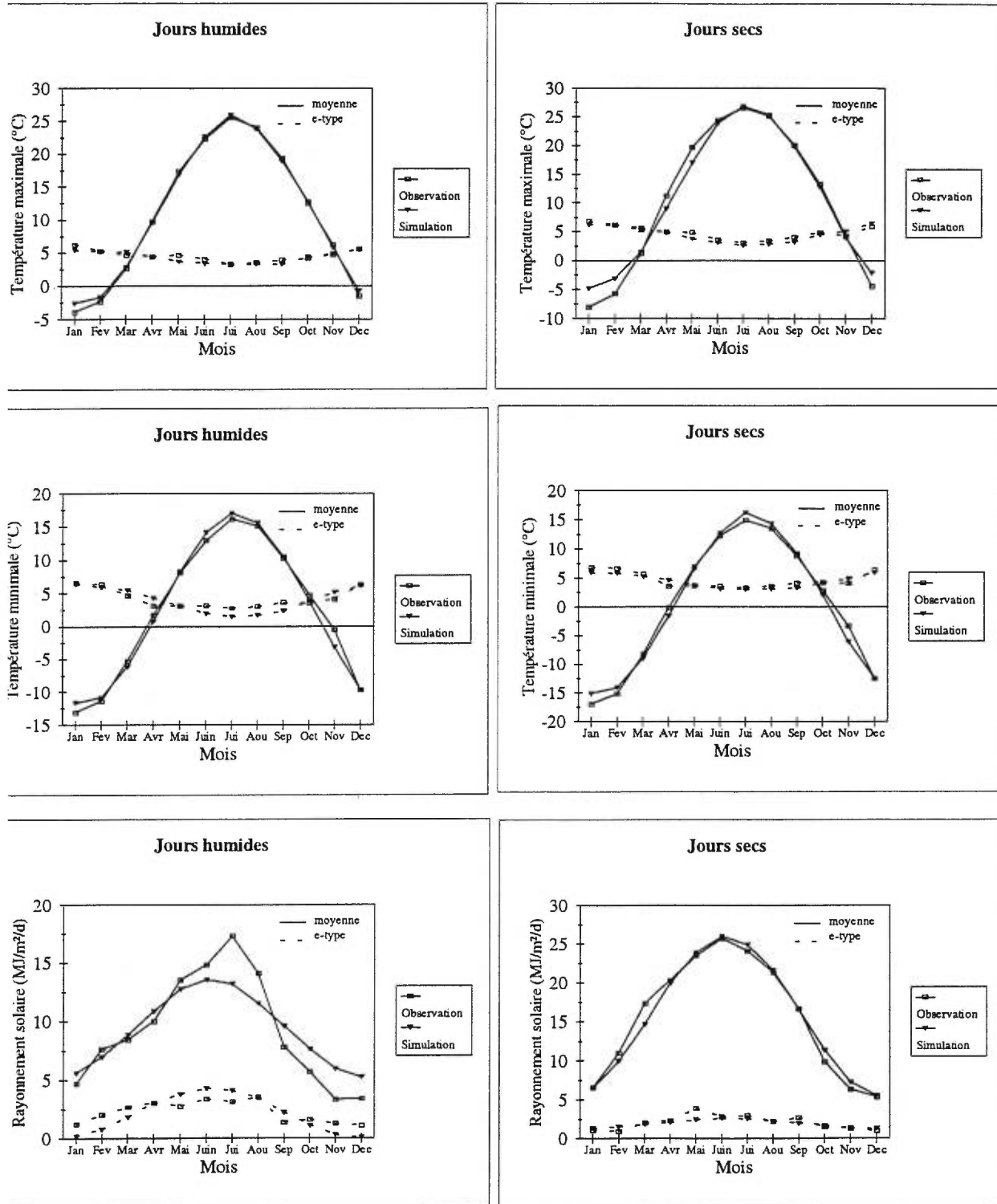
Montréal	<u>Jours secs</u>		<u>Jours humides</u>	
	moyenne	AHA	moyenne	AHA
<u>Température maximale</u>				
moyenne	51,31	28,90	51,93	25,68
écart-type	8,51	-3,57	8,17	-1,77
<u>Température minimale</u>				
moyenne	32,59	28,28	36,50	26,03
écart-type	8,31	-2,77	7,56	-4,77
<u>Rayonnement solaire</u>				
moyenne	15,69	10,32	9,25	4,08
écart-type	2,09	0,72	2,28	2,40

Québec	<u>Jours secs</u>		<u>Jours humides</u>	
	moyenne	AHA	moyenne	AHA
<u>Température maximale</u>				
moyenne	47,98	29,17	48,38	24,22
écart-type	7,96	-0,34	7,81	-0,80
<u>Température minimale</u>				
moyenne	28,06	28,81	32,58	26,49
écart-type	7,83	-0,79	7,74	-4,23
<u>Rayonnement solaire*</u>				
moyenne	15,50	10,73	9,22	5,87
écart-type	4,96	-0,96	5,07	-0,44

Les températures, maximale et minimale, sont en °F comme l'exige WXGEN.

Le rayonnement solaire est en MJ.m⁻².d⁻¹.

* Valeurs prises des isolignes Hanson et al. (1994).



ure 5.1: Valeurs mensuelles moyennes, observées et simulées, des températures, maximale et minimale, rayonnement solaire, des précipitations et du nombre de jours humides, à Montréal.

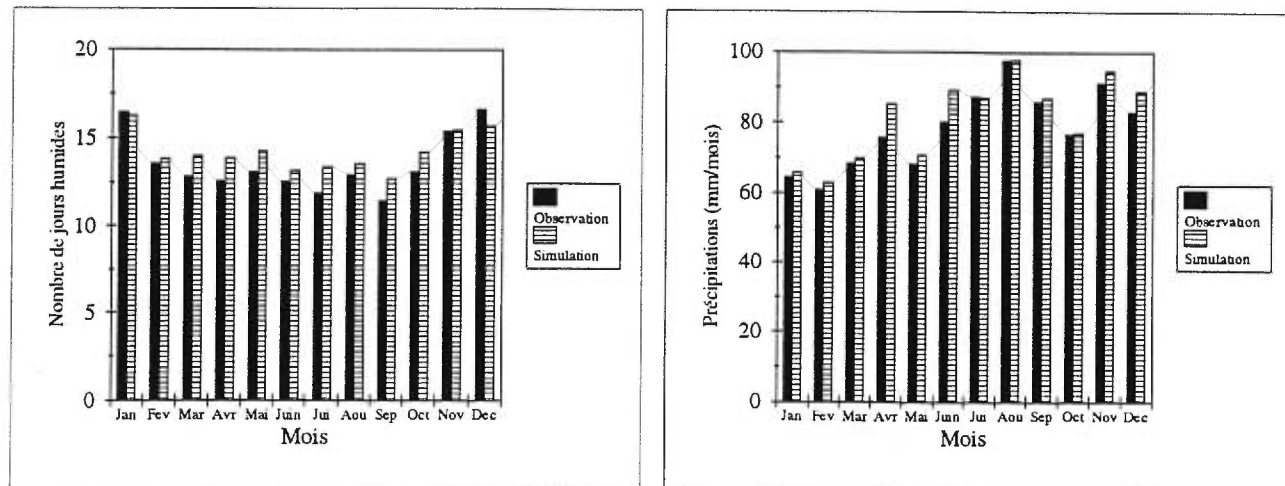


Figure 5.1: Suite

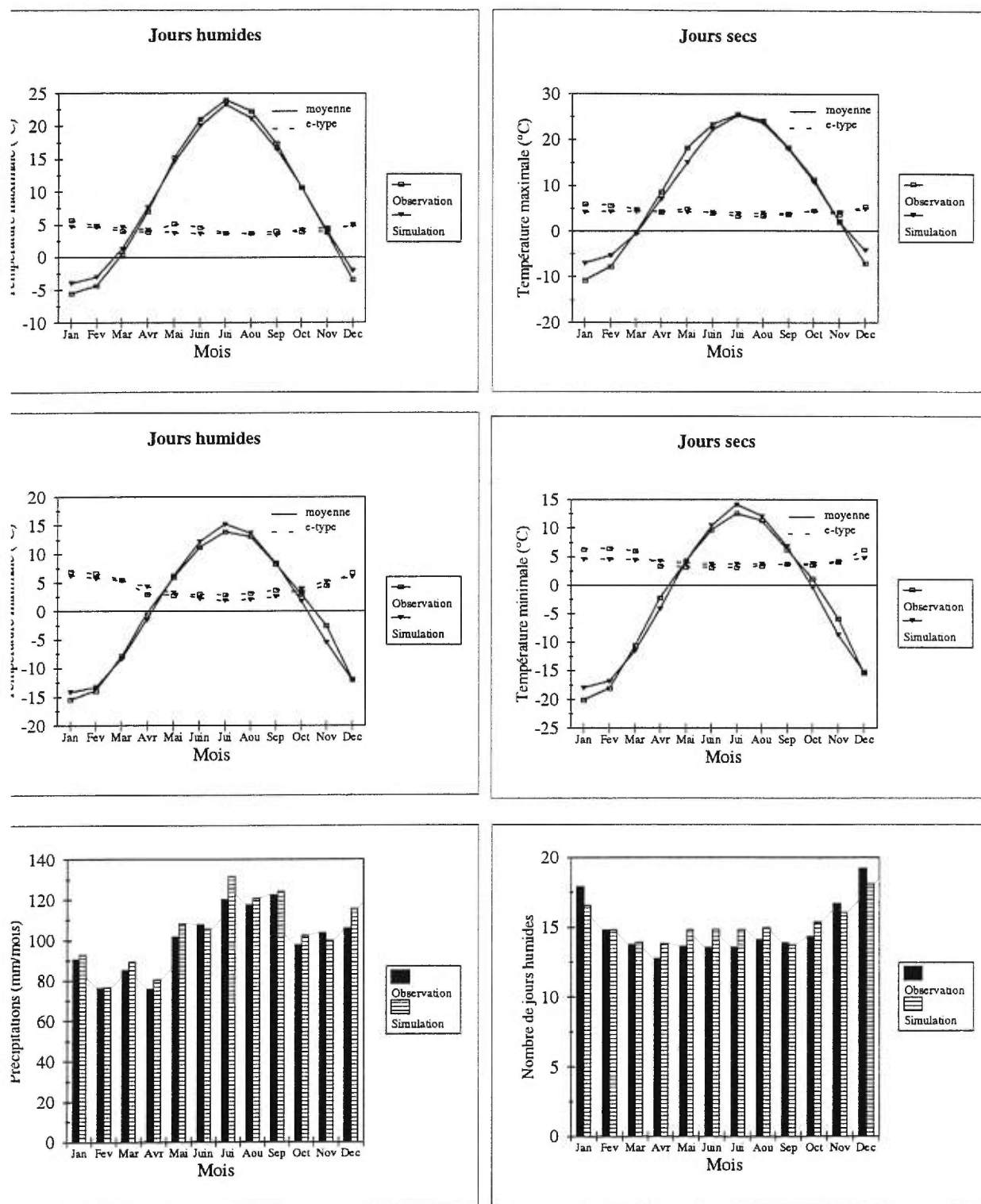


Figure 5.2: Valeurs mensuelles moyennes, observées et simulées, des températures, maximale et minimale, précipitations, et du nombre de jours humides, à Québec.

mensuelles.

Au seuil de 5%, les résultats du test *t-student* montrent que c'est dans le cas de la température minimale à Québec qu'on observe le plus grand nombre de différences significatives (8 mois sur 12 ou 67%) (Tableau 5.3). En regroupant tous les résultats de ce test pour les températures minimale et maximale, et le rayonnement solaire, on constate que l'observation diffère de la simulation dans 53% des cas. Par ailleurs, dans le cas des précipitations, aucune différence statistique significative, tant à Montréal qu'à Québec, n'est observée.

Pour une évaluation plus rigoureuse de WXGEN, les distributions des fréquences, observées et simulées, ont été comparées aussi pour la période incluant les mois de Mai à Octobre (Figures 5.3 et 5.4). On remarque que les fréquences les mieux reproduites par WXGEN sont dans l'ordre celles de la température maximale, des précipitations, de la température minimale et du rayonnement solaire. Les figures 5.3 et 5.4 indiquent aussi que dans le cas des faibles et hautes valeurs de la température minimale et du rayonnement solaire, la simulation produit des fréquences, respectivement plus élevées et moins élevées que l'observation. Par ailleurs, les résultats du test-F (Tableau 5.3) montrent que les variances des données observées et simulées diffèrent pour tous les mois de l'année dans le cas du rayonnement solaire à Montréal, dans 42% des cas pour la température maximale, dans 33% des cas pour la température minimale, et dans 42% et 17% des cas pour les précipitations, respectivement à Montréal et à Québec.

Le tableau 5.3 illustre aussi les résultats de la comparaison des distributions, observées et simulées, des quatre variables climatiques faite au moyen du test de Kolmogorov-Smirnov (K-S). Le cas des précipitations est celui où nous obtenons le moins de différences statistiques significatives (aucune différence significative pour Québec et seulement 1 fois sur 12 pour Montréal), et le cas du rayonnement solaire est celui où nous obtenons le plus grand nombre de différences significatives (dans 75% du temps). Pour les températures, minimale et maximale, les données, observées et simulées, diffèrent significativement dans 42% des cas, en moyenne.

Tableau 5.3 : Nombre de mois avec une différence statistique significative au seuil de 5%.

	Température maximale	Température minimale	Rayonnement Solaire	Précipitations
<u>Test t</u>				
Montréal	4	6	7	0
Québec	7	8	-	0
<u>Test F</u>				
Montréal	5	4	12	5
Québec	5	4	-	2
<u>Test K-S</u>				
Montréal	4	5	9	1
Québec	6	5	-	0

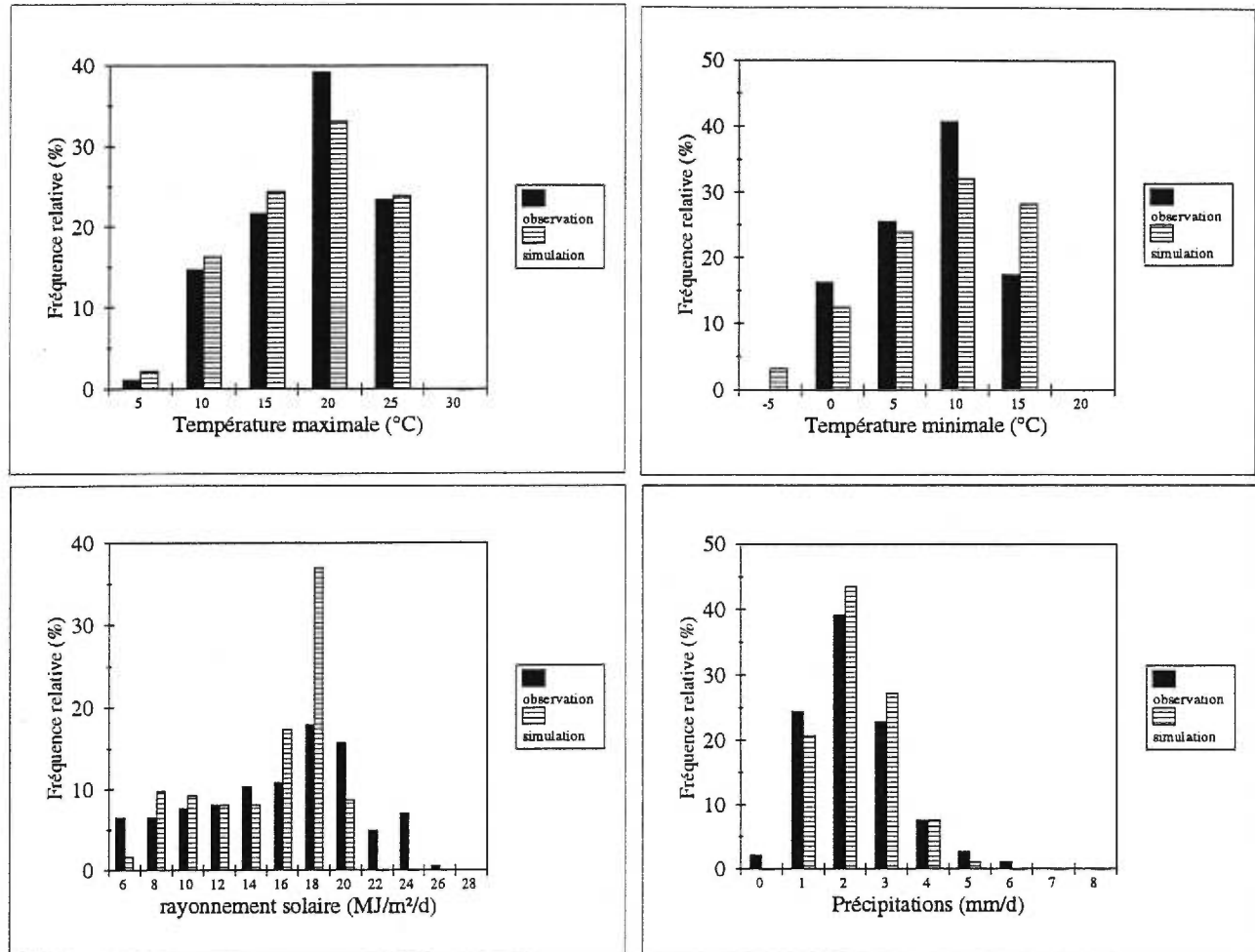


Figure 5.3: Distribution des fréquences des températures, maximale et minimale, du rayonnement solaire et des précipitations pour la période Mai-Octobre, à Montréal.

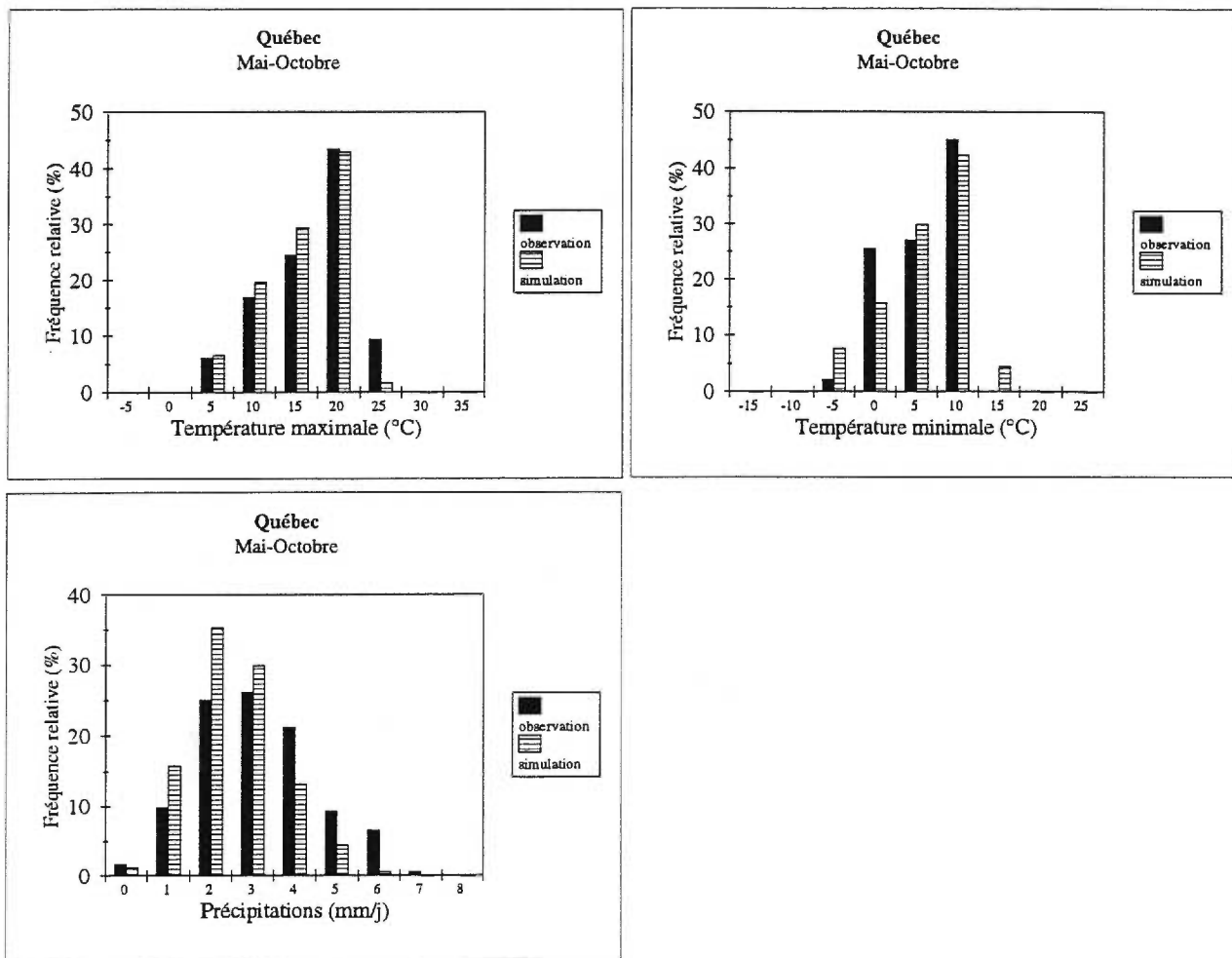


Figure 5.4: Distribution des fréquences des températures, maximale et minimale, et des précipitations pour la période Mai-Octobre, à Québec.

Vu l'importance que représente l'accumulation des degrés jours de croissance (DD_5) et la période sans gel dans le domaine agricole, les valeurs calculées, à partir des données observées et simulées, de ces deux paramètres ont été aussi comparées (Tableau 5.4). On constate que les valeurs simulées sont inférieures aux valeurs observées, de 1,54% dans le cas des DD_5 et de 14 jours dans celui de la période sans gel. Ces derniers chiffres indiquent néanmoins que WXGEN reproduit assez bien ces deux paramètres.

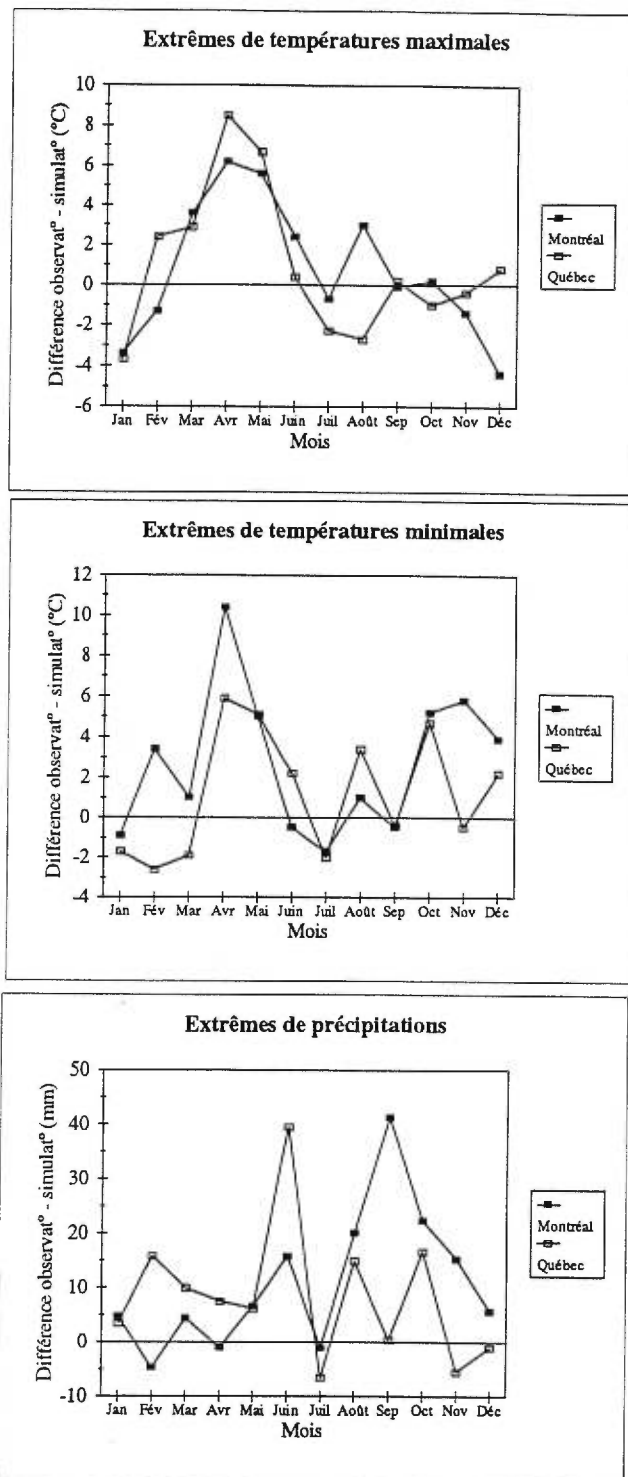
La productivité agricole dépend aussi des événements climatiques extrêmes. La figure 5.5 illustre la différence entre les valeurs extrêmes, observées et générées, des températures, maximale et minimale, et des précipitations enregistrées en un seul jour. On remarque que les valeurs extrêmes observées de ces trois variables sont généralement supérieures aux valeurs générées et que la différence entre l'observation et la simulation atteint parfois des valeurs relativement élevées. C'est le cas notamment de la température maximale à Québec où la différence est d'environ $8,5^{\circ}\text{C}$ au mois d'avril, de la température minimale à Montréal où la différence est de plus de 10°C au mois d'avril, et de la quantité de précipitations enregistrée en un jour où la différence atteint plus de 41 mm au mois de septembre à Montréal, et près de 40 mm au mois de juin à Québec.

Le test de Pearson indique que la corrélation entre les valeurs extrêmes observés et simulés est statistiquement différente de zéro pour les trois variables climatiques.

Hayhoe et Stewart (1996) avaient comparé la performance de WXGEN et de CLIGEN (Nicks et Harp, 1980, Lane et Nearing, 1989) en cinq différentes localisations au Canada dont Lethbridge (Alberta), Swift Current (Colombie Britannique), Windsor (Ontario), Ottawa (Ontario) et Fredericton (Nouveau Brunswick). Ils ont conclu que WXGEN est actuellement le GDM qui reproduit le mieux les conditions climatiques canadiennes. Par conséquent, ils ont recommandé son utilisation pour la génération des données climatiques manquantes ou pour les études d'impacts. Toutefois, les résultats de notre étude montrent que ce modèle a certaines faiblesses qui sont en partie attribuables à sa nature stochastique. En effet, les différences

Tableau 5.4: Comparaison des périodes sans gel (jours) et des degrés jours de croissance (DD₅) observées et simulées.

	Période sans gel (jours)	DD ₅
<u>Montréal</u>		
observation	206	2017
simulation	191	1998
<u>Québec</u>		
observation	189	1638
simulation	176	1603



ure 5.5: Extrêmes observées et générées des températures, maximale et minimale, et des précipitations.

statistiques seraient moins fréquentes si, d'une part, la comparaison entre l'observation et la simulation avait été réalisée sur des périodes plus longues (Sharpley et Williams, 1990; Mearns et al., 1996), et si d'autre part, la chaîne de Markov du 2^{ème} ordre ou d'un ordre supérieur a été utilisée à la place de la chaîne de Markov du 1^{er} ordre pour générer les probabilités de transition (Chin, 1977; Wallis et Griffiths, 1995).

5.4 Effet du changement de la variabilité interannuelle de la température et des précipitations sur les rendements

5.4.1 Caractéristiques des sites à l'étude

Les rendements ont été simulés au moyen du modèle de culture CYSS décrit ci-dessus. Deux sites ont été choisis pour étudier la sensibilité de ces rendements aux changements des variabilités interannuelles, de la température et des précipitations: Montréal (région agricole de Montréal-Sud) et Québec (région agricole de Québec). Les conditions de température et de précipitations durant la saison de croissance sont les principales différences entre ces deux sites. De plus, le site de Québec est situé près de la frontière Nord de la carte de la production agricole dans la province de Québec. Ces conditions font que certaines cultures ne peuvent être produites dans la région de Québec, du fait qu'elles nécessitent une trop longue saison de croissance (i.e. maïs, soya et fèves). Par ailleurs, deux types de sols ont été utilisés pour chaque site. Ces sols comprennent un sol limoneux et un sol de type limon argileux à Montréal et sont de type limon sableux à Québec. Cela implique que la capacité maximale de rétention de l'eau des sols au site de Montréal (200mm pour le sol limoneux et 150mm pour le sol limon argileux) est supérieure à celle des sols au site de Québec (100mm).

5.4.2 Description des scénarios climatiques choisis

Une analyse de la réponse des rendements aux changements des valeurs moyennes, de la

température et des précipitations, et de leurs variances a été effectuée. Pour ce faire, 90 années de données climatiques ont été générées pour chacun des deux sites. Le choix de ce nombre élevé d'années (90) permet une meilleure stabilité de WXGEN, et par conséquent une meilleure simulation des conditions climatiques actuelles (Mearns et al., 1996).

Dans le but d'étudier l'effet du changement de la variabilité interannuelle de la température (VT) sur les rendements, les conditions suivantes ont été sélectionnées:

- augmentation de la température journalière moyenne de 2 et 4°C (scénarios de base).
- augmentation de la température journalière moyenne de 2 et 4°C, ainsi que la perturbation de VT. Cette perturbation a été réalisée en réduisant VT par les facteurs 0,67 et 0,5, et en l'augmentant par les facteurs 1,5 et 2.

Concernant les précipitations, les résultats de l'étude de Waggoner (1989) ont été utilisés pour effectuer les changements des valeurs moyennes. En effet, le changement de la quantité moyenne de précipitations d'un facteur A requiert le changement des paramètres de forme (α) et d'échelle (β) de la distribution Gamma, en les multipliant par les quantités $A^{0,69}$ et $A^{0,31}$ respectivement. Ceci induit un changement de la variance par le facteur $A^{1,31}$ (rapport nouvelle variance / ancienne variance). L'utilisation de la méthode de Waggoner (1989) pour modifier les valeurs moyennes des précipitations implique un changement de la symétrie de la distribution (à travers le paramètre de forme, α) et de l'intensité (à travers le paramètre d'échelle, β) des précipitations et une modification de α plus importante que celle de β . Cette méthode est basée sur des observations à long terme (plus de 100 ans) effectuées en plusieurs locations aux États-Unis. Il nous semble alors, qu'il est plus approprié d'utiliser cette approche que celle de Smith et Tirpak (1989) utilisée dans l'étude de Mearns et al. (1997) où le changement des précipitations moyennes se fait en modifiant seulement la valeur du paramètre d'échelle, β .

Pour nos analyses, les valeurs mensuelles moyennes des précipitations ont été augmentées et diminuées de 20%. On obtient ainsi deux scénarios de base. Subséquemment aux changements

des valeurs moyennes, la variabilité des précipitations (VP) a été perturbée en modifiant l'intensité et la fréquence des précipitations. Ces perturbations peuvent se résumer en quatre points:

- augmentation de l'intensité de précipitations et réduction du nombre de jours humides (i.e., augmentation de β et diminution de π , tout en maintenant le paramètre de persistance, d , constant). Il en résulte une augmentation de VP.
- diminution de l'intensité de précipitations et augmentation du nombre de jours humides (i.e., diminution de β et augmentation de π , tout en maintenant le paramètre de persistance, d , constant). Il en résulte une diminution de VP.
- augmentation du paramètre de persistance, d , tout en gardant le nombre de jours humides constant. Il en résulte une augmentation de VP.
- diminution du paramètre de persistance, d , tout en gardant le nombre de jours humides constant. Il en résulte une diminution de VP.

Par ailleurs, comme $d = p_{11} - p_{01}$, le changement de sa valeur implique le changement des valeurs des deux probabilités de transition. Toutefois, le taux de diminution de VP, lorsque cela est fait en diminuant d , est contrôlé par la solution que nous impose l'équation 5.6 (d ne peut être inférieur à zéro).

D'autres scénarios de changement de VP peuvent être réalisés (Riha et al., 1996). Cependant, ces derniers auteurs ont observé que la principale différence entre les réponses des rendements des cultures aux changements de VP s'observe entre les scénarios construits à partir de l'altération du paramètre π et ceux où ce paramètre demeure constant. Aussi, on s'est limité à l'étude de la sensibilité des rendements aux scénarios décrits ci-dessus. De plus, WXGEN simule les valeurs des températures et du rayonnement solaire selon que le jour est humide ou sec. La perturbation du paramètre π peut ainsi influencer les valeurs simulées de ces variables, mais principalement celles du rayonnement solaire (Katz et al., 1996). Ainsi, pour isoler complètement l'effet de VP sur les rendements, Riha et al. (1996) ont procédé en ajustant les valeurs simulées de ces trois variables de façon à ce que ces valeurs ne changent pas lorsqu'on change π . Toutefois,

pour préserver la consistance physique entre les quatre variables simulées par WXGEN, nous avons préféré éviter ce type d'ajustement dans cette étude.

Finalement, deux autres scénarios où un changement simultané de VT et VP, additionné aux changements des moyennes de la température et des précipitations, ont été construits et analysés selon les conditions suivantes :

- augmentation des valeurs moyennes de la température par 2 et 4°C, et des précipitations par 20% (scénarios de base).
- doublement de VT et augmentation de VP, en plus du changement des valeurs moyennes.

À notre connaissance, aucune des études existantes n'a traité de la sensibilité des rendements des cultures aux changements simultanés de VT et VP.

On note aussi que la discussion des résultats ci-dessous porte sur la différence relative entre la réponse des rendements aux scénarios de base et celle aux scénarios où des changements combinés des valeurs moyennes et de VT et/ou de VP ont été effectués.

5.5 Résultats

5.5.1 Sensibilité des rendements aux changements moyens des valeurs de la température et des précipitations

Le tableau 5.5 illustre les rendements moyens simulés ainsi que leurs écarts-types (std), pour les 90 années de données climatiques générées, aux deux sites de l'étude. Concernant le climat actuel (climat non perturbé), les valeurs des rendements moyens sont sensiblement les mêmes aux deux sites. Cependant, leurs écarts-types sont d'environ 60% plus élevés à Québec qu'à Montréal. Tandis que l'augmentation de la température moyenne induit une diminution des

Tableau 5.5: Sensibilité des rendements moyens (t/ha) et de leurs écarts-types aux changements des valeurs moyennes de la température et des précipitations.

Scénario climatique	CNP		T+2		T+4		0.8P		1.2P	
	rend	std	rend	std	rend	std	rend	std	rend	std
<i>Montréal</i>										
maïs	3,8	0,6	3,2	0,4	2,7	0,3	3,3	0,4	4,1	0,4
avoine	2,8	0,3	2,4	0,2	2	0,2	2,4	0,4	3	0,2
orge	3,1	0,3	2,7	0,2	2,3	0,2	2,7	0,4	3,3	0,2
blé	3	0,3	2,6	0,2	2,2	0,2	2,6	0,4	3,2	0,3
tomate	9,2	0,9	7,7	0,7	6,3	0,7	8,1	1,1	9,6	0,8
p. de terre	23,8	2,2	20,3	1,9	17	1,8	20,5	2,9	24,9	1,8
soya	2	0,3	1,5	0,2	1,2	0,2	1,7	0,3	2,1	0,3
fèves	2,3	0,3	1,8	0,3	1,4	0,2	2	0,3	2,5	0,2
pois verts	11,2	1,4	9,4	1	7,9	0,9	9,7	1,5	12,1	1,3
tournesol	2,5	0,3	1,9	0,2	1,5	0,2	2,2	0,3	2,6	0,2
<i>Québec</i>										
maïs	n/a	n/a	n/a	n/a	2,3	0,4	n/a	n/a	n/a	n/a
avoine	2,8	0,5	2,2	0,4	1,8	0,3	2,5	0,5	3	0,5
orge	2,9	0,3	2,5	0,4	2,1	0,3	2,6	0,4	3,1	0,3
blé	3,1	0,5	2,4	0,4	2	0,3	2,7	0,5	3,3	0,5
tomate	9,9	1,6	7,6	1,3	6,1	1	8,8	1,6	10,6	1,6
p. de terre	23,9	3,6	19,5	3,1	15,9	2,6	21,6	3,6	25,5	3,4
soya	n/a	n/a	n/a	n/a	1,2	0,2	n/a	n/a	n/a	n/a
fèves	n/a	n/a	n/a	n/a	1,5	0,3	n/a	n/a	n/a	n/a
pois verts	12,7	2,2	9,5	1,8	7,3	1,4	11,2	2	13,8	2,2
tournesol ^{&}	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a

[&] le sol ne permet pas la croissance de la culture; n/a, non applicable: la longueur de la saison de croissance, de la région, est inférieure au temps requis pour la maturation de la culture.

CNP, climat non perturbé; T+2 et T+4, la température moyenne est augmentée de 2°C et 4°C respectivement; 0.8P, la quantité de précipitations est diminuée de 20%; 1.2P, la quantité de précipitation est augmentée de 20%; rend, rendement; std, écart type.

rendements et de leurs écarts-types, l'augmentation des précipitations induit une augmentation des rendements et une diminution de leurs écarts-types. Par ailleurs, une augmentation de la température moyenne de 4°C permet aux cultures du maïs, du soya et des fèves d'atteindre la maturation à Québec.

5.5.2 Sensibilité des rendements à VT

D'après les figures 5.6 et 5.7, l'augmentation de VT, combinée avec une augmentation de la température moyenne, conduirait à une plus grande diminution des rendements que celle que nous obtenons en augmentant seulement la température moyenne. On remarque aussi que le taux de diminution des rendements en réponse à l'augmentation de VT semble plus élevée, d'environ 100%, à Québec qu'à Montréal.

Par ailleurs, la réponse des rendements des cultures au changement de VT varie selon l'espèce. En effet, l'augmentation de VT agirait négativement sur les rendements des cultures de type C₃ et positivement sur les rendements des cultures de type C₄ (Figures 5.6 et 5.7). Cette réponse est plus prononcée lorsque l'augmentation de VT est combinée avec une augmentation de la température moyenne de 4°C que de 2°C, pour les cultures C₃, et elle l'est moins pour le maïs (culture C₄). En effet, sous les conditions climatiques actuelles tant à Québec qu'à Montréal, les valeurs de la température moyenne durant la saison de croissance sont comprises dans le domaine de températures optimales pour la croissance des cultures C₃ (Figure 5.8). Ainsi, l'augmentation simultanée de la température moyenne (principalement par 4°C) et de VT, induit davantage de fluctuations de la température à l'extérieur du domaine de températures optimales. En plus, on sait qu'en dehors de ce dernier, la variation de la photosynthèse est brusque. D'où l'effet négatif sur les rendements des cultures C₃ qu'engendre une augmentation de VT. D'autre part, l'augmentation simultanée de la température moyenne (principalement par 4°C) et de VT provoque des fluctuations de températures plus fréquentes à l'intérieur du domaine optimum de croissance, pour les cultures C₄. Ceci conduit à l'effet positif sur les rendements.

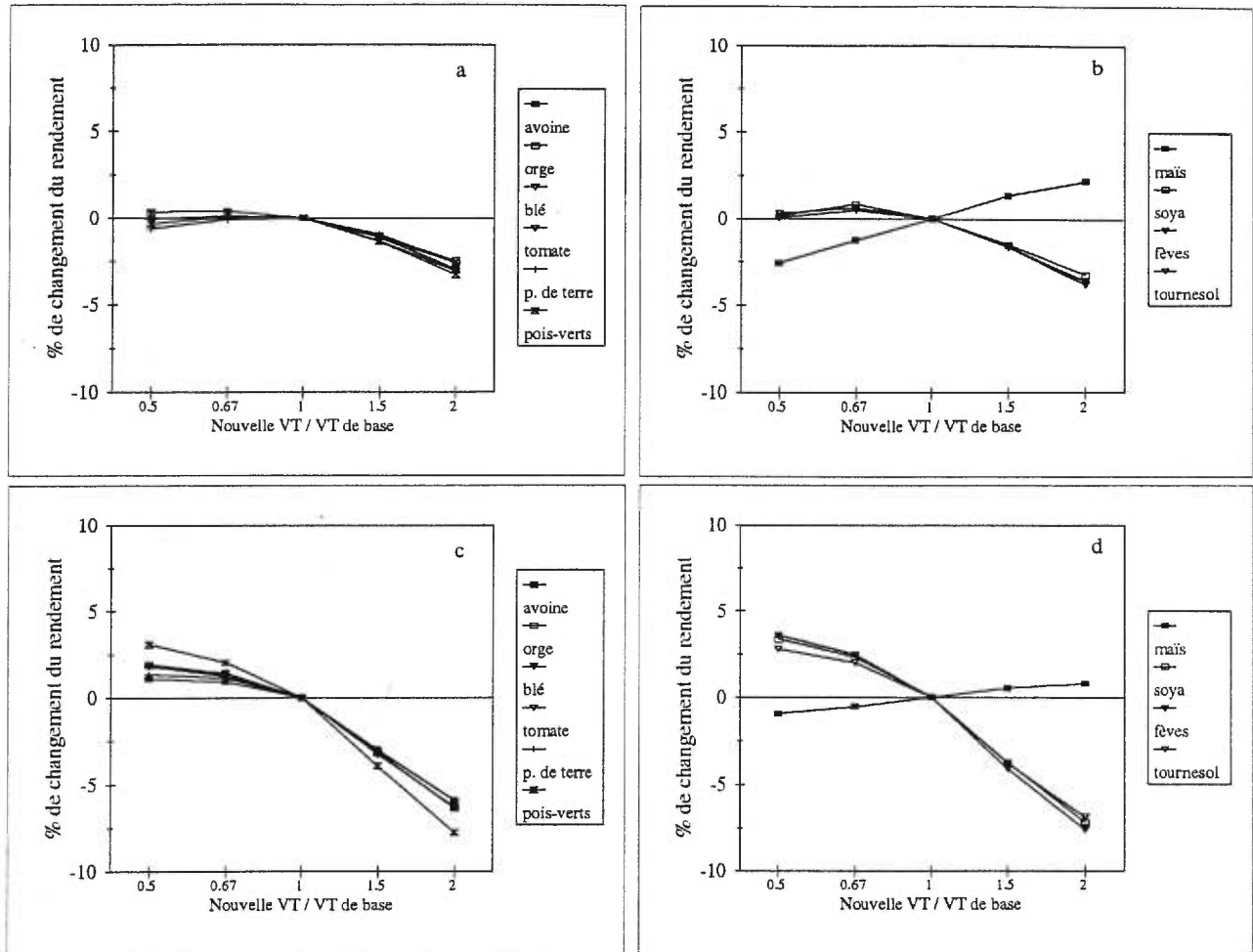


Figure 5.6: Changement relatif des rendements, à Montréal, en réponse au changement de VT, combiné avec une augmentation de 2°C de la température moyenne (a,b), et avec une augmentation de 4°C de la température moyenne (c,d).

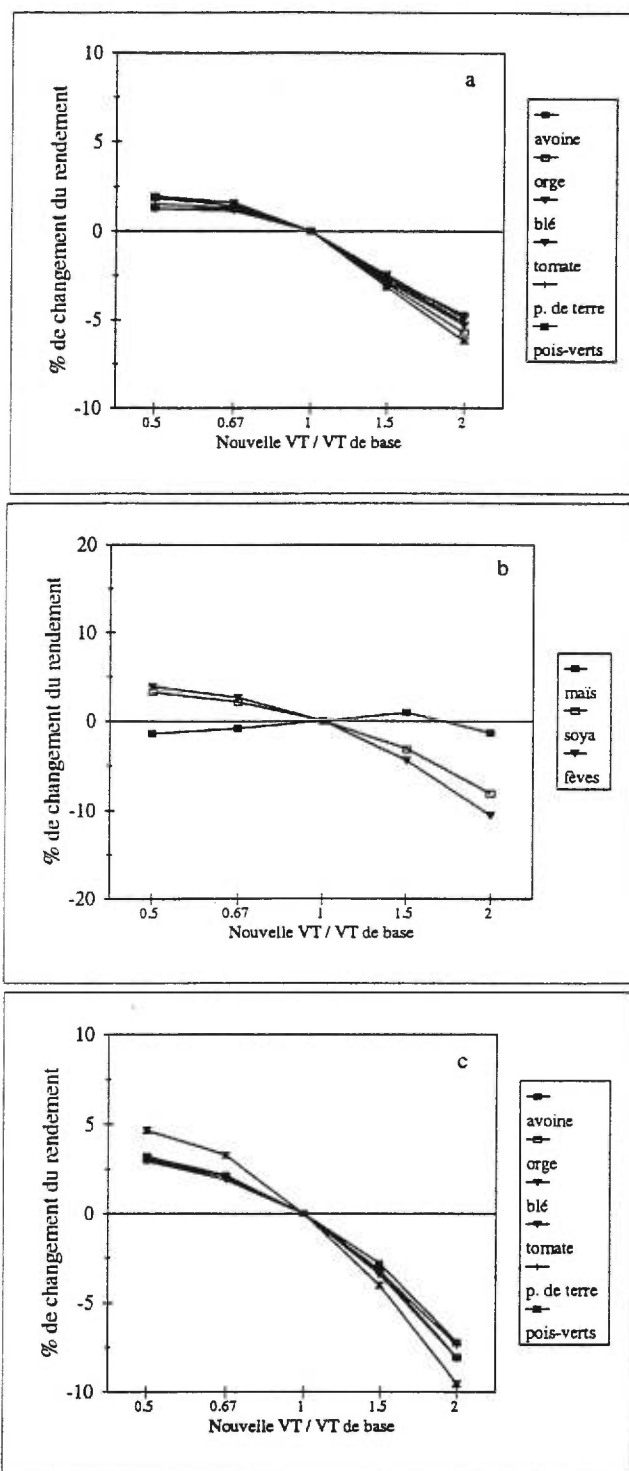


Figure 5.7: Changement relatif des rendements, à Québec, en réponse au changement de VT, combiné à une augmentation de 2°C de la température moyenne (a), et avec une augmentation de 4°C de la température moyenne (b,c).

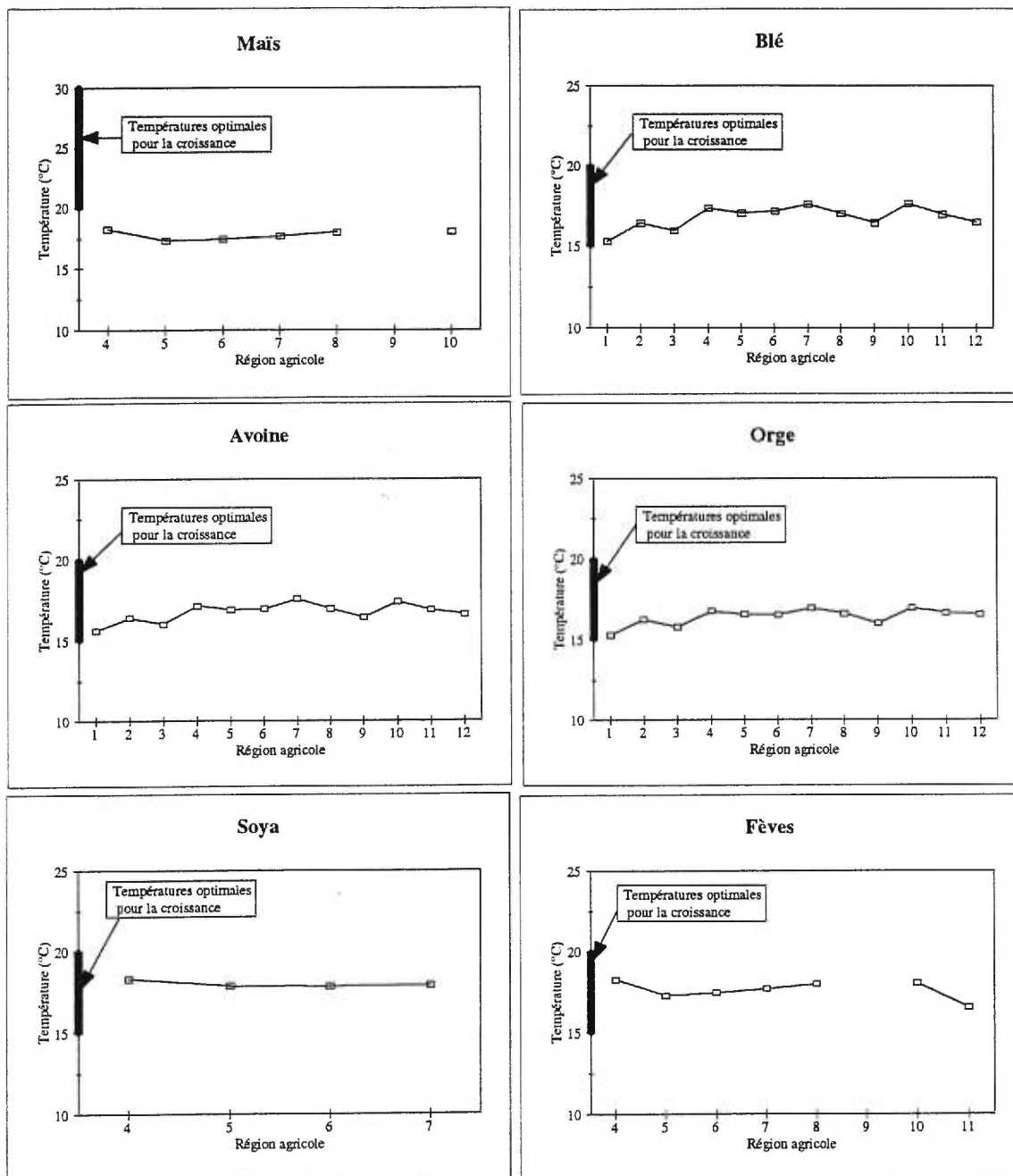


Figure 5.8 : Température moyenne durant la période de croissance des cultures étudiées.

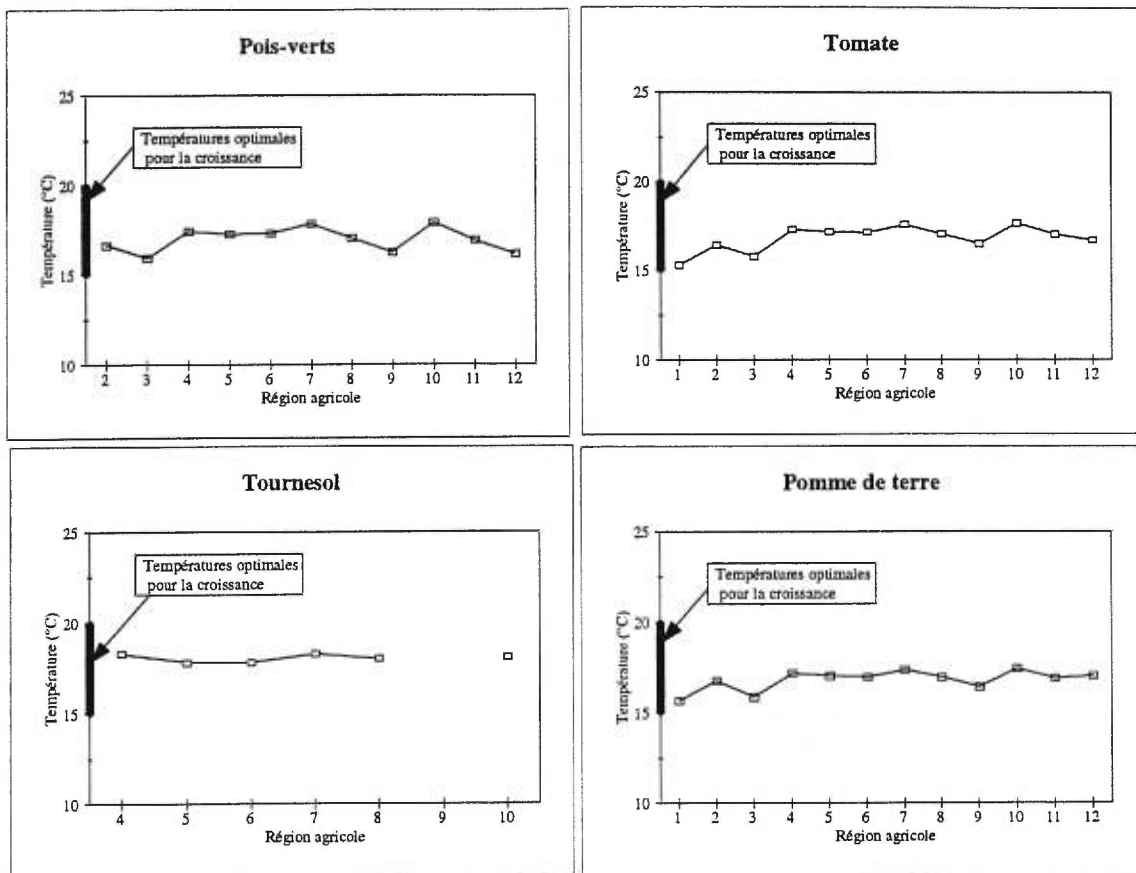


Figure 5.8 : Suite.

Concernant le coefficient de variation des rendements (CV), ce dernier augmente (diminue) lorsque VT augmente (diminue) (Figures 5.9 et 5.10). À Montréal comme à Québec, l'augmentation du CV est d'environ 100% plus importante lorsque l'augmentation de VT est combinée avec une augmentation de 4°C de la température moyenne qu'avec une augmentation de cette dernière de 2°C.

Le nombre de jours nécessaires à la maturation n'est pas affecté par les changements de VT. Aux deux sites, l'augmentation de VT accélère la maturation de 2 jours ou moins, tandis que sa diminution provoque une diminution du temps de maturation de 2 jours ou moins.

5.5.3 Sensibilité des rendements à VP

- *Effets combinés de l'augmentation de VP et du changement de la moyenne des précipitations*

Aux deux sites de l'étude, l'augmentation de VP semble avoir un effet positif sur les rendements (Figures 5.11 à 5.14). Cet effet est plus important lorsque l'augmentation de VP est combinée avec une diminution qu'avec une augmentation des précipitations moyennes. Par ailleurs, la variation relative des rendements est moins importante lorsque VP est augmentée à travers l'augmentation du paramètre d , que lorsqu'elle est augmentée à travers l'augmentation β et la diminution de π . On remarque aussi que l'augmentation des rendements, en réponse à l'augmentation de VP combinée avec une diminution des précipitations moyennes, est plus importante à Montréal qu'à Québec.

Contrairement au cas où on change VT, la variation du CV des rendements (comprise entre $\pm 20\%$) en réponse à l'augmentation de VP ne montre aucune tendance générale (Figures 5.15 à 5.18). Cependant, l'augmentation simultanée de VP et de la moyenne des précipitations, induit une plus grande variation des rendements à Montréal qu'à Québec.

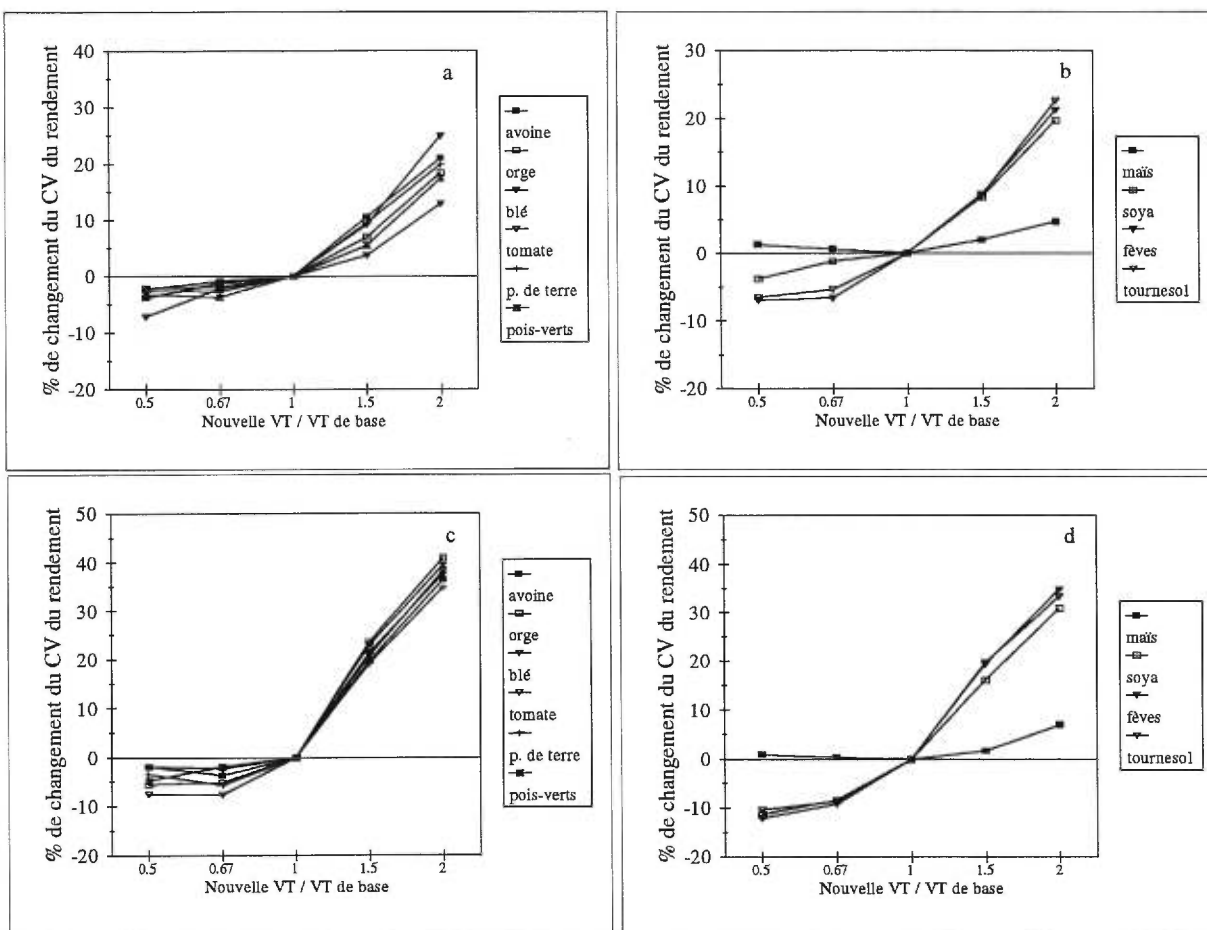


Figure 5.9: Changement relatif du CV des rendements, à Montréal, en réponse au changement de VT, combiné avec une augmentation de 2°C de la température moyenne (a, b), et avec une augmentation de 4°C de la température moyenne (c, d).

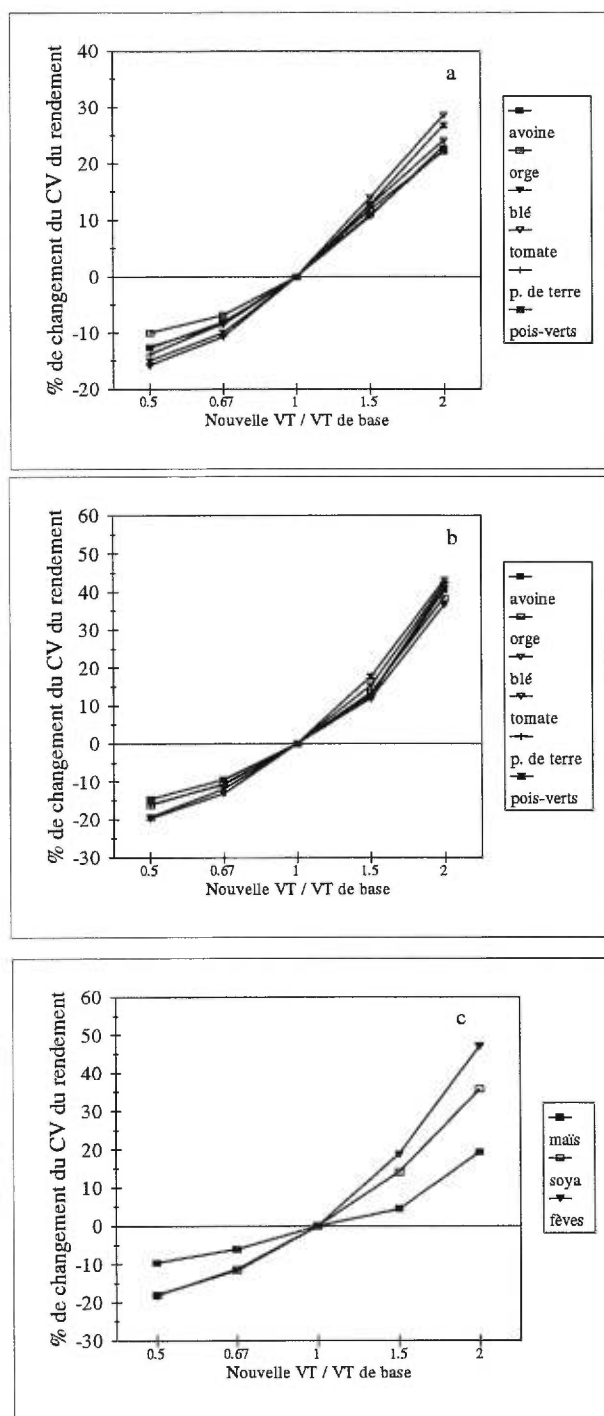


Figure 5.10: Changement relatif du CV des rendements, à Québec, en réponse au changement de VT, combiné avec une augmentation de 2°C de la température moyenne (a), et avec une augmentation de 4°C de la température moyenne (b,c).

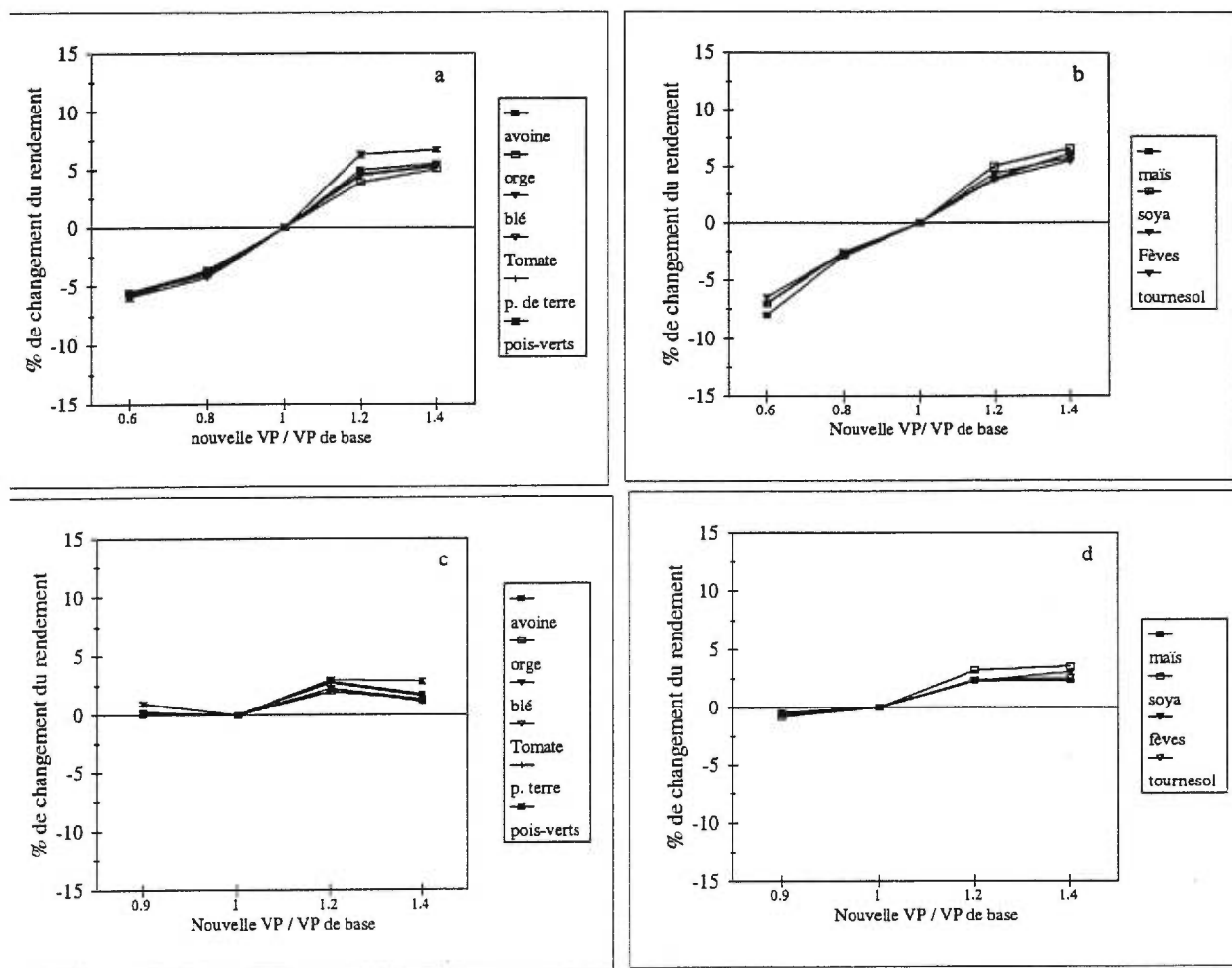


Figure 5.11: Changement relatif des rendements, à Montréal, en réponse au changement de VP, combiné avec une augmentation, de 20%, des précipitations moyennes.
 a, b : le changement de VP est effectué à travers l'altération de β et de π .
 c, d : le changement de VP est effectué à travers l'altération de d .

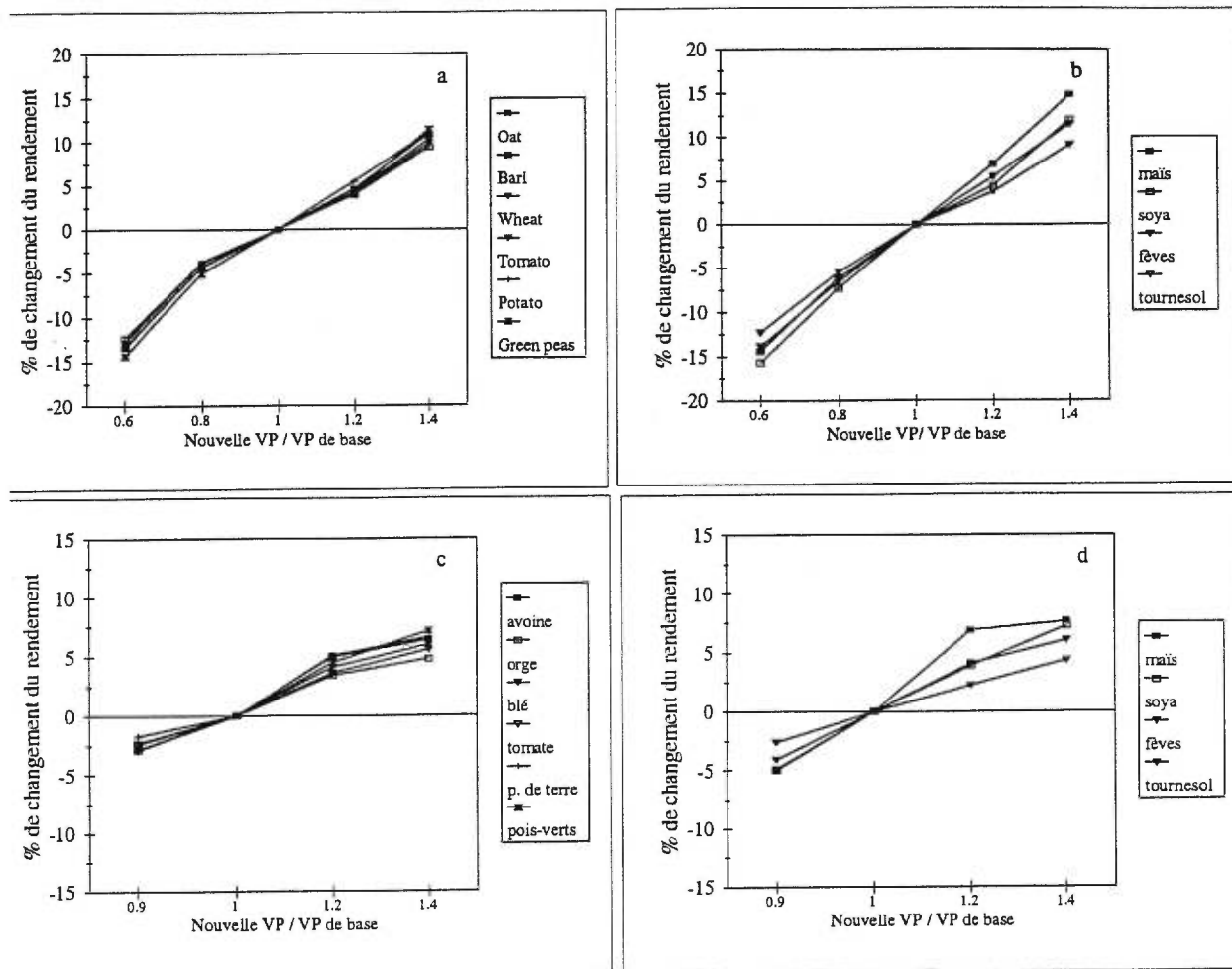


Figure 5.12: Changement relatif des rendements, à Montréal, en réponse au changement de VP, combiné avec une diminution, de 20%, des précipitations moyennes.

a, b : le changement de VP est effectué à travers l'altération de β et de π .

c, d : le changement de VP est effectué à travers l'altération de d.

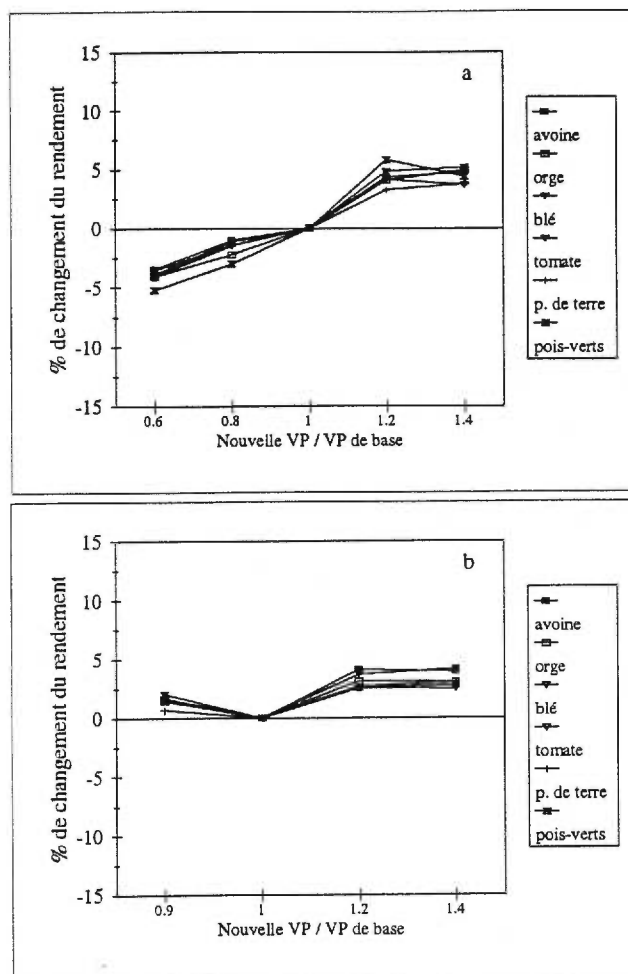


Figure 5.13: Changement relatif des rendements, à Québec, en réponse au changement de VP, combiné avec une augmentation, de 20%, des précipitations moyennes.
 a : le changement de VP est effectué à travers l'altération de β et de π .
 b : le changement de VP est effectué à travers l'altération de d .

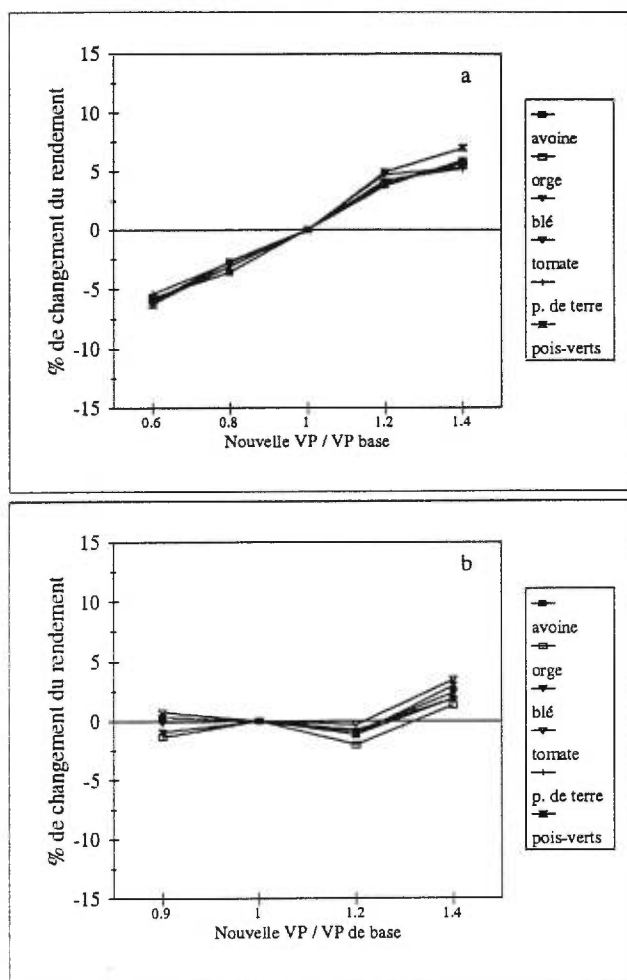


Figure 5.14: Changement relatif des rendements, à Québec, en réponse au changement de VP, combiné avec une diminution, de 20%, des précipitations moyennes.

a : le changement de VP est effectué à travers l'altération de β et de π .

b : le changement de VP est effectué à travers l'altération de d.

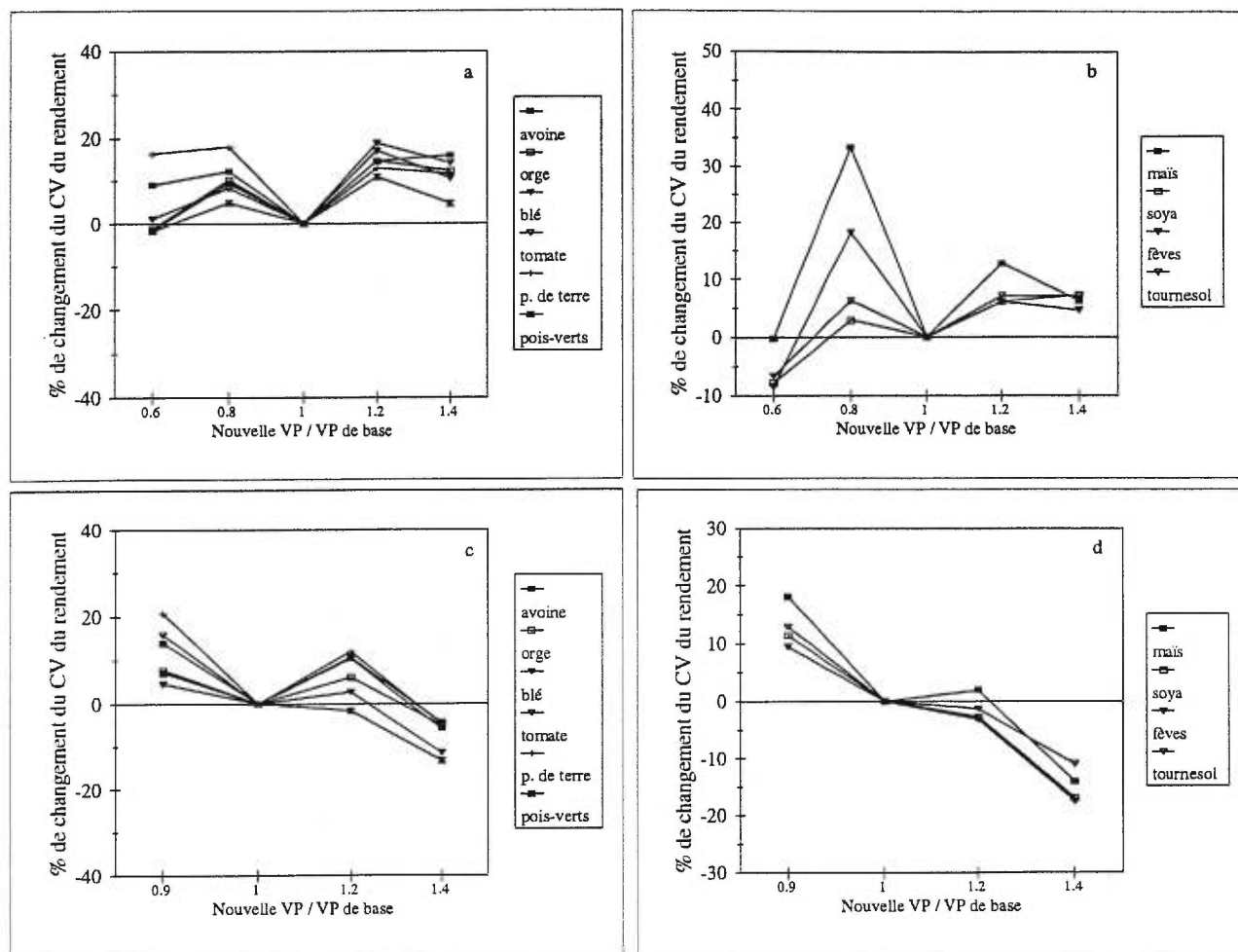


Figure 5.15: Changement relatif du CV des rendements, à Montréal, en réponse au changement de VP, combiné avec une augmentation, de 20%, des précipitations moyennes.

a, b : le changement de VP est effectué à travers l'altération de β et de π .

c, d : le changement de VP est effectué à travers l'altération de d .

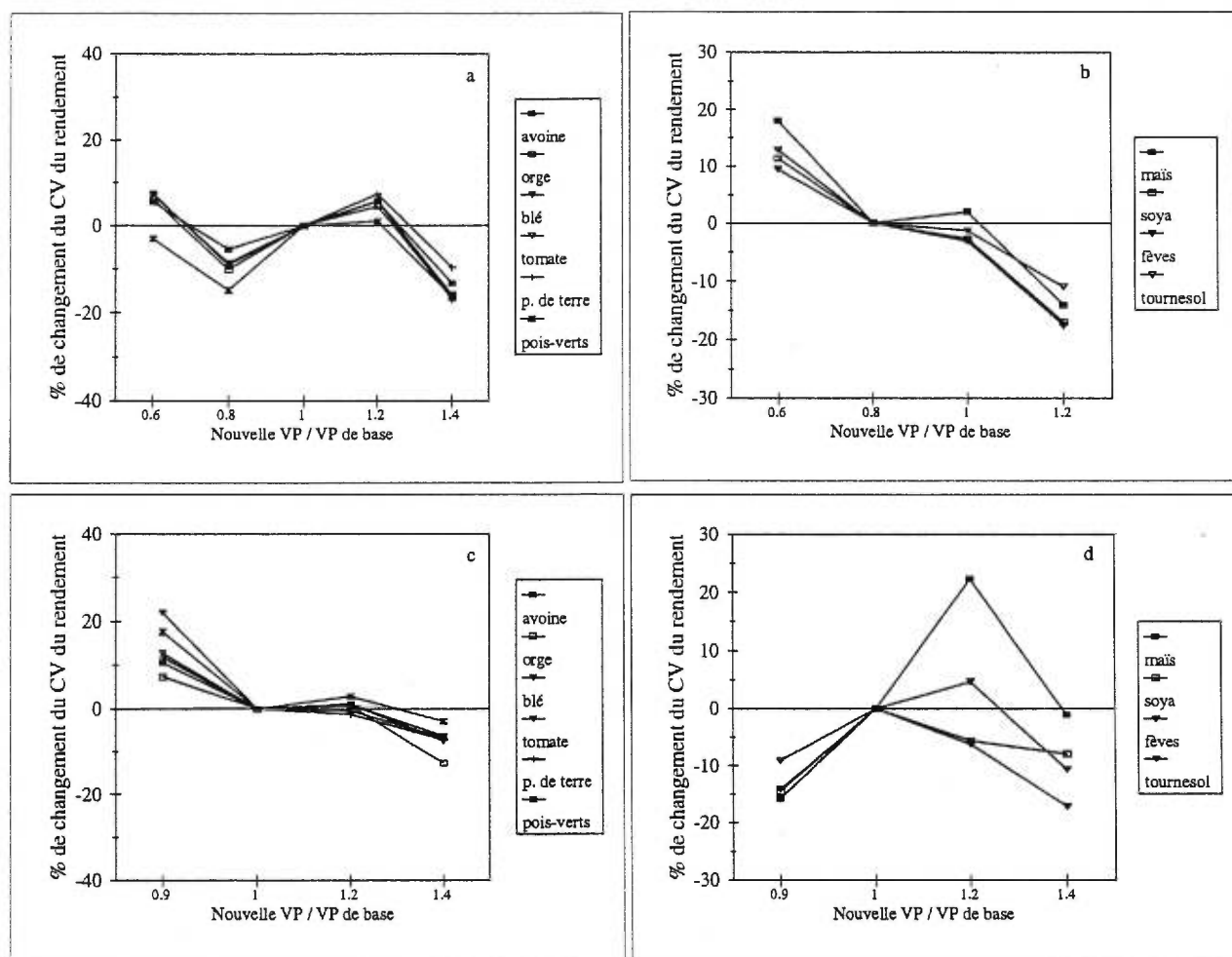


Figure 5.16: Changement relatif du CV des rendements, à Montréal, en réponse au changement de VP, combiné avec une diminution, de 20%, des précipitations moyennes.

a, b : le changement de VP est effectué à travers l'altération de β et de π .

c, d : le changement de VP est effectué à travers l'altération de d .

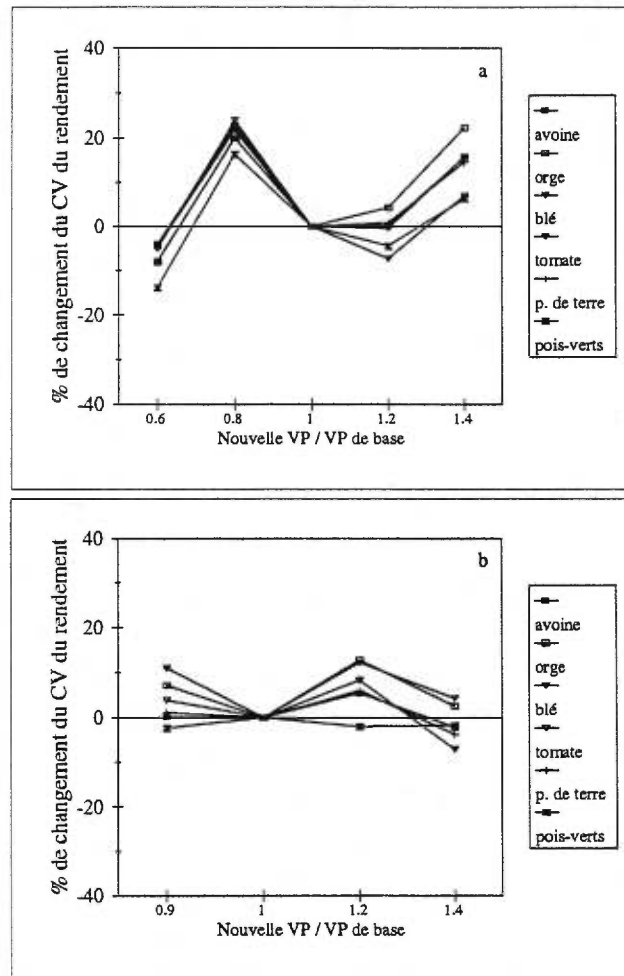


Figure 5.17: Changement relatif du CV des rendements, à Québec, en réponse au changement de VP, combiné avec une augmentation, de 20%, des précipitations moyennes.

a : le changement de VP est effectué à travers l'altération de β et de π .

b : le changement de VP est effectué à travers l'altération de d .

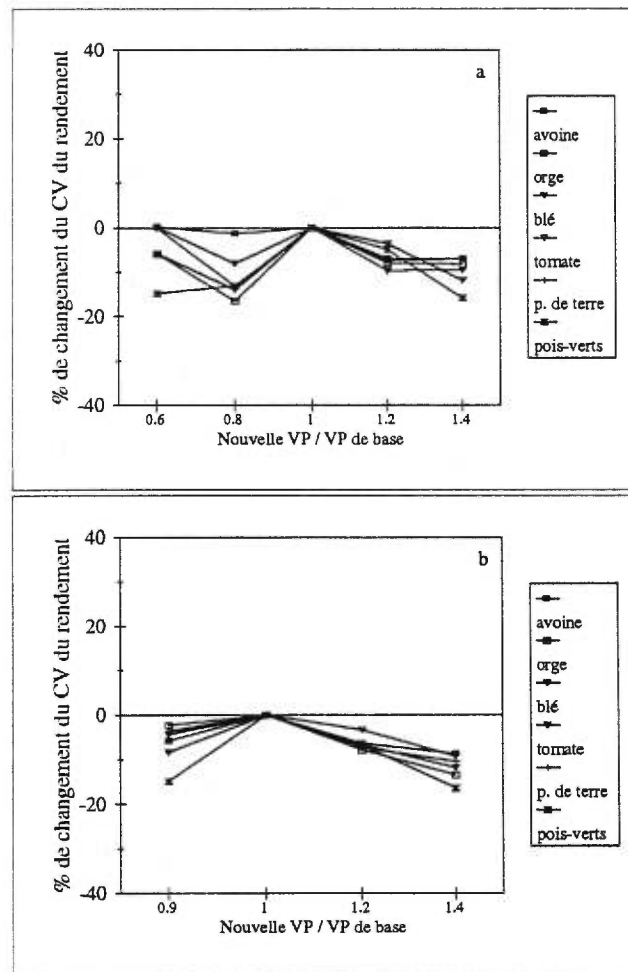


Figure 5.18: Changement relatif du CV des rendements, à Québec, en réponse au changement de VP, combiné avec une diminution, de 20%, des précipitations moyennes.
 a : le changement de VP est effectué à travers l'altération de β et de π .
 b : le changement de VP est effectué à travers l'altération de d .

- *Effets combinés de la diminution de VP et du changement de la moyenne des précipitations*

La diminution de VP, à travers l'altération de β et π , combinée avec l'augmentation des précipitations moyennes, induit une diminution des rendements tant à Montréal qu'à Québec. Le taux de cette diminution est sensiblement le même aux deux sites. Cependant, la diminution de VP, à travers l'altération de β et π , en conjonction avec une augmentation des précipitations moyennes induit une plus grande diminution des rendements à Montréal qu'à Québec (Figures 5.11a,b et 5.12a). Par ailleurs, particulièrement à Québec, la sensibilité des rendements à la diminution de VP, à travers la diminution de d , est faible (Figures 5.11c,d; 5.12b; 5.13c,d; 5.14b).

Le CV des rendements n'affiche pas de tendance générale et sa variation est comprise entre $\pm 20\%$. Cependant, dans la majorité des cas, le CV augmente lorsque d diminue (Figures 5.15c,d; 5.16b; 5.17c,d; 5.18b).

- *Synthèse*

Les résultats décrits dans les deux précédentes sections montrent que les rendements sont plus sensibles aux changements de VP résultant du changement simultané de la fréquence des jours humides (reliée au paramètre π) et à l'intensité des précipitations (reliée au paramètre β), qu'au changement de VP résultant du changement de la longueur de la période sèche (reliée au paramètre de persistance d). Ces résultats convergent avec ceux de Riha et al. (1996) et Mearns et al. (1997) obtenus en différentes localisations aux États-Unis et dont les conditions climatiques sont différentes de celles de nos deux sites.

La capacité de recharge des sols serait responsable de ces observations. En effet, l'apport d'eau qu'apporte de faibles quantités de précipitations, même si elles se produisent souvent, s'évapore rapidement. La recharge du sol en eau est alors plus difficile que lorsque l'intensité des précipitations est élevée, même si le nombre de jours humides est faible. D'où, la plus faible

sensibilité des rendements à la diminution de VP (à travers l'altération de β et π) à Québec où le sol a une plus faible capacité de rétention de l'eau qu'à Montréal. De plus, il n'est donc pas surprenant de voir que cet effet est plus prononcé, particulièrement à Montréal, lorsque la diminution de VP est combinée avec une diminution de la quantité moyenne de précipitations. Par ailleurs, et comme a été signalé ci-dessus, les valeurs de températures et du rayonnement solaire sont générées par WXGEN selon que le jour de l'année est sec ou humide. De ce fait, la diminution de VP, à travers l'augmentation du nombre de jours humides, provoque une diminution de la quantité de rayonnement solaire générée. Il s'ensuit une diminution du taux de photosynthèse des cultures et donc une diminution de leurs rendements.

5.5.4 Sensibilité des rendements aux changements simultanés de VT et VP

D'une part, l'augmentation simultanée de VT et VP semble avoir un effet additif sur les rendements (Figures 5.19 et 5.20). En effet, l'augmentation de VP (d'un facteur 1,4) tend à éliminer l'effet négatif induit par l'augmentation de VT sur les rendements des cultures C_3 et à augmenter l'effet positif induit sur le rendement du maïs (culture C_4). D'autre part, ces figures montrent aussi que la variation du CV des rendements résultant de l'augmentation simultanée de VT et de VP, peut être plus, ou moins, élevée que celle qu'on obtient lorsqu'on augmente seulement VT.

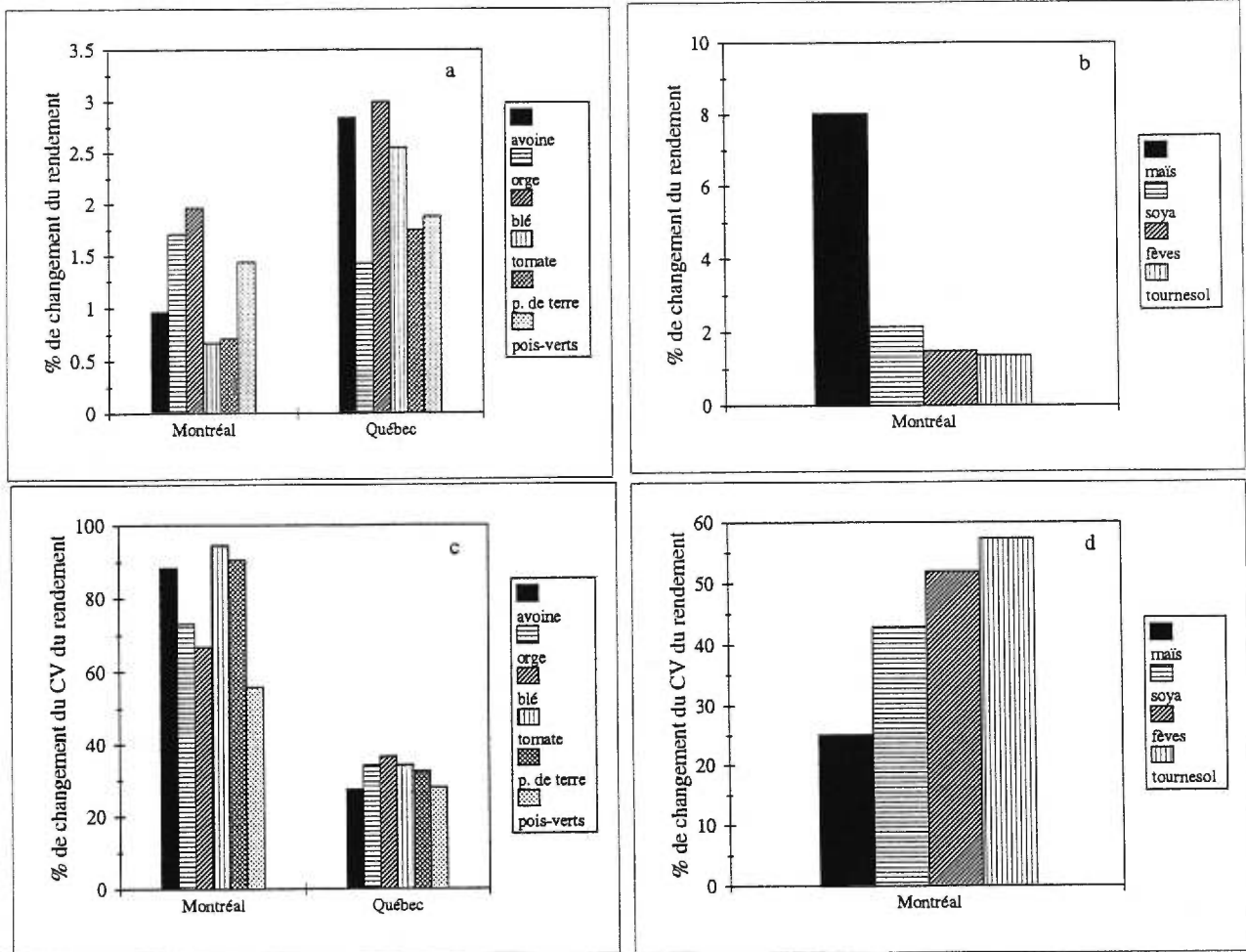


Figure 5.19: Changements relatifs, du rendement moyen et de son CV, en réponse aux effets combinés de l'augmentation de la température par 2°C et de VT, et de l'augmentation des précipitations par 20% et de VP.

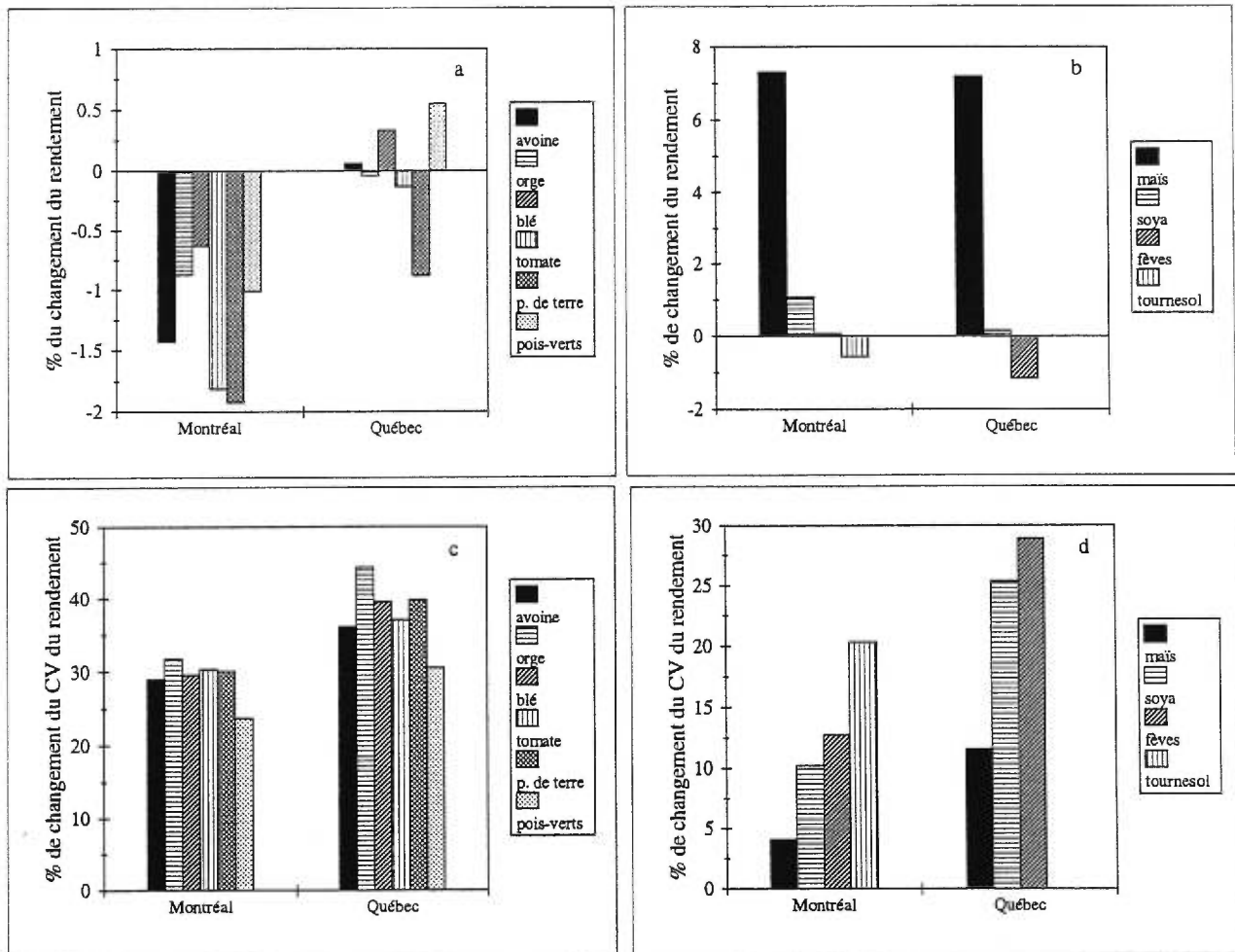


Figure 5.20: Changements relatifs, du rendement moyen et de son CV, en réponse aux effets combinés de l'augmentation de la température par 4°C et de VT, et de l'augmentation des précipitations par 20% et de VP.

Chapitre VI

CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Un modèle de culture, CYSS, a été développé dans le cadre de cette étude. Sa plus grande originalité réside dans le fait qu'il permet de simuler, en un pas de temps journalier, la réponse d'un grand nombre de cultures C₃ et C₄ aux changements, à la fois du climat et de la concentration ambiante du CO₂ d'une manière dynamique. Durant le processus de simulation, CYSS tient compte de la compétition CO₂/O₂, CO₂-éclairage/Température et la réponse de la résistance stomatique à l'augmentation du CO₂ ambiant. D'où un avantage considérable sur des modèles de cultures très utilisés actuellement tels que EPIC (Sharlpey et Williams) et SUCROS (Spitters et al., 1998) qui à l'instar de CYSS permettent la simulation des rendements de plusieurs cultures. Par ailleurs, ce modèle peut être considéré comme une nouvelle méthodologie canadienne, qui s'appuie sur les informations les plus récentes dans le domaine de la modélisation.

La performance de CYSS, comparée à celle de la méthodologie canadienne existante actuellement (modèle FAOm; Stewart 1983) est nettement meilleure. Les résultats obtenus montrent que d'une part, le changement du climat projeté par le CCC-MCG pourrait avoir un effet négatif sur toutes les cultures étudiées, dans toutes les régions agricoles du Québec. D'autre part, l'augmentation de la température, même accompagnée d'une augmentation importante des précipitations (30%), induirait un effet négatif sur les rendements des cultures dans la quasi-totalité des douze régions agricoles. On constate aussi que la stimulation de la photosynthèse et la réduction de l'évapotranspiration qu'induirait une augmentation du CO₂ atmosphérique pourraient n'avoir qu'un effet mineur sur les rendements des cultures étudiées et ne feront qu'atténuer, et non éliminer, l'effet négatif dû à la hausse de la température. Ce résultat confirme, d'une part, certaines observations déduites à partir de mesures effectuées au champ (Sinha, 1992; Mooney et Koch, 1994) et rejette par le fait même les résultats obtenus à partir de nombreux travaux réalisés sous des conditions environnementales contrôlées (e.g. Kimball, 1983). D'autre part, il nous introduit

aussi à une autre problématique, à savoir que l'effet positif du CO₂ sur les cultures (qui ne dépasse pas 5% d'après nos résultats) ne conduirait pas forcément à une diminution importante de l'utilisation de l'eau par irrigation. Par ailleurs, selon que la simulation des effets, direct et indirect, de la hausse du CO₂ atmosphérique sur les rendements est faite à l'aide de CYSS ou de FAOm, les résultats diffèrent considérablement, confirmant ainsi l'idée selon laquelle l'estimation de ces effets sur les rendements doit être faite à partir de modèles aussi dynamiques que possible.

À l'instar de tous les modèles de cultures, CYSS comporte certaines limitations dont la plus importante réside dans le fait qu'il ne tient pas compte de la répartition du carbone vers les différents organes de la plante, au fur et à mesure que la plante croît. Certains modélisateurs (e.g., Spitters et al., 1989) ont utilisé des formulations empiriques pour tenir compte de ce processus. Toutefois, comme il a été reporté par Whisler et al. (1986), il y a déjà plus de dix ans, et Lawlor et Michell (1991), nous ignorons encore les processus impliqués dans ce mécanisme. Ces processus peuvent d'ailleurs varier d'une variété à l'autre pour une même culture. En plus, à notre connaissance, aucune recherche récente n'a permis d'élucider ce problème. Il s'ensuit qu'à notre avis, l'intégration de ce mécanisme dans les modèles de culture, en regard des connaissances actuelles, demeure hautement spéculative. Les résultats obtenus montrent aussi que l'accélération du temps de maturation pourrait avoir un effet très important sur les rendements des cultures étudiées. Par ailleurs, les expériences de Mooney et Koch (1994) ont montré que les cultures développent le rendement plus rapidement lorsqu'elles croissent sous des concentrations de CO₂ plus élevées que la concentration atmosphérique actuelle. Cependant, CYSS (comme tous les modèles de cultures qui existent actuellement) ne tient pas compte de l'effet de l'augmentation du CO₂ atmosphérique sur le temps de maturation. D'où, une autre limitation de ce modèle.

Concernant, la variabilité climatique interannuelle, les résultats montrent que l'augmentation de VT pourrait avoir un effet négatif et que l'augmentation de VP pourrait avoir un effet positif sur les rendements. Concernant l'effet de VT sur les rendements, ces résultats s'accordent avec ceux obtenus par d'autres chercheurs (Semenov et Porter, 1995; Riha et al., 1996; Mearns et al. 1997) suite à leurs travaux effectués sur des régions avec différents climats.

En ce qui concerne l'effet de VP, il semble que les rendements sont plus affectés par le changement de l'intensité et de la fréquence des précipitations que par celui de la longueur des périodes sèches. Par ailleurs, le taux de variation des rendements suite au changement simultané de VT et VP pourrait être équivalent à la somme des taux de variation qui résultent du changement séparé de VT et de VP. Les conditions de température durant la saison de croissance, de l'humidité du sol et de l'intensité du rayonnement solaire générée semblent être les principaux facteurs responsables de ces effets.

Toutefois, alors que l'augmentation de VT et de VP induisent un effet relativement faible sur les rendements moyens, le CV de ces rendements pourrait augmenter considérablement en réponse à l'augmentation de VT. Ceci est donc de nature à augmenter la fréquence des années où la production agricole est faible. Ce qui démontre qu'il est plus approprié d'évaluer le risque associé aux changements climatiques en se basant sur des études qui tiennent compte de l'effet combiné du changement de la moyenne et de la variabilité interannuelle du climat que sur les études où seulement le changement de la moyenne des variables climatiques est considéré. Il est important de souligner ici que WXGEN ne reproduit pas la structure d'autocorrélation des variables en des échelles temporelles interannuelles. De ce fait, l'un des aspects très important du changement de la variabilité climatique dont notre méthode d'analyse ne tient pas compte est le changement de la persistance des événements interannuels importants comme El Niño et La Niña.

Par ailleurs, la reproduction des statistiques des variables climatiques (surtout celles des précipitations) par les MCG actuels, à l'échelle régionale, est faible (Mearns et al., 1990; Gordon et al., 1992; Gregory et Mitchell, 1995). Nous sommes donc dépendants des GDM pour une représentation réaliste de la variabilité des principales variables climatiques dont nous avons besoin comme intrants pour les modèles de cultures. Cette étude, comme celle de Wallis et Griffiths (1995), a montré que malgré la robustesse de WXGEN (Hutchinson, 1991) et la recommandation de Hayhoe et Stewart (1996) incitant à l'utilisation de WXGEN plutôt qu'un autre modèle stochastique pour simuler les conditions climatiques canadiennes, ce GDM comporte certaines faiblesses qui peuvent être attribuées en partie à l'utilisation exclusive de la

chaîne de Markov du 1^{er} ordre. Ainsi, mis à part les limitations des modèles de cultures, la fiabilité des résultats obtenus à partir du couplage de ces derniers avec les GDM est étroitement liée à la capacité des GDM à reproduire correctement la variabilité climatique observée.

À la lumière de ces conclusions, plusieurs recommandations peuvent être émises:

- la nécessité d'améliorer nos connaissances du mécanisme de répartition du carbone vers les différents organes de la plante;
- vu l'importance du temps de maturation sur les rendements des cultures, il s'avère primordial d'inclure l'effet de la hausse de la concentration du CO₂ atmosphérique sur le temps de maturation;
- la nécessité de baser nos analyses à partir de simulations faites par des modèles de cultures aussi dynamiques que possible;
- jusqu'à présent, à quel type de climat on serait affronter demeure encore vague et très incertain. Cependant, cette étude a montré qu'il est primordial de tenir compte de l'effet du changement de la variabilité climatique interannuelle sur les rendements pour améliorer les projections futures et donc les modèles d'adaptation agricole. Un effort de recherche dans cette direction devrait être entrepris pour améliorer et affiner nos méthodes d'analyse;
- ce dernier point implique la nécessité de développer des générateurs de données météorologiques aussi fiables que possible;
- les résultats obtenus ici montrent incontestablement la fiabilité de CYSS à reproduire les rendements observés de plusieurs cultures (C₃ et C₄) au Québec. Il serait très intéressant de tester sa validité en d'autres régions au monde et sous d'autres régimes climatiques (régions tropicales entre autre);
- enfin, une recommandation très importante consiste à comparer des simulations CYSS avec des simulations de d'autres modèles de cultures dynamiques, dans le but de détecter les améliorations possibles que l'on peut introduire dans CYSS comme dans les autres modèles de cultures.

RÉFÉRENCES

- Acock, B.C., 1990. Effects of carbon dioxide on photosynthesis, plant growth and other processes. In: Impacts of carbon dioxide, trace gases, and climate change on global agriculture. American Society of Agronomy, Special Publication No. 53, Madison, USA, pp. 45-60.
- Acock, B.C., 1991. Modeling canopy photosynthetic response to carbon dioxide, light interception, temperature, and leaf traits. In: Modeling crop photosynthesis-From Biochemistry to canopy, ed. K.J. Boote & R.S. Loomis. CSSA special publication 19, pp. 41-56.
- Acock, B. and L.H. Allen, 1985. Crop response to elevated carbon dioxide concentration. In B.R. Strain and J.D. Cure (eds.), Direct Effects of Increasing Carbon Dioxide on Vegetation. USDE, DOE/ER-0238, Washington, DC. pp. 53-98.
- Acock, B., D.A. Charles-Edwards, D.J. Fitter, D.W. Hund, L.J. Ludwig, J.W. Wilson and A.C. Witters, 1978. The contribution of leaves from different levels within a tomato crop to canopy net photosynthesis: Experimental examination of two canopy models. *J. Exp. Bot.*, 29: 815-827.
- Allen, L.H., P. Jones, J.W. Jones, 1985. Rising atmospheric CO₂ and evapotranspiration. Proc. Natl. Conf. on Advances in Evapotranspiration, Chicago, IL, 16-17 December. ASAE, St-Joseph, MI, pp. 13-27.
- Allen, R.G., M.E. Jensen, J.L. Wright, and R.D. Burman, 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agron. J.*, 81: 650-662.
- Avaste, O., H. Moldau et K.S. Shifrice, 1962. Distribution spectrale des rayonnements direct et diffus. *Akad. Navk. Est. S.S.R.. Inst. Phys. Astron.*, 3: 44-57.
- Baier, W., 1977. Crop-Weather models and their use in yield assessment, WMO Tech. Note No. 151, Geneva, WMO.
- Baier, W., J.A. Dyer and W.R. Sharp, 1979. The versatile soil moisture budget. Tech. Bull. 87. Agr. Canada, Agrometeorology Section, Land Resources Research Institute, Ottawa, Ontario. 52pp.

- Baker, D.N., J.D. Hesketh and W.G. Duncan, 1972. Simulation of growth in apple fruits. I. Cell size, cell number and fruit development. *Aust. J. Sci. Res.*, 4:75-91.
- Barnola, J.M., D. Raynaud, Y.S. Korotkevitch and C. Lorius, 1987. Vostok ice core: A 160,000 year record of atmospheric CO₂. *Nature*, 329: 408-414.
- Biscoe, P.V. and J.N. Gallagher, 1977. Weather, dry matter production and yield. In J.J. Landsberg and C.V. Cutting (eds.), *Environmental effects on crop physiology*. Academic Press, London. pp. 75-100.
- Biscoe, P.V., R.K. Scott and J.L. Monteith, 1975. Barley and its environment. III. Carbon budget of the stand. *J. Appl. Ecol.*, 12: 269-293.
- Blain, R., P. Keddie, and B. Smith, 1995. Corn hybrid selection under variable climate conditions: A case study in Southern Ontario. Department of Geography, Guelph University, Occasional Paper No. 22, 39 pp.
- Bootsma, A., W.J. Blackburn, R.B. Stewart, R.W. Muma and J. Dumanski, 1984. Possible effects of climatic change on estimated crop yields in Canada. Research Branch, Agriculture Canada, Technical Bulletin 1984-9E, 26pp.
- Brooks, C.E.P., 1943. Interpolation tables for daily values of meteorological elements. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 69(300): 160-162.
- Brown, D.M., 1978. Heat units for corn in Southern Ontario. Ontario Ministry of Agriculture and Food, Agdex 111, pp. 4.
- Brunt, D., 1932. Notes on radiation in the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 58:389-420.
- Bryant, C., P. André, D. Provençal, B. Singh, J-P. Thouez et M. El Maayar, 1997. L'adaptation agricole aux changements climatiques: Le cas du Québec. *Le Climat*, 14(2): 81-97.
- Burman, R.D., M.E. Jensen and R.G. Allen, 1987. Thermodynamic factors in evapotranspiration. In : D. Hillel (ed.), *Advances in Irrigation*, Vol. 2, Academic Press, New York, 335 pp.
- Burman, R. and L.O. Pochop, 1994. *Evaporation, evapotranspiration and climatic data*. Elsevier, 278 pp.
- Campbell, G.S., 1977. *An introduction to environmental biophysics*. Springer-Verlag, New York, 159 pp.
- Carlson, R.W. and F.A. Bazzaz, 1980. The effects of elevated CO₂ concentrations on growth,

- photosynthesis, transpiration, and water use efficiency of plants. In: J. Singhjag and A. Deepak (Eds.), Proceedings Symposium on Environmental and Climatic Impacts of Coal Utilisation. Academic Press, New York, pp. 609-612.
- Charles-Edwards, D.A., 1981. The mathematics of photosynthesis and productivity. Academic Press, New York, 126 pp.
- Chin, E.H., 1977. Modelling daily precipitation occurrence process with Markov chain. *Water Res. Res.*, 13:949-956.
- Conroy, J.P., S. Seneweera, A.S. Basra, G. Rogers and B.N. Wooller, 1994. Influence of rising atmospheric CO₂ concentrations and temperature on growth, yield and grain quality of cereal crops. *Aust. J. Plant Physiol.*, 21: 741-758.
- Cure, J.D. and B. Acock, 1986. Crop responses to carbon dioxide doubling: a literature survey. *Agric. For. Meteorol.*, 38: 127-145.
- Dilley, A.C., 1968. On the computer calculation of vapor pressure and specific humidity gradients from psychrometric data. Australia CSIRO, Division of meteorological physics. *J. Appl. Meteor.*, 7 : 717-719.
- Doorenbos, J. and A.H. Kassam, 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage, Paper 33. FAO, Rome, 193 pp.
- Doorenbos, J. and W.O. Pruitt, 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage, Paper 24 (Rev.). Rome. 156 pp.
- Dracke, B., 1992. A field study of the effects of elevated CO₂ on ecosystem processes in a Chesapeake Bay wetland. *Aust. J. Bot.*, 40: 579-595.
- Dumanski, J. and R.B. Stewart, 1983. Crop production potentials for land evaluation in Canada. Research Branch, Agriculture Canada, Contribution 198-13E, Ottawa, 80 pp.
- Dyer, J.A., W. Baier, H.N. Hayhoe and G. Fisher, 1978. Spring field workday probabilities for selected sites across Canada. Technical Bulletin 86, Agriculture Canada, Agrometeorological Section, Land Res. Res. Institute, Ottawa, Canada, 17 pp.
- Edwards, G.E. and D.A. Walker, 1983. C₃, C₄: Mechanisms, and cellular and environmental regulation. University of California Press, Berkeley, 542 pp.
- Ehleringer, J.R., 1978. Implications of quantum yield differences on the distributions of C₃ and C₄

- grasses. *Oecologia* (Berl.) 31: 255-267.
- Ehleringer, J. and O. Bjorkman, 1977. Quantum yields for CO₂ uptake in C₃ and C₄ plants: dependence on temperature, CO₂ and O₂ concentration. *Plant Physiol.*, 59: 86-90.
- Ehleringer, J. and R.W. Pearcy, 1983. Variation in quantum yield for CO₂ uptake among C₃ and C₄ plants. *Plant Physiol.*, 73: 555-559.
- El Maayar, M., 1998. Modelling crop yield and growth responses to changing climate and atmospheric CO₂ concentration: Description and validation of CYSS, a new version of the Canadian methodology. *Soumis à Agricultural Systems*.
- El Maayar, M. and B. Singh, 1996. Irrigation needs and scheduling under climatic change scenario. Proceedings of the ASAE International Evapotranspiration and Irrigation Scheduling Conference. San Antonio 4-6 November 1996, pp. 566-571.
- El Maayar, M., B. Singh and P. André, 1998. Crop yield sensitivity to interannual climatic variability. *Soumis à Agricultural systems*.
- El Maayar, M., B. Singh, P. André, C.R. Bryant and J-P. Thouez, 1997. The effects of climatic change and CO₂ fertilisation on agriculture in Québec. *Agric. For. Meteorol.*, 85: 193-208.
- Environnement Canada, 1993. Normales climatiques au Québec. Service de l'environnement Atmosphérique, 157pp.
- FAO, 1978. Report on the agro-ecological zones project: vol. 1. Methodology and results for Africa. World Soil Resources Report, Paper 48, FAO, Rome, 158 pp.
- Farquhar, G.D., S. van Caemmerer and J.A. Berry, 1980. A biochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species. *Planta*, 149: 78-90.
- Ford, M.A. and G.N. Thorne, 1967. Effects of CO₂ concentration on growth of sugar-beet, barley, kale, and maize. *Ann. Bot.*, 31: 632-644.
- Fortin, A., 1995. Analyse numérique pour ingénieurs. Editions de l'École Polytechnique de Montréal, 448 pp.
- Gifford, R.M., 1977. Growth pattern, carbon dioxide exchange and dry weight distribution in wheat growing under differing synthetic environments. *Aust. J. Plant Physiol.*, 4: 99-110.
- Gifford, R.M., 1989. Direct effects of higher carbon dioxide concentrations on vegetation. In: G.I. Pearman (editor), *Greenhouse: Planning for Climate Change*. CSIRO, Australia, pp. 506-

519.

- Gifford, R.M., 1994. The global carbon cycle: a viewpoint on the missing sink. *Aust. J. Plant Physiol.*, 21:1-15.
- Gordon, H.B., P.H. Whetton, A.B. Pittock, A.M. Fowler and M.R. Haylock, 1992. Simulated changes in Daily rainfall events. *Clim. dynamics*, 7: 83-102.
- Gregory, J.M. and J.F.B. Mitchell, 1995. Simulation of daily variability of surface temperature and precipitation over Europe in the current and 2xCO₂ climates using the UKMO climate model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 121: 1451-1476.
- Goudriaan, J., 1977. Crop micrometeorology: a simulation study. Simulation monographs, PUDOC, Wageningen. 257pp.
- Goudriaan, J., 1986. A simple and fast numerical method for the computation of daily totals of crop photosynthesis. *Agric. For. Meteorol.*, 38: 249-254.
- Goudriaan, J., H.H. van Laar, H. van Keulen and W. Louwse, 1985. Photosynthesis, CO₂ and plant production. In W. Day and R.K. Atkin (eds.): *Wheat Growth and Modelling*. NATO ASI Series, Series A: Life Sciences, Vol. 86. Plenum Press, New York, pp. 107-122.
- Goudriaan, J. and M.H. Unsworth, 1990. Implications of increasing carbon dioxide and climate change for agricultural productivity and water resources. In: *Impacts of carbon dioxide, trace gases, and climate change on global agriculture*. American Society of Agronomy, Special Publication No. 53, Madison, USA, pp. 111-130.
- Goudriaan, J. and J.C. Zadoks, 1995. Global climate change: Modelling the potential responses of agro-ecosystems with special reference to crop protection. *Environ. Pollution*, 87: 215-224.
- Grotch, S.L., 1988. Regional intercomparisons of general circulation model predictions and historical climate data. U. S. Department of energy report #DOE/NBB-0084. Washington, DC.
- Grotch, S.L. and M.C. McCracken, 1991. The use of general circulation models to predict regional climatic change. *J. Climate*, 4: 286-303.
- Hansen, J., I. Fung, R.D. Lacis, R.G. Rind, S. Lebedeff, R. Ruedy and P. Stone, 1988. Global climate change as forecast by the GISS 3-D model. *J. Geophys. Res.*, 93(D8): 9341-9364.
- Hansen, J., Mki. Sato, J. Glascoe, and R. Ruedy, 1998. A common sense climate index: Is climate changing noticeably? *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 95: 4113-4120.

- Hanson, C.L., K.A. Cumming, D.A. Woolhiser and C.W. Richardson, 1994. Microcomputer program for daily weather simulation in the contiguous United States. USDA, Agricultural research Service, ARS-114, 38 pp.
- Hayhoe, H.N. and D.N. Stewart, 1996. Evaluation of CLIGEN and WXGEN weather data generators under canadian conditions. *Can. Water Res. J.*, 21(1): 53-67.
- Houghton, J.T., G.T. Jenkins and J.J. Ephraums, (1990). Climate change: the IPCC scientific assessment, Cambridge University Press, Cambridge, 364 pp.
- Houghton, J.T., L.G. Meira Filho, J. Bruce, L. Hoesung, B.A. Callender, E. Haites, N. Harris and K. Maskell, 1995. Climate Change 1994, Radiative forcing of climate change: The 1994 report of the scientific assessment working group of the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, 339 pp.
- Hunt, L.A., 1991. Applications of crop modelling to quantify and reduce climatic risk. Proceedings of a symposium/workshop on changing climate in relation to sustainable agriculture, July 29-30, Fredericton, New Brunswick, pp. 69-84
- Hutchinson, M.F., 1991. Climatic analysis in data sparse regions. In: R.C. Muchow and J.A. Bellamy (Eds.), Climatic Risk in Crop Production: Models and Management for the Semiarid Tropics and Subtropics. CAB International, Wallingford, pp. 55-73.
- Idso, S., 1990. The carbon dioxide/trace gas greenhouse effect: greatly overestimated? In: Impacts of carbon dioxide, trace gases, and climate change on global agriculture. American Society of Agronomy, Special Publication No. 53, Madison, USA, pp. 19-26.
- Idso, K.E. and S.B. Idso, 1994. Plant responses to atmospheric CO₂ enrichment in the face of environmental constraints: a review of the past 10 year's research. *Agric. For. meteorol.*, 69: 153-203.
- Idso, S.B. and R.D., Jackson, 1969. Simulation of salt cedar evapo-transpiration. *J. Geophys.Res.*, 74: 5397-5403.
- Jäger, J. and H.L. Ferguson, 1990. Climate change: Science, Impacts and Policy. Proceedings of the second world climate conference. Cambridge University Press, Cambridge. 578 pp.
- Jaeger, J., 1988. Developing policies for responding to climatic change. World climate impact studies programme, WCIP-1 Geneva: World Meteorological Organization and United Nations

Environment Programme.

- Jones, H.G., 1983. Plants and microclimates. A quantitative approach to environmental plant physiology. Cambridge University Press, Cambridge, 323 pp.
- Kase, M. and J. Catsky, 1984. Maintenance and growth components of dark respiration rate in leaves of C₃ and C₄ plants as affected by leaf temperature. *Biologia Plantarum*, 26:461-270.
- Katz, M., A. Baille and M. Mermier, 1981. Influence de la masse d'air et du trouble atmosphérique sur le rayonnement direct photosynthétiquement actif reçu au sol. *Agronomie*, 1(5): 359-364.
- Katz, R.W. and B.G. Brown, 1992. Extreme events in a changing climate: variability is more important than averages. *Clim. Change*, 21: 289-302.
- Kimball, B.A., 1983. Carbon dioxide and agricultural yield: an assemblage and analysis of 430 prior observations. *Agron. J.*, 75: 633-637.
- Kincaid, D.C. and D.F. Heermann, 1974. Scheduling irrigations using a programmable calculator, USDA, ARS-NC-12.
- Körner, C.H., J.H. Scheel and H. Bauer, 1979. Maximum leaf diffusive conductance in vascular plants. *Photosynthetica*, 13(1): 45-82.
- Lambers, H., 1984. Respiration in intact plants and tissues: Its regulation and dependence on environmental factors, metabolism and invaded organisms. In: Douce, R. and D.A. Day (eds.), *Encyclopaedia of plant physiology, New Series, Vol. 18, 'Higher Plant Cell Respiration'*. Berlin, Springer-Verlag, pp. 418-473.
- Lane, L.J. and M.A. Nearing, 1989. Water Erosion Prediction Project land-scape profile model documentation. NSERL Rep. 2. Natl. Soil Erosion Res. Lab., USDA-ARS, Purdue University, West Lafayette, IN.
- Lawlor, D.W. and R.A.C. Mitchell, 1991. The effects of increasing CO₂ on crop photosynthesis and crop productivity: a review of field studies. *Plant, Cell and Environ.*, 14: 807-818.
- Leverenz, J.W. and G. Öquist, 1987. Quantum yields of photosynthesis at temperatures between -2°C and 35°C in a cold-tolerant C₃ plant (*Pinus sylvestris*) during the course of one year. *Plant, Cell and Environ.*, 10: 287-295.
- Le Québec, 1995. Statistique, 60^e éditions. Les publications du Québec, 819pp.

- Long, S.P., 1991. Modification of the response of photosynthetic productivity to rising temperature by atmospheric CO₂ concentrations: Has its importance been underestimated?. *Plant, Cell and Environ.*, 14: 729-739.
- Lorius, C., 1991. Climat et gaz à effet de serre: les données des archives glaciaires. CR. Acad. Sci., *La vie des Sciences*, 8: 107-124.
- Louie, P.Y.T., 1993. Global warming scenarios from general circulation models (GCM). In: Water Level Forecasting and Frequency Analysis, Supporting Documents: Vol.1: Water Supply Scenarios, Task Group 2, Working Committee 3, Paper No. 7.
- Madsen, E., 1974. Effects of CO₂ concentration on growth and fruit production of tomato plants. *Acta Agric. Scand.*, 24: 242-246.
- Maron, M.J. and R.J. Lopez, 1991. Numerical analysis. Third edition, Wadsworth Publishing Company, 743 pp.
- Maytín, C.E., M.F. Acevedo, R. Jaimez, R. Anderson, M.A. Harwell, A. Robock and A. Azocar, 1995. Potential effects of global climatic change on the phenology and yield of maize in Venezuela. *Clim. Change*, 29: 189-211.
- McCree, K.J., 1970. An equation for the rate of dark respiration of white clover plants grown under controlled conditions. In: I. Setlik (ed.), Prediction and measurement of photosynthetic productivity. PUDOC, Wageningen, pp. 221-229.
- McCree, K.J., 1972. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric. Meteorol.*, 9: 191-216.
- McCree, K.J., 1974. Equations for the rate of dark respiration of white clover and grain sorghum as functions of dry weight, photosynthetic rate and temperature. *Crop Sci.*, 14: 509-514.
- Mearns, L.O., S.H. Schneider, S.L. Thompson and L.R. McDaniel, 1990. Analysis of climate variability in general circulation models: Comparison with observations and changes in variability in 2xCO₂ experiments. *J. Geophys.Res.*, D95: 20469-20490.
- Mearns, L.O., C. Rosenzweig and R. Goldberg, 1996. The effect of changes in daily and interannual variability on CERES-Wheat: A sensitivity study. *Clim. Change*, 32: 257-292.
- Mearns, L.O., C. Rosenzweig and R. Goldberg, 1997. Mean and variance change in climate scenarios: Methods, agricultural applications, and measures of uncertainty. *Clim. Change*, 35:

- 367-396.
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biol.*, 29: 205-234.
- Monteith, J.L., 1973. Principles of environmental physics. Edward Arnold, London, 241pp.
- Monteith, J.L. and M.H. Unsworth, 1990. Principles of environmental physics. Edward Arnolds, 2nd edition, 291 pp.
- Mooney, H.A. and G.W. Kock, 1994. The impact of rising CO₂ concentration on the terrestrial biosphere. *Ambio*, 23(1): 74-76.
- Morison, J.I.L., 1985. Intercellular CO₂ concentration and stomatal response to CO₂. In: Zeiger, E., I. Cowan and G.D. Farquhar (eds.), Stomatal functions. Stanford, Stanford University Press, pp. 229-251.
- Mortsch, L.D. and F.H. Quinn, 1996. Climate change scenarios for Great Lakes Basin ecosystem studies. *Limnol. Oceanography*, 41(5): 903-911.
- Newell, R.E. and T.G. Doplick, 1979. Questions concerning the possible influence of anthropogenic CO₂ on atmospheric temperature. *J. Appl. Meteorol.*, 18: 822-825.
- Nicks, A.D. and J.F. Harp, 1980. Stochastic generation of temperature and solar radiation data. *J. Hydrology*, 48 : 1-17.
- Nonhebel, S., 1994. The effects of use of average instead of daily weather data in crop growth simulation models. *Agric. Systems*, 44: 377-396.
- Nonhebel, S., 1996. Effects of temperature rise and increase in CO₂ concentration on simulated wheat yields in Europe. *Clim. Change*, 34: 73-90.
- Okamoto, K., T. Ogiwara, T. Yoshizumi and Y. Watanabe, 1991. Influence of the greenhouse effect on yields of wheat, soybean and corn in the United State for different energy scenarios. *Clim. Change*, 18: 397-424.
- Parry, M.L. and T.R. Carter, 1988. The assessment of effects of climate variations on agriculture: aims, methods and summary of results. In: Parry, M.L., T.R. Carter and N.T. Konijn (eds.), The Impacts of Climate Variations on Agriculture. V. 1, Reidel Publications Co., Dordrecht.
- Patterson, D.T., and E.P. Flint, 1980. Potential effect of global atmospheric CO₂ enrichment on the growth and competeveness of C₃ and C₄ weed and crop plants. *Weed Sci.*, 28-71-75.
- Pearcy, R.W. and J. Ehleringer, 1984. Comparative ecophysiology of C₃ and C₄ plants. *Plant*

Cell. Environ., 7: 1-13.

- Peart, R.M., J.W. Jones, R.B. Curry, K. Boote and L.H. Allen, 1989. Impact of climate change on crop yield in the southeastern U.S.A, a Simulation study. In: Smith, J.B. and D.A. Tirpak (eds.), *The Potential Effects of Global Climate Change in the United States*, Vol. 1, EPA.
- Penning de Vries, F.W.T., 1972. Respiration and growth. In: *Crop processes and controlled environments*. eds. A.R. Rees, K.E. Cockshull, D.W. Hand and R.G. Hurd, 327-347. Academic Press, London and New York.
- Penning de Vries, F.W.T. and H.H. van Laar, 1982 Simulation of growth processes and the model BACROS. In: F.W.T. Penning de Vries and H.H. van Laar (eds.), *Simulation of plant growth and crop production*. Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen. pp. 114-135.
- Penning de Vries, F. W. T., D. M. Jansen, H. F. M. Ten Berge and A. Bakema, 1989. Simulation of ecophysiological process of growth in several annual crops. Pudoc, Wageningen.
- Phillips, D.A., K.D. Newell, S.A. Hassel and C.E. Felling, 1976. The effects of CO₂ enrichment on root nodule development and symbiotic N₂ reduction in *Pisum sativus*. *Am. J. Bot.*, 63: 356-362.
- Pocklington, R., 1996. Les tendances des températures dans l'hémisphère nord et ce qu'elles nous disent sur le climat. Forum agricole sur les changements climatiques: Perspectives pour l'agriculture canadienne. Synthèse des comptes rendus. 25-26 Janvier, Toronto, Ontario, pp: 12-13.
- Priestley, C.H.B. and R.J. Taylor, 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale Parameters. *Mon. Weath. Rev.*, 100: 81-92.
- Rana, G., N. Katerji and M. Mastrorilli, 1996. Evapotranspiration measurement of crops under water stress. Proceeding of the ASAE International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, Nov. 3-6, San Antonio, Tx., 691-696.
- Richardson, C.W., 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. *Water Res. Res.*, 17(1): 182-190.
- Riha, S.J., D.S. Wilks and P. Simoens, 1996. Impact of temperature and precipitation variability on crop model predictions. *Clim. Change*, 32: 293-311.
- Riley, J.J. and Hodges, C.N., 1969. Plant responses to CO₂ enrichment: a function of the micro-

- environment. Paper presented at meeting of am. Assoc. Adv. Sci., Colorado Springs, CO, American Association for the Advancement of Science, Washington DC, 7-10 May.
- Ritchie, J.T., 1972. Model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water. Res. Res.*, 8(5): 1204-1213.
- Ritchie, J.T. and B.S. Johnson, 1990. Soil and plant factors affecting evaporation. In: Stewart, B.A. and D.R. Nielsen (eds.), *Irrigation of agricultural crops. Agronomy monograph 30, ASA-CSSA-SSSA, Madison WI, USA*, pp. 363-390.
- Ritchie, J.T. and S. Otter-Nacke, 1985. CERES-Wheat a user oriented wheat yield model. Agristar Publ. Ym-US-04442-JSC-18892. Michigan State University.
- Robertson, G.W., 1968. A biometeorological time scale for cereal crops involving day and night temperatures and photoperiod. *Int. J. Biometeorol.*, 2: 191-223.
- Robertson, G.W., 1983. Guidelines on crop-weather models, WMO World Climate applications Programme, WCP-50, Geneva, WMO.
- Rodgers, H.H., G.E. Bingham, J.D. Cure, J.M. Smith and K.A. Surano, 1983a. Responses of selected plant species to elevated carbon dioxide in the field. *J. Environ. Qual.*, 12: 569-574.
- Rodgers, H.H., J.F. Thomas and G.E. Bingham, 1983b. Response of agronomic and forest species to elevated atmospheric carbon dioxide. *Science*, 220: 428-429.
- Rosenberg, N.J., 1981. The increasing CO₂ concentration and its implication on agricultural productivity I: Effects on photosynthesis, transpiration and water use efficiency. *Clim. Change*, 3: 265-279.
- Rosenzweig, C., 1989. Potential effects of climate change on agricultural production in the great plains: a simulation study. In Smith, J.B. and D.A. Tirpak (eds.), *The Potential Effects of Global Climate Change in the United States, Vol. 1, EPA*.
- Ross, J., 1975. Radiative transfer in plant communities in vegetation and the atmosphere. In: Monteith, J.L. (ed.), *Vol. I, Principles. Academic Press*, pp. 13-55.
- Sadourny, R., 1994. *Le climat de la terre. Flammarion*, 126 pp.
- Saeki, T., 1963. Light relations in plant communities. In: L.T. Evans (ed.), *Environmental control of plant growth. Academic Press, London*, pp. 79-92.
- Sale, P.J.M., 1974. Productivity of vegetable crops in a region of high solar input. III. Carbon

- balance of potato crops. *Aust. J. Plant Physiol.*, 1:283-296.
- Scherrer, B., 1984. *Biostatistiques*. Gaëtan Morin, 850 pp.
- Semenov, M.A. and J.R. Porter, 1995. Climatic variability and the modelling of crop yields. *Agric. For. Meteorol.*, 73: 265-283.
- Sharpley, A.N. and J.R. Williams, 1990. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator. 1. Model Documentation. U.S. Department of Agriculture, Technical Bulletin No. 1768, 235 pp.
- Singh, B., M. El Maayar, P. André, C.R. Bryant and J-P. Thouez, 1998. Impacts of GHG-Induced climate change on crop yields: Effects of water stress maturation time and optimal temperature. *Clim. Change*, 38: 51-86.
- Singh, B. and R.B. Stewart, 1991. Potential impacts of a CO₂ induced-climate change using the GISS scenario on agriculture in Québec, Canada. *Agric. Ecosys. Environ.*, 35: 327-347.
- Sinha, S.K., 1992. Impact of climate change on agriculture: An critical assessment. In Jager, J. and H.L. Ferguson (eds.), *Climate change: science, impacts and policy*. Proceedings of the second world climate conference. pp. 98-107.
- Smith, J.B., and Tirpack, D.A., 1989. The potential effects of global climate change on the United States, U.S., EPA. Report to Congress No. 230-05-61-050, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- Smith, M., R. Allen and L. Pereira, 1996. Revised FAO methodology for crop water requirements. Proceeding of the ASAE International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, Nov. 3-6, San Antonio, Tx., 116-123.
- Spitters, C.J.T., 1986. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implication for modeling canopy photosynthesis. Part II: Calculation of canopy assimilation. *Agric. For. Meteorol.*, 38: 231-242.
- Spitters, C.J.T., D.W.G. van Kraalingen and H. van Keulen, 1989. A simple and universal crop growth simulator: SUCROS87. In Rabbinge, R., S.A. Ward and H.H. van Laar (eds.), *Simulation and Systems Management in Crop Production*, Simulation Monographs, Pudoc, Wageningen, The Netherlands, pp. 145-181.
- Spitters, C.J.T. and Th. Kramer, 1986. Differences between spring wheat cultivars in early growth. *Euphytica*, 35: 273-292.

- Stanhill, G. and M. Fucks, 1977. The relative flux density of photosynthetically active radiation. *J. Appl. Ecol.*, 14: 317-322.
- Stapper, M., 1984. Simtag: a simulation model of wheat genotypes. Model documentation. pp 108. University of New England, Armidale, Australia.
- Statistiques Agricoles, 1992. Statistiques de l'agriculture, des pêches et de l'alimentation. Bureau de la statistique du Québec, Québec, Canada, 202 pages.
- Stewart, R.B., 1983. Modeling methodology for assessing crop production potentials in Canada. Research Branch, Agriculture Canada, Ottawa, Ont., Tech. Bull. 96, 29pp.
- Stewart, R.B., J. Dumanski and D.F. Acton, 1984. Production potential for spring wheat in the Canadian prairies provinces - an estimate. *Agric. Ecosys. Environ.*, 11: 1-14.
- Stockle, C.O., J.R. Williams, N.J. Rosenberg and C.A. Jones, 1992. A method for estimating the direct and climatic effects of rising atmospheric carbon dioxide on growth and yield of crops: Part I - Modification of the EPIC Model for climate change analysis. *Agric. Systems*, 38: 225-238.
- Szeicz, G. and I.F. Long, 1969. Surface resistance of canopies. *Water Res. Res.*, 5: 622-633.
- Taner, C.B. and M. Fuchs, 1968. Evaporation from unsaturated surfaces: A generalized combination method. *J. Geophys. Res.*, 73: 1299-1304.
- Tetens, O., 1930. Über einige meteorologische begriffe. *Z. Geophys.*, No. 6, pp. 297-309.
- Thekaekara, M.P., 1976. Solar radiation measurement: technics and instrumentation. *Sol. Energy*, 18: 309-325.
- Thornley, J.H.M., 1977. Growth, maintenance and respiration: a re-interpretation. *Ann. Bot.*, 41: 1191-1203.
- Thorns, G.N., 1971. Physiological factors limiting the yield of arable crops. In: P.F. Wareing and J.P. Cooper (eds.), Potential crop production - A case study. Heinmann Education Books. pp. 143-158.
- Tognoni, F., A.H. Halevy and S.H. Wittwer, 1967. Growth of bean and tomato plants as affected by root absorbed growth substances and atmospheric carbon dioxide. *Planta*, 72: 43-52.
- Tubiello, F.N., C. Rosenzweig and T. Volk, 1995. Interactions of CO₂, temperature and management practices: Simulations with a modified version of CERES-Wheat. *Agric. Systems*,

- 49: 135-152.
- van Keulen, H. and N.G. Seligman, 1985. Simulation of water use, nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop. Simulation Monographs. Center for agricultural publication and documentation (Pudoc), Wageningen, Netherlands.
- Varlet-Grancher, C., Chartier, M., Gosse, G. et Bonhomme, R., 1981. Rayonnement utile pour la photosynthèse des végétaux en conditions naturelles: caractérisation et variations. *Acta Oecol., Oecol. Plant.*, 2(2): 189-202.
- Varlet-Grancher, C., Gosse, G., Chartier, M., Sinoquet, H., Bonhomme, R. et Allirand, J.M., 1989. Mise au point: rayonnement solaire absorbé et intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, 9: 419-439.
- Waggoner, P.E., 1989. Anticipating the frequency distributions of precipitation if climate change alters its means. *Agric. For. meteorol.*, 47: 321-337.
- Wallis, T.W.R. and J.F. Griffiths, 1995. An assessment of the weather generator (WXGEN) used in the erosion/productivity impact calculator (EPIC). *Agric. For. Meteorol.*, 73: 115-133.
- Watson, D.J., 1971. Size, structure, and activity of the productive system of crops. In: P.F. Wareing and J.P. Cooper (eds.), Potential crop production - A case study. Heinmann Education Books. pp. 76-88.
- Warrick, R.A., R.M. Gifford and M.L. Parry, 1991. CO₂, Climatic Change and Agriculture. Assessing the response of food crops to the direct effects of increased CO₂ and climatic change. In: B. Warrick and D. Jäger (eds.), The greenhouse effect, climatic change and ecosystems. SCOPE 29, John Wiley & Sons, 541 pp.
- Weir, A.H., P.L. Bragg, J.R. Porter and J.H. Rayner, 1984. A winter wheat crop simulation model without water or nutrient limitations. *J. Agric. Sci., Camb.*, 102: 371-382.
- Whisler F.D., B. Acock, D.N. Baker, R.E. Fye, H.F. Hodges, J.R. Lambert, H.E. Lemmon, J.M. McKinion, and V.R. Reddy, 1986. Crop simulation models in agronomic systems. *Adv. in Agronomy*, 40:141-208.
- Wigley, T.M.L. and S.C.B. Raper, 1992. Implications for climate and sea level of revised IPCC emissions scenarios. *Nature*, 293-300.
- Wilks, D.S., 1992. Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies.

- Clim. Change*, 22: 67-84.
- Wilks, D.S. and S. Riha, 1996. High- Frequency climatic variability and crop yields. *Clim. Change*, 32: 231-235.
- Williams, G.D.V., 1974. Deriving a biothermal time scale for barley. *J. Biometeorol.*, 18(1): 57-69.
- Williams, J.R., P.T. Dyke, W.W. Fuchs, V.W. Benson, O.W. Rice and E.D. Taylor, 1990. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator. 2. User Manual. U.S. Department of Agriculture, Technical Bulletin No. 1768, 127 pp.
- Wit de, C.T., 1965. Photosynthesis of leaf canopies. Center for Agriculture Publications and Documentation, Wageningen, Agricultural Research Report 663, 57 pp.
- Wit de, C.T. and F.W.T. Penning de Vries, 1982. La synthèse et la simulation des systèmes de production primaire. In: F.W.T. Penning de Vries and M.A. Djitéye (eds.), La production des pâturages sahélien, Agricultural Research Reports 918, Pudoc, Wageningen, 23-25.
- Wolf, J. and C.A. Van Diepen, 1995. effects of climate change on grain maize yield potential in the European community. *Clim. Change*, 29: 299-331.
- Wong, S.C., 1979. Elevated atmospheric partial pressure of CO₂ and plant growth. I: Interactions of nitrogen nutrition and photosynthetic capacity in C₃ and C₄ plants. *Oecologia*, 44: 68-74.
- World Meteorological Organization (WMO), 1979. Proceeding of the world climate conference, Geneva 12-23 February 1979, Geneva, WMO.
- World Meteorological Organization (WMO), 1985. The reliability of Crop-Climate Models for Assessing the Impacts of Climatic Change and Variability. Report of the WMO/UNEP/ICSU-SCOPE expert meeting, Geneva, May 19-24, 1984.
- Viau, A. and C Mitic, 1992. Potential impacts of CO₂-induced climate change using the GISS scenarios on corn yields in the Essex county region of Ontario, Canada. *Climat. Bulletin*, 26(2): 79-105.
- Wright, J.L., 1982. New evaporation crop coefficients. *J. Irrig. Drainage, ASCE*, 108(IR2) : 57-74.

 ANNEXE

Programme CYSS

```

c*****
c
c                               CYSS
c           Fortran code of the Crop Yield Simulation System
c           Program created by Mustapha El Maayar
c
c*****
c lat       : latitude
c long      : longitude
c elev      : elevation
c storag    : water holding capacity
c isoil     : soil type
c si/wp     : soil index/workability factor
c tmean/tmeany : monthly/daily mean temperature
c tmax/tmaxy : monthly/daily maximum temperature
c tmin/tminy  : monthly/daily minimum temperature
c solrad/radia : monthly/daily incident solar radiation
c vpres/vp   : monthly/daily actual vapor pressure
c wind/windy : monthly/daily wind speed
c parm/pard  : monthly/daily photosynthetically active radiation for clear skies
c iend       : given a value when end of file encountered
c*****
c                               Main Program
c           *****
c
c dimension parc(51,12)
c dimension biomas(120),output(11,18),camui(10)
c dimension wind(12),tmean(12),tmax(12),tmin(12),rain(12),
c &      snow(12),solrad(12),vpres(12),pre(12),qnet(12),
c &      julian(12),parm(12),tmonth(12),prec(12)
c dimension tmeany(365),tmaxy(365),tminy(365),precip(365),
c &      radia(365),windy(365),vp(365),pard(365)
c dimension tmegs(11),tmxgs(11),tmngs(11),radgs(11),vpgs(11),
c &      windgs(11),rains(11)
c dimension imonth(12),idays(11),ichu(3)
c dimension wp(10),si(10),days(11),gslmax(11),gsdma(10)
c dimension mat(10),matl(2),matwb(2),coefs(8,5,2),work(8,2)

```

```

dimension daylen(365),sd(365),qg(365)
dimension lai(10,365),pmaxt(10,365),ct(10,365),ch(10,365)
dimension spt(365),dsat(365),ro(365),tl(365)
character*5 isoil,ixx
character*4 icrop(11)'/corn','oats','barl','whet',
&          'soya','bean','peas',
&          'toma','sunf','pota','gsl/'
data tmonth/31.,28.,31.,30.,31.,30.,31.,31.,30.,31.,30.,31./
data gslmax/180.,3*120.,180.,180.,120.,140.,130.,140.,0./
parameter (CO2 =360.)
real lai
c          *****
open (unit=1,file='pardata.dat',status='old')
open (unit=2,file='climdata.dat',status='old')
open (unit=3,file='sw.dat',status='old')
c          *****
c read in table of photosynthetically active radiation for clear skies
c data from de Wit(1965)
c          *****
do 1 i=1,51
1  read(1,2)(parc(i,j),j=1,12)
2  format(2x,12f3.0)
   read(1,3)((coefs(i,j,k),i=1,8),j=1,5),k=1,2)
3  format(7e10.4/e10.4)
   np=1
   ncount=0
c          *****
c read in soil unit monthly climatic data
c          *****
4  read(2,5,end=1000)isoil,lat,long,elev,storag,tmean,tmax,
   &          tmin,rain,snow,wind,solrad
5  format(3x,a5,6x,i2,6x,i2,5x,f3.0,5x,f3.0,7(/12f8.2))
c          *****
c read in the crop soil productivity and workability data
c          *****
6  read (3,7,end=1000) isx,si(1),wp(1),si(2),wp(2),
   &          si(3),wp(3),si(4),wp(4),si(5),wp(5),si(6),wp(6),
   &          si(7),wp(7),si(8),wp(8),si(9),wp(9),si(10),wp(10)
7  format (a5,32f7.2)
   if (isx.eq.isoil) then
   rewind 3
   else
   go to 6

```

```

endif
np = np+1
ideg=lat-39
do 10 i=1,12
  parm(i)=parc(ideg,i)
  pre(i)=rain(i)+snow(i)
  vpres(i)=0.6108*exp(17.27*tmin(i)/(tmin(i)+237.3))
10 continue
  write(6,20)isoil,lat,long,elev,storag
20 format('1',30x,'***** soil unit ',a5 ,8('*')//8x,
  & 'lat long elevation smhc'
  & //8x,i2,6x,i2,8x,f4.0,8x,f5.0//)
  write(6,30)tmean,tmax,tmin,pre,wind,vpres,solrad
30 format(5x,'jan feb mar apr may june july
  & aug sept oct nov dec'/1x,12f8.2,1x,'tmean(C)'/
  & 1x,12f8.2,1x,'tmax(C)'/
  & 1x,12f8.2,1x,'tmin(C)'/
  & 1x,12f8.2,1x,'precipitations(mm)'/
  & 1x,12f8.2,1x,'windspeed(cm/sec)'/
  & 1x,12f8.2,1x,'vapour pressure(kPa)'/
  & 1x,12f8.2,1x,'solar radiation(cal/cm2/day)'/)
c *****
c convert monthly precipitation totals to daily values
c *****
  do 40 i=1,12
40 prec(i)=pre(i)/tmonth(i)
c *****
c convert monthly data to daily data
c *****
  CALL daily(tmin,tminy)
  CALL daily(tmean,tmeany)
  CALL daily(parm,pard)
  CALL daily(tmax,tmaxy)
  CALL daily(vpres,vp)
  CALL daily(solrad,radia)
  CALL dlenght(lat,sd,daylen)
c *****
c calculate thermal growing season Start, End, Length.
c the planting date is assumed to be the date when tmin exceed 4.99C
c the growing season End is assumed to be the date when tmin is
c less than 5C
c *****
  do 50 i=1,10

```



```

    mat(i)=0
    days(i)=0.
50  idays(i)=0
    idays(11)=0
    do 60 i=1,3
60  ichu(i)=0
    itgss=0
    itgse=0
    itgsl=0
    idegdy=0
    do 70 i=1,365
    if(tminy(i).gt.4.99) go to 90
70  continue
    write (6,80)isoil
80  format(//10x,a5,2x,' has no growing season')
    go to 4
c      *****
c the growing season is not allowed to start before May 1.
c      *****
90  itgss=i
    if (itgss.lt.121) itgss=121
    do 100 j=1,365
    k=366-j
    if(tminy(k).gt.4.99) go to 110
100 continue
110 itgse=k
    itgsl=itgse-itgss+1
    idays(11)=itgsl
    days(11)=itgsl
c      *****
c use biomet time scale to see if Barley and Wheat will matures
c      *****
    CALL biomet(itgss,itgse,itgsl,tminy,tmaxy,daylen,coefs,
&      matl,igrow)
    do 120 i=1,2
    matwb(i) = matl(i)
120 continue
    mat(3) = matwb(1)
    mat(4) = matwb(2)
c      *****
c calculate annual degree days above 5C and Corn Heat Unit values
c      *****
    ddoats = 0.

```

```

ddpb = 0.
ddtom = 0.
ddpea = 0.
ddbee = 0.
ddsunf = 0.
ddpot = 0.
chu=0.
c
do 130 i=itgss,itgse
dday=tmeany(i)-5.
ddayp=tmeany(i)-5.5
ddayb=tmeany(i)-5.5
ddayt=tmeany(i)-6.
ddaysunf=tmeany(i)-7.2
ddaypot=tmeany(i)-2.
c
*****
c OATS requires a minimum of 1000 degree days >5C to mature
c
*****
ddoats=ddoats+dday
if((ddoats.gt.1000.).and.(mat(2).lt.1)) mat(2)=i-itgss+1
c
*****
c PHAS. BEAN requires a minimum of 1600 degree days >5C to mature
c
*****
ddpb=ddpb+dday
if((ddpb.gt.1600.).and.(mat(6).lt.1)) mat(6)=i-itgss+1
c
*****
c TOMATO requires a minimum of 1000 degree days >6C to mature
c
*****
ddtom=ddtom+ddayt
if((ddtom.gt.1000.).and.(mat(8).lt.1)) mat(8)=i-itgss+1
c
*****
c G. PEAS requires a minimum of 1200 degree days >5.5C to mature
c
*****
ddpea=ddpea+ddayp
if((ddpea.gt.1200.).and.(mat(7).lt.1)) mat(7)=i-itgss+1
c
*****
c SUNFLOWER requires a minimum of 1300 degree days >7.2C to mature
c
*****
ddsunf=ddsunf+ddaysunf
if((ddsunf.gt.1300.).and.(mat(9).lt.1)) mat(9)=i-itgss+1
c
*****
c POTATO requires 1250 degree days > 2 to mature
c
*****

```

```

      ddpot=ddpot+ddaypot
      if((ddpot.gt.1250.).and.(mat(10).lt.1)) mat(10)=i-itgss+1
c      *****
c computation of Corn Heat Units accumulation according to
c Brown (1978)
c      *****
      fmax = tmaxy(i) - 10.
      if (fmax.lt.0.) fmax=0.
      fmin = tminy(i) - 4.44
      if (fmin.lt.0.) fmin=0.
      cchu=((fmin*9./5.)+(3.33*fmax)-(0.084*(fmax**2)))/2.
      if (cchu.lt.0.0) cchu=0.0
      chu=chu+cchu
c      *****
c find the number of days required to reach 2500 and 2700 CHU
c      *****
      if ((chu.gt.2499.).and.(ichu(1).lt.1)) ichu(1)=i-itgss+1
      if ((chu.gt.2699.).and.(ichu(2).lt.1)) ichu(2)=i-itgss+1
130 continue
      dggday=ddoats
      idegdy=dggday
      ichu(3)=chu
c      *****
c SOYBEANS requires 2500 CHU to mature
c CORN      requires 2700 CHU to mature
c      *****
      mat(5)=ichu(1)
      mat(1)=ichu(2)
c
      do 140 i=1,10
      idays(i)=mat(i)
      if (mat(i).lt.1) go to 140
      if (idays(11).gt.mat(i)) go to 150
      idays(i)=idays(11)
      go to 140
150 if (mat(i).lt.gslmax(i)) go to 160
      idays(i) = gslmax(i)
      go to 140
160 idays(i) = mat(i)
140 days(i)=idays(i)
c      *****
c      Initialize data
c      *****

```

```

do 170 i=1,11
  camui(i)=0.
  rains(i)=0.
  tmegs(i)=0.
  tmxgs(i)=0.
  tmngs(i)=0.
  radgs(i)=0.
  vpgs(i)=0.
  windgs(i)=0.
170 continue
do 190 i=1,11
do 190 j=1,18
190 output(i,j)=0.
if (idays(11).lt.1) go to 200
c *****
c compute mean growing season information
c *****
  kll=1
  do 210 i=1,12
    month=tmonth(i)
    do 210 j=1,month
      precip(kll)=prec(i)
      windy(kll)=wind(i)
210 kll=kll+1
      iv=1
      do 215 j=1,365
        if (iv.eq.1) trains=0.
        trains=trains+precip(j)
        precip(j)=0.
        if(iv.eq.7) precip(j)=trains
        iv=iv+1
        if(iv.gt.7) iv=1
215 continue
      sum=0.
      jj=0
      do 220 i=itgss,itgse
        sum=sum+precip(i)
        jj=jj+1
      do 230 j=1,11
        if(jj.ne.idays(j)) go to 230
        rains(j)=sum
230 continue
220 continue

```

```

CALL xmean(itgss,itgse,days,tmeany,tmegs)
CALL xmean(itgss,itgse,days,tmaxy,tmxgs)
CALL xmean(itgss,itgse,days,tminy,tmngs)
CALL xmean(itgss,itgse,days,vp,vpgs)
CALL xmean(itgss,itgse,days,radia,radgs)
CALL xmean(itgss,itgse,days,windy,windgs)
200 write(6,240)itgss,itgse,itgsl,ichu(3),idegdy
240 format(//2x,'gss=',i4,2x,'gse=',i4,2x,'gsl=',i4,2x,
& 'chu=',i4,2x,'dday>5=',i5//1x,
& 'crop',2x,'gsl tmegs tmxgs tmngs precip vpgs windgs
& radgs ')
do 250 i=1,11
write(6,260)icrop(i),idays(i),tmegs(i),tmxgs(i),tmngs(i),
& rains(i),vpgs(i),windgs(i),radgs(i)
260 format(1x,a4,i5,3f8.2,4f8.1)
250 continue
c *****
c calculate the climatic available moisture usage index (camui)
c *****
CALL xleafai(itgss,lai)
CALL cheight(itgss,itgsl,tmeany,tminy,tmaxy,ch)
CALL qsoil(tmeany,qg)
270 imgss=0
CALL cami(CO2,qg,tmaxy,tminy,tmeany,radia,windy,precip,
& daylen,itgss,itgse,idays,mat,imgss,pard,lai,ch,
& spt,dsat,ro,storag,output)
do 280 k=1,10
280 camui(k)=output(k,17)
c *****
c calculate the dry matter accumulation
c *****
CALL photmax(itgss,itgse,tmeany,tmaxy,pmaxt,ct)
CALL tleaf(itgss,itgse,tmeany,radia,spt,dsat,ro,tl)
CALL assim(CO2,lat,itgss,tmeany,tl,radia,mat,pmaxt,ct,lai,
& sd,daylen,dphot,gsdma)
c *****
c calculate potential yield and anticipated yields modified by camui
c *****
CALL yield(days,mat,gsdma,camui,wp,si,biomas)
go to 4
1000 continue
close (unit=1,status='keep')
close (unit=2,status='keep')

```

```

        close (unit=3,status='keep')
        stop ' end of program '
        end
c *****
c subroutine xmean(itgss,itgse,days,data,ymean)
c *****
c days      : represents the growing season length
c itgss     : julian data growing season starts
c itgse     : julian data growing season ends
c data      : variable being averaged
c ymean     : average growing season value for parameter data
c *****
c dimension data(365),days(11),ymean(11),idays(11)
c if(days(11).lt.1.) return
c tot=0.
c do 10 i=1,11
c idays(i)=days(i)
10 ymean(i)=0.
c j=0
c do 20 id=itgss,itgse
c tot=tot+data(id)
c j=j+1
c do 30 i=1,11
c if(j.ne.idays(i)) go to 30
c ymean(i)=tot/days(i)
30 continue
20 continue
c return
c end
c *****
c subroutine daily (valub,answer)
c *****
c sine wave interpolation procedure for daily values based on
c monthly values for the same month, preceding month and following
c month. Brooks(1943).
c
c value      : 14 monthly values from December to January
c incr       : daily count (1-365)
c A,B,C      : values needed for sine wave interpolation
c moncon     : number of days in each month
c loop       : number of days in a certain month
c z          : value needed for sine wave interpolation
c answer     : 365 values interpolated from the 12 monthly values

```

```

c *****
dimension value(14),answer(365),moncon(13),valub(12)
data moncon/0,31,28,31,30,31,30,31,31,30,31,30,31/
value(14)=valub(1)
do 2 i=1,12
2 value(14-i)=valub(13-i)
value(1)=value(13)
incr=0
do 1 i=1,12
A=7.29*(value(i+1)-value(i))-3.91*(value(i+2)-value(i))
B=1.95*(value(i+1)-value(i))
C=value(i)-6.47*(value(i+1)-value(i))+3.74*(value(i+2)-value(i))
loop=moncon(i+1)
do 1 j=1,loop
z=j
incr=incr+1
1 answer(incr)=A*cos(.0174533*z)+B*sin(.0174533*z)+C
return
end

c *****
subroutine penmon(zr,tmeany,tminy,qg,windy,radnet,vp,
& lai,ch,rs,spt,dsat,ro,pen)
c *****
c cp : specific heat of the air (MJ/kg/C)
c dsat : vapor pressur deficit (kPa)
c gamma : psychrometric constant (kPa/C)
c lhv : latent heat of vaporisation (MJ/kg); Harrison (1975)
c rn : net radiations (MJ/m2/day)
c qg : soil heat flux (MJ/m2/day)
c ra : aerodynamic resistance (s/cm)
c raa : convert ra from s/cm to d/m; 1s/cm = 1/36/24 day/m
c rc : canopy resistance (s/cm)
c rsmax : maximum stomatal resistance (s/cm) (Korner et al.,1978)
c rs : stomatal resistance (s/m)
c ro : air density (kg/m3)
c spt : slope of the saturation vapor curve (kPa/C)
c vps : saturation vapor pressure (kPa)
c zr : screen height of weather observations (m)
c 0.086 convert W/m2 to MJ/m2/d; 1W/m2=0.086MJ/m2/d
c *****
parameter (gamma=0.066,cp=1.004e-03)
real lhv,lai

```

```

c
  rn=0.086*radnet
  spt=((2502.9/((tmeany+237.3)**2)))*exp(17.269*tmeany
& /((tmeany+237.3))
  ro=1.29-(0.0041*tmeany)
  vps=0.6108*exp(17.27*tmeany/(tmeany+237.3))
  dsat=vps-vp
c *****
c normalisation of wind speed from 10m to the reference height
c according to Rosenberg et al. (1983)
  zo=0.13*zr
  zd=0.7*zr
  windn = windy*(log((zr-zd)/zo))/(log((10.-zd)/zo))
c
  if (ch.ne.0.) ch=0.01
  ra=((log((zr-0.774*ch)/(0.026*ch)))
& *(log((zr-0.64*ch)/(0.13*ch)))/(0.16*windn)
  raa=ra/24./36.
c *****
c computation of canopy resistance
  if (lai.le.0.001) then
    rc = 0.
  else
    rc = rs/lai/0.5
  endif
  fres=1.+(rc/ra)
  vnum=(spt*(rn+qg))+(ro*cp*dsat/raa)
  vden=spt+gamma*fres
  lhv=2.501-2.36e-03*tmeany
  pen=vnum/vden/lhv
  return
  end
c *****
  subroutine prtay(tmean,qg,radnet,pen)
c *****
c This subroutine computes the soil evaporation according to
c Priesley-Taylor equation.
c
c cpt      : Priesley-Taylor coefficient
c gamma    : psychrometric constant (kPa/C)
c lhv      : latent heat of vaporisation (MJ/Kg)
c tmean    : mean air temperature (C)
c vpa      : actual vapor pressur (kPa)

```



```

c  rn      : net radiation (MJ/m2/d)
c  qg      : soil heat flux (MJ/m2/d)
c  pen     : potential evaporation (mm/d)
c  0.086 convert W/m2 to MJ/m2/d; 1W/m2=0.086MJ/m2/d
c  *****
c  parameter (cpt=1.26,gamma=0.066)
c  real lhv
c
c  spt=((2502.9/((tmean+237.3)**2))*exp(17.269*tmean
&  /(tmean+237.3))
c  lhv = 2.501 - 2.36e-03*tmean
c  rn = 0.086*radnet
c  pen = cpt*(spt/(spt+gamma))*(rn+qg)/lhv
c  return
c  end
c  *****
c  subroutine qstar(solrad,tmean,tmin,tmax,vp,parc,qrad)
c  *****
c  This subroutine computes net radiation above the canopy
c  Net thermal radiation is computed according to (Brunt,1932)
c
c  esur    : surface emissivity
c  esky    : sky emissivity
c  sbc     : Stephan-Boltzmann constant (W/m2/K4)
c  sradn   : net solar radiation
c  sradc   : expected clear sky global solar radiation
c  tradn   : net thermal radiation
c  qrad    : net radiation
c  vp      : actual vapor pressur (kPa)
c  0.485 convert Cal/cm2/d to W/m2
c  *****
c  parameter (sbc=5.67e-08,esur=0.97,albedo=0.23)
c  tmink = tmin+273.
c  tmaxk = tmax+273.
c  tmeank = tmean+273.
c  solradd = 0.485*solrad
c  parcd = 0.485*parc
c  sradcd = parcd/0.48
c  sradn = (1.-albedo)*solradd
c  ebulk=(-1.+0.0*sqrt(vp))*(solradd/sradcd)*(-0.02+(0.26*
&  exp((-7.77e-4)*((273-tmeank)**2))))
c  tradn = ebulk*sbc*((tmink**4)+(tmaxk**4))/2.
c  qrad = sradn+tradn

```

```

    return
    end
c *****
    subroutine cami(CO2,qg,tmaxy,tminy,tmean,y,radia,windy,
& precip,daylen,itgss,itgse,adays,mat,imgss,pard,lai,ch,
& spt,dsat,ro,storag,output)
c *****
c
c vpa      : actual vapor pressure (kPa)
c qbs,qp   : net radiation - bare soil, plant canopy respectively
c idays    : days in each month of the year
c imgss    : julian date that the moisture gss (pes > pre)
c istart   : julian date that imgss begins
c tminz    : julian date that tmin first exceeds 0C
c ipath    : photosynthetic pathway index
c storag   : soil moisture in storage
c plai     : leaf area index
c smtrsh   : soil moisture holding capacity (1-4),(100,150,200,280)
c surfst,spltst: starting soil moisture content of the surface
c           and plant zones
c surfl,surfn : surface SM on the preceeding day and at of new
c           day calculations
c surfhf,splthf: available SM break points at which AE is < PE
c x         : constant representing the available soil moisture curve
c surfpd,spltd : SM deficits when the SM level first falls bellow
c           surfhf and splthf respectively
c defsp,defz,defp : plant-soil zone,soil zone and plant deficit
c pepl     : potential evaporation plant (Penman-Monteith model)
c pes     : potential evaporation bare soil (Priesley-Taylor model)
c pae     : percent of total evaporation by the plant canopy
c raes,raesp,raepp : ratio of ae/pe for soil,plant-soil,plant zones
c aes,aesp,aep : actual evaporation soil, plant-soil, plant zones
c run     : runoff
c smtot   : total soil moisture in surface and plant zones combined
c rsmx    : maximum stomatal resistance (s/cm)
c zr     : reference height (m)
c calculation procedure of AE is taken from Stewart (1983) program
c and uses the algorithm of Baier et al. (1979)
c *****
    dimension tminy(365),tmaxy(365),tmean(365),radia(365),
& windy(365),vpa(365),precip(365),daylen(365),
& qg(365),pard(365)
    dimension pepl(10,365),pes(10,365),pet(10,365),petsom(10,365),

```

```

&      lai(10,365),output(11,18),cmiout(180)
dimension idays(11),ipath(10)
dimension spt(365),ro(365),dsat(365),lhv(365)
dimension rsmx(10),ch(10,365),rss(4,10),rs(10),zr(10)
dimension accpre(10),accpes(10),accpet(10),accpep(10),
&      acaept(10),acaest(10),acdefp(10),acdefsf(10),
&      acdeft(10),campp(10),camptm(10),acr(10),cmi(10)
character*4 icrop(11) / 'corn', 'oats', 'barl', 'whet',
&      'soya', 'bean', 'peas',
&      'toma', 'sunf', 'pota', 'gsl' /
data rsmx/1.4,3*2.,1.4,2*2.7,2.3,1.4,2./
data zr/3.,7*2.,3.,2./
data ipath/4,9*3/
real lai,l,hv

c
do 10 i=1,10
do 10 j=1,18
10  output(i,j)=0.0
do 20 j=1,180
20  cmiout(j)=0.0
if(idays(11).lt.1) go to 1000
c      *****
c set growing season lengths and soil moisture holding capacity
c calculate daily values for Q*-plant canopy and Q*-bare soil,
c      *****
yrrain=0.0
yrpet=0.0
do 30 ic=1,10
c      *****
c computation of stomatal resistance for C3 and C4 crops
c Allen et al. (1985)
c      *****
rss(3,ic)=1./((4.85e-02)-(7.0e-05*CO2)+(3.4e-08*(CO2**2)))
rss(4,ic)=1./((3.28e-02)-(5.49e-05*CO2)+(2.96e-08*(CO2**2)))
ii=ipath(ic)
rs(ic)=rss(ii,ic)*0.01
if (rs(ic).gt.rsmx(ic)) rs(ic)=rsmx(ic)
do 40 i=1,365
vpa(i) = 0.6108*exp(17.27*tminy(i)/(tminy(i)+237.3))
plai = lai(ic,i)
pas1 = 1. - (0.43*plai)
pas2 = (1./1.1)*exp((-1.)*plai)
pae = 1. - exp((-1.)*plai)

```

```

    if (plai.lt.1.) then
      pas=pas1
    else
      pas=pas2
    endif
    if(pae.gt.0.0) go to 50
    pae = 0.0
    go to 60
50  if(pae.ge.0.95) pae=0.95
60  CALL qstar(radia(i),tmeany(i),tminy(i),tmaxy(i),vpa(i),pard(i),
    &          grad)
      radnet = grad
      qbs=radnet*exp((-1.)*0.398*plai)
      qp=radnet-qbs
c    *****
c calculate daily pe for crop canopy and bare soil evaporation
c    *****
      pen=0.0
      CALL penmon(zr(ic),tmeany(i),tminy(i),qg(i),windy(i),radnet,
    &  vpa(i),lai(ic,i),ch(ic,i),rs(ic),spt(i),dsat(i),ro(i),pen)
      pet(ic,i) = pen
      if(pae.ge.0.95) go to 70
      CALL penmon(zr(ic),tmeany(i),tminy(i),qg(i),windy(i),qp,
    &  vpa(i),lai(ic,i),ch(ic,i),rs(ic),spt(i),dsat(i),ro(i),pen)
      pepl(ic,i)=pen*pae
      CALL prtay(tmeany(i),qg(i),qbs,pen)
      pes(ic,i)=pas*pen
      go to 80
70  pepl(ic,i) = 0.95*pen
      pes(ic,i) = 0.05*pen
80  continue
      petsom(ic,i)=pes(ic,i)+pepl(ic,i)
      if (petsom(ic,i).gt.pet(ic,i)) pes(ic,i)=pet(ic,i)-pepl(ic,i)
      yrrain=yrrain+precip(i)
      yrpet=yrpet+pet(ic,i)
40  continue
30  continue
      if(yrpet.lt.1.00) yrpet=1.0
      do 90 ic=1,10
      do 100 i=1,365
      if(pes(ic,i).gt.precip(i)) go to 110
100 continue
90  continue

```

```

110  imgss=i
      if (imgss.gt.itgss) imgss=itgss
      do 120 i=1,365
      if (tminy(i).ge.0.00) go to 130
120  continue
130  itminz=i
      if (itminz.gt.imgss) imgss=itminz+9
      istart=imgss
c     *****
c initialize data sums
c     *****
      yy=100.
      do 140 kc=1,10
      accpre(kc)=0.00
      accpes(kc)=0.00
      accpep(kc)=0.00
      accpet(kc)=0.00
      acaept(kc)=0.00
      acaest(kc)=0.00
      acdefp(kc)=0.00
      acdefsf(kc)=0.00
      acdefst(kc)=0.00
      acrun(kc)=0.00
140  continue
c     *****
c set available soil moisture thresholds for surface and plant layers
c for plant evaporation
c
c for soil moisture holding capacities < 150mm thres is 50%
c for soil moisture holding capacities > 150mm thres is 70%
c for bare soil evaporation, the threshold value is 100%
c     *****
      thres=0.7
      if(storag.le.150.) thres=0.5
      smdef=yrrain/yrpet
      if(smdef.gt.1.0) smdef=1.0
      x=0.25*storag
      surfst=x
      surfn=surfst
      surfl=surfst
      surfhf=thres*x
      xx=0.75*storag
      splstst=xx-(storag-storag*smdef)

```

```

spltl=spltst
spltn=spltl
splthf=thres*xx
smtot=storag
c *****
c calculate evaporation and soil moisture storage
c *****
do 150 kc=1,10
do 160 k=istart,itgse
170 z=0.25*pepl(kc,k)
zz=pes(kc,k)
zp=0.75*pepl(kc,k)
aes=0.0
aep=0.0
defp=0.0
raep=0.0
aesp=0.0
defsp=0.0
raesp=0.0
if(pet(kc,k).lt.0.1) pet(kc,k)=0.1
if (k.ne.itgss) go to 190
idate=1
if (kc.ne.1) go to 190
write(6,2000) itgss,imgss,storag,smtot, x ,surfn, xx ,spltn,
& pes(kc,k),smdef
2000 format(//4x,'soil moisture status on the start of the thermal grow
& ing season'/4x,'*****'
& *****'/ 27x,'thermal growing season start=',i4,17x,'moi
& ture g.s. start=',i4,/23x,'total soil moisture holding cap.=',f7.
& , ' mm',3x,'total soil moisture in storage=',f7.2,' mm'/26x,'sur
& ace moisture holding capacity=',f6.2,' mm',6x,'surface moisture in
& storage=',f6.2,' mm'/23x,'plant zone moisture holding cap.=',f6.2
& ' mm',3x,'plant zone moisture in storage=',f6.2,' mm' /20x,'pe='
& f6.2,' mm/day',5x,'annual ratio of precip/pe=',f5.3/)
190 if(pepl(kc,k).lt.0.001) go to 200
if(lai(kc,k).gt.1.00) go to 210
z=pepl(kc,k)
zp=0.
210 if(surfl.lt.surfhf) go to 220
surfn=surfl-z
if(surfn.gt.surfhf) go to 230
surfpd=surfhf-((surfhf-(z-(surfl-surfhf)))/surfhf)*(z-(surfl-surfhf))
defsp=surfpd-surfn

```

```

surfn=surfpd
raesp=surfpd/surfhf
if((spltl.lt.splthf).or.(lai(kc,k).lt.1.00)) go to 240
spltl=spltl-defsp
surfn=surfhf
go to 230
220 raesp=(2.*surfl-z)/(2.*surfhf)
surfn=surfl-(z*raesp)
defsp=z-(z*raesp)
raesp=(2.*spltl-z)/(2.*splthf)
if(raesp.le.raesp) go to 240
if(lai(kc,k).lt.1.0) go to 240
surfn=surfl
defsp=0.
aesp=0.
raesp=0.
z=0.
zp=pepl(kc,k)
go to 250
230 defsp=0.00
raesp=1.00
240 aesp=z-defsp
if(lai(kc,k).le.1.00) go to 200
250 if(spltl.lt.splthf) go to 260
spltn=spltl-zp
if(spltn.lt.splthf) go to 270
defp=0.00
raesp=1.00
go to 280
270 pws=splthf-(spltl-zp)
surfd=surfl-aesp
if(surfd.gt.surfhf) go to 290
spltd=splthf-((splthf-(zp-(spltl-splthf)))/splthf)*(zp-(spltl-splthf))
defp=spltd-spltn
spltn=spltd
raesp=spltd/splthf
go to 280
290 swap=surfn-surfhf
if(pws.gt.swap) go to 300
surfn=surfn-pws
spltn=splthf
defp=0.0
raesp=2.0

```

```
go to 280
300 zpws=pws-swap
spltd=((2*splthf-zpws)/(2*splthf))*zpws
defp=spltd
surfn=surfhf
spltn=splthf-(zpws-spltd)
raepp=3.0
go to 280
260 continue
surfn=surfl-aesp
if(surfn.lt.surfhf) go to 310
swap=surfn-surfhf
if(zp.gt.swap) go to 320
defp=0.00
surfn=surfn-zp
raepp=4.0
go to 280
320 zpu=zp-swap
surfn=surfhf
raespp=(surfhf+surfhf-zpu)/(2.*surfhf)
raepp=(spltl+spltl-zpu)/(2.*splthf)
if(raespp.gt.raepp) go to 330
spltn=spltl-zpu*raepp
defp=zpu-zpu*raepp
raepp=5.
go to 280
330 surfn=surfhf-zpu*raespp
defp=zpu-zpu*raespp
raepp=6.
go to 280
310 raepp=(2.*spltl-zp)/(2.*splthf)
raespp=(2.*surfn-zp)/(2.*surfhf)
if((raespp.lt.0.00).or.(raepp.gt.raespp)) go to 340
surfn=surfn-zp*raespp
defp=zp-zp*raespp
raepp=7.0
go to 280
340 continue
if(raepp.gt.0.00) go to 350
defp=zp-spltl
spltn=0.00
raepp=spltl/splthf
go to 280
```



```

350 spltn=spltn-zp*raep
    defp=zp-(zp*raep)
280 aep=zp-defp
200 raes=(2.*surfn-zz)/(2.*x)
    if(raes.gt.0.00) go to 360
    raes=surfn/x
    defs=zz-surfn
    aes=surfn
    surfn=0.00
    go to 180
360 if(raes.gt.1.00) raes=1.00
    aes=zz*raes
    defs=pes(kc,k)-aes
    surfn=surfn-aes
180 continue
    surfn=surfn+precip(k)
    run=0.00
    if(surfn.le.surfst) go to 370
    if(spltn.ge.xx) go to 380
    spltn=spltn+(surfn-surfst)
    surfn=surfst
    if(spltn.lt.xx) go to 370
    run=spltn-xx
    spltn=xx
    go to 370
380 run=surfn-surfst
    surfn=surfst
370 smtot=surfn+spltn
    aetot=aes+aesp+aep
    if(pet(kc,k).lt.0.001) go to 390
    if(aetot.le.pet(kc,k)) go to 390
    pepl(kc,k)=pepl(kc,k)-(aetot-pet(kc,k))
    go to 170
390 continue
    if(k.lt.itgss) go to 400
    accpre(kc)=accpre(kc)+precip(k)
    accpes(kc)=accpes(kc)+pes(kc,k)
    accpep(kc)=accpep(kc)+pepl(kc,k)
    accpet(kc)=accpet(kc)+pet(kc,k)
    acaept(kc)=acaept(kc)+aesp+aep
    acaest(kc)=acaest(kc)+aes
    acdefp(kc)=acdefp(kc)+defsp+defp
    acdefs(kc)=acdefs(kc)+defs

```

```

acdefl(kc)=acdefl(kc)+defsp+defp+defl
acrln(kc)=acrln(kc)+run
if((accpet(kc).eq.0.00).or.(accpep(kc).eq.0.00)) go to 410
campp(kc)=acaep(kc)/accpep(kc)
if(campp(kc).gt.1.00) campp(kc)=1.00
camptm(kc)=(acaep(kc)+acaest(kc))/accpet(kc)
if(camptm(kc).gt.1.00) camptm(kc)=1.00
cmi(kc)=accpre(kc)/accpet(kc)
if(cmi(kc).gt.1.00) cmi(kc)=1.00
410 continue
iii=kc
if(idays(iii).ne.idate) go to 420
output(iii,1)=iii
output(iii,2)=idays(iii)
output(iii,3)=accpre(iii)
output(iii,4)=accpes(iii)
output(iii,5)=accpep(iii)
output(iii,6)=accpet(iii)
output(iii,7)=acaep(iii)
output(iii,8)=acaest(iii)
output(iii,9)=acdefp(iii)
output(iii,10)=acdefl(iii)
output(iii,11)=acdefl(iii)
output(iii,12)=acrln(iii)
output(iii,13)=surfn
output(iii,14)=spltn
output(iii,15)=smtot
output(iii,16)=campp(iii)
output(iii,17)=camptm(iii)
output(iii,18)=cmi(iii)
420 continue
idate=idate+1
400 continue
surfl=surfn
spltl=spltn
160 continue
150 continue
1000 write(6,500)
500 format(40X,'accumulated'/10X,'*****'
& '*****/44x,'AE AE plant soil total',11x
& ',moisture in storage camui cmi'/1x,'no gsl
& PE PE PE plant soil total deficit moist.
& '*****/10x,'precip soil

```

```

& plant total total surface deficit surface deficit runoff surf
& ace plant total plant total'/26('*****'))
510 continue
    kk=0
    do 520 ic=1,10
        no=output(ic,1)
        do 530 i=2,18
            kk=kk+1
            if (kk.gt.180) go to 520
530    cmiout(kk)=output(ic,i)
        igsl=output(ic,2)
        write (6,600) no,igsl,(output(ic,i),i=3,18)
600    format (1x,i2,i5,13f8.2,3f6.3)
520 continue
    return
end
c *****
    subroutine yield(gsl,mat,gsdma,camui,wp,si,biomas)
c *****
c
    dimension gslai(10),glai(10),dmmp(10),hi(10),
&    camui(10),gsdma(10),pdma(10),adma(10),
&    pydm(10),pyfw(10),apydm(10),apyfw(10),
&    gsl(11),hicof(10),yrf(10),cmyrf(10),
&    gslmax(11),mat(10),igsl(11),wp(10),si(10),
&    biomas(120)
    character*4 icrop(11)/'corn','oats','barl','whet',
&    'soya','bean','peas',
&    'toma','sunf','pota','gsl/'
    data hicof/0.5,3*0.42,0.4,0.35,0.4,0.25,0.3,1.12/
    data gslai/4.,7*5.,2*4./
    data dmmp/6*0.85,2*0.20,0.85,0.32/
    data yrf/1.25,1.20,1.05,1.15,1.20,1.15,1.15,1.05,0.95,1.10/
    data gslmax/180.,3*120.,2*180.,120.,140.,130.,140.,0./
c
    do 5 i=1,120
5    biomas(i)=0.
    do 10 i=1,10
        cmyrf(i)=0.
        hi(i)=0.
        pdma(i)=0.
        pydm(i)=0.
        pyfw(i)=0.

```

```

        adma(i)=0.
        apydm(i)=0.
10    apyfw(i)=0.
        do 12 i=1,11
12    igsl(i)=gsl(i)
        if(igsl(11).lt.1.) return
c      *****
c calculation to find the total dry matter yield when the growing
c season is long enough to mature crops
c      *****
11    write (6,114)
114   format ('1')
        write(6,115) (igsl(i),i=1,10)
115   format(/1x,'corn      matures in',i4,' days'/
&      1x,'oats          matures in',i4,' days'/
&      1x,'barley       matures in',i4,' days'/
&      1x,'wheat        matures in',i4,' days'/
&      1x,'soybean      matures in',i4,' days'/
&      1x,'p. bean      matures in',i4,' days'/
&      1x,'green peas   matures in',i4,' days'/
&      1x,'tomato       matures in',i4,' days'/
&      1x,'sunflower    matures in',i4,' days'/
&      1x,'potato       matures in',i4,' days'/)
c
        do 20 i=1,10
        if(mat(i).lt.1) go to 15
        hi(i)=hicof(i)
15    continue
        cmyrf(i)=1.-(1.-camui(i))*yrf(i)
        if (cmyrf(i).lt.0.00) cmyrf(i)=0.00
45    y=cmyrf(i)
        if (gsdma(i).lt.0.) gsdma(i)=0.
        pdma(i) = gsdma(i)
        adma(i)=pdma(i)*y*wp(i)*si(i)
        pydm(i)=pdma(i)*hi(i)
        pyfw(i)=pydm(i)/dmmp(i)
        apydm(i)=pydm(i)*y*wp(i)*si(i)
        apyfw(i)=pyfw(i)*y*wp(i)*si(i)
20    continue
        write(6,1000)
1000  format(3x,'crop  gsl  hi  pdma  dmmp  pydm  pyfw  cmyrf
&      wp  si  adma  apydm  apyfm')
        do 80 i=1,10

```

```

79  write(6,1100)icrop(i),gsl(i),hi(i),pdma(i),dmmp(i),pydm(i),
    & pyfw(i),cmymrf(i),wp(i),si(i),adma(i),apydm(i),apyfw(i)
1100 format(3x,a4,f5.0,f7.2,f8.1,f8.2,2f9.1,f6.3,2f5.2,3f9.1)
80  continue
    write(6,1200)
1200 format(/)
    jj=1
    do 61 i=1,10
    biomas(jj)=gsl(i)
    biomas(jj+1)=hi(i)
    biomas(jj+2)=pdma(i)
    biomas(jj+3)=dmmp(i)
    biomas(jj+4)=pydm(i)
    biomas(jj+5)=pyfw(i)
    biomas(jj+6)=cmymrf(i)
    biomas(jj+7)=wp(i)
    biomas(jj+8)=si(i)
    biomas(jj+9)=adma(i)
    biomas(jj+10)=apydm(i)
    biomas(jj+11)=apyfw(i)
    jj=jj+12
61  continue
    return
    end
c  *****
    subroutine biomet (igss,igse,igsl,tminy,tmaxy,daylen,coefs,
    &    matl,igrow)
c  *****
c  biological time-scale determination for wheat and barley.
c  this subroutine is taken from the program of Stewart (1983)
c  *****
    dimension tminy(365),tmaxy(365),daylen(365),
    &    kkk(2),accum(2),matl(2),igrow(2),
    &    coefs(8,5,2),work(8,2),idate(5,2)
    character*4 name(2)/'barl','whet'/
    do 10 j=1,2
    matl(j)=0
    accum(j)=0.
    kkk(j)=0
    do 10 i=1,5
10  idate(i,j)=0
    if (igsl.lt.1) go to 80
    do 20 k=1,2

```

```

c          *****
c set the begin and end stage calculation period.
c          *****
           iend=5
           istage=1
           stage=istage
           do 30 i=1,8
30  work(i,k)=coefs(i,1,k)
           do 40 j=igss,igse
           tx=tmaxy(j)
           tn=tminy(j)
c          *****
c for wheat and barley temperatures are in F.
c          *****
           if (k.lt.2) go to 50
           tx=tmaxy(j)*9./5.+32.
           tn=tminy(j)*9./5.+32.
c          *****
c daily calculations and zeroing of all negative terms
c          *****
50  tmx=tx-work(4,k)
           tmn=tn-work(4,k)
           if (tmx.lt.0.00) tmx=0.00
           if (tmn.lt.0.00) tmn=0.00
           hours=daylen(j)-work(1,k)
           if (hours*work(2,k).lt.0.000) hours=0.000
           day2=hours*hours
           vone=hours*work(2,k)+day2*work(3,k)
           tmx2=tmx*tmx
           tmn2=tmn*tmn
           vtwo=tmx*work(5,k)+tmx2*work(6,k)
           vthree=tmn*work(7,k)+tmn2*work(8,k)
           if (vone.lt.0.000) vone=0.000
           if (vtwo.lt.0.000) vtwo=0.000
           if (vthree.lt.0.000) vthree=0.000
           vfour=vtwo+vthree
           if (vfour.lt.0.000) vfour=0.000
           q=vone*vfour
           accum(k)=accum(k)+q
           kkk(k)=kkk(k)+1
           if ((j.eq.igse).and.(accum(k).gt.4.49)) matl(k)=kkk(k)
           if (accum(k).lt.stage) go to 40
           idate(istage,k)=j

```

```

        if (accum(k).lt.5.00) go to 60
        if (accum(k).gt.5.00) accum(k)=5.00
        matl(k)=kkk(k)
60    accum(k)=stage
        stage = stage + 1.0
        istage = istage+1
        if(istage.gt.iend) go to 20
        do 70 i=1,8
70    work(i,k)=coefs(i,istage,k)
40    continue
20    continue
        do 90 i=1,2
90    igrow(i)=matl(i)
        do 100 i=1,2
            if(matl(i).lt.96) go to 100
            idec=matl(i)-95
            igrow(i)=matl(i)-idec
            if(igrow(i).lt.80) igrow(i)=80
100   continue
        write (6,110) gss,igse,igs1,((idate(i,k),i=1,5),
    &         matl(k),accum(k),name(k),k=1,2)
110   format(//1x,3i4,2(6i5,f6.3,1x,a4)/)
        do 130 k=1,2
            if (matl(k).lt.1) go to 130
            write (6,120) name(k),matl(k),igrow(k)
120   format(/1x,a4,' matures in',i4,' days and its growth phase is'
    &         ,i4,' days/')
130   continue
80    continue
        return
        end
c *****
      subroutine assim (CO2,lat,itgss,tmean,tl,radia,mat,pmaxt,
    &         ct,lai,sd,daylen,dphot,gsdma)
c *****
c   This subroutine computes the dry matter accumulation over the
c   growing season
c
c   ccmx      : maximum leaf conductance to CO2 transfer (m/s)
c   cphot     : instantaneous canopy photosynthesis (kgCO2/m2/s)
c   ct       : maintenance respiration coefficient
c   gsdma     : growing season dry matter accumulation (kg/ha)
c   dphot     : daily canopy photosynthesis (kgCO2/m2/s)

```

```

c   grc      : growth respiration coefficient (McCree, 1972)
c   lat      : latitude of the site
c   lec      : light extinction coefficient
c   ltc      : light Transmission Coefficient of leaves
c   lrc      : light Reflexion Coefficient (Goudriaan, 1977)
c   ldc      : visible Light Diffusion coefficient (Goudriaan, 1977)
c   mpe      : maximum photochemical efficiency (kgCO2/J)
c   occ      : overall leaf conductance to CO2 transfer (m/s)
c   PAR      : incident Photosynthetically active radiation at the top
c             of the canopy (J/m2/s)
c   para     : available PAR for photosynthesis (J/m2/s)
c   parh     : expression of hourly variation of PAR
c             (Charles-Edwards, 1981)
c   pint     : integration points
C   plai     : leaf area index
c   pmax     : maximum rate of photosynthesis (kgCO2/m2/s)
c   pmaxc   : maximum rate of photosynthesis when CO2 concentration is
c             non limiting (kgCO2/m2/s)
c   prc      : photorespiration coefficient
c   sd       : solar declinaison (degree)
c   sinelev  : sinus of the solar elevation
c   wint     : integration weights
c   0.682 (=30/44) convert kgCO2 to kgCH2O
c   3600*24*1.e04 convert kgCO2/m2/s to kgCO2/ha/d
c   1e-06/0.5092 convert ppm to kg/m3
c   4.2*1.e04/3600/24 convert Cal/cm2/d to J/m2/s
c             *****
c             dimension pint(3),wint(3),
&             lec (10),mat(10),ccmax(10),occ(10),
&             tmeany(365),radia(365),par(365),daylen(365),sd(365),
&             pmax(10),pmaxt(10,365),pmaxcr(10,365),pmaxcrt(10,365),
&             pe(365),prc(365),ct(10,365),gsdma(365),
&             lai(10,365),swich(10),tl(365)
c             real ldc,lec,ltc,lrc1,lrc,lai
c             parameter (grc=0.34,pmaxc=1.8e-06,pemax=12.5e-09,ltc=0.1,ldc=0.2)
c             data ccmax/0.0045,3*0.0032,0.0045,0.005,0.0045,0.0032,0.0045,0.0032/
c             data lec/0.7,3*0.7,3*0.86,0.65,0.97,0.65/
c             data pmax/1.8e-06,9*8.35e-07/
c             data pint/0.112701665,0.5,0.887298334/
c             data wint/0.277778,0.444444,0.277778/
c             data swich/0.,9*1./

c
c   pi = 3.1416

```



```

rd = pi / 180.
CCO2 = CO2*1.e-06/0.5092
do 10 ic = 1,10
  pdma = 0.
  imat = itgss+mat(ic)
  do 20 id = itgss,imat
    lrc1 = (1.-sqrt(1.-ldc))/(1.+sqrt(1.-ldc))
    par(id) = 0.48*radia(id)*4.18e04/3600./24.
    prc(id) = (0.21e04/CO2)*1.2e-04*exp(0.0295*tl(id))
    pe(id) = pemax*(1.-(prc(id)*swich(ic)))
    occ(ic) = ccmax(ic)/(1.+(ccmax(ic)*CCO2/pmaxc))
    if (CO2.eq.360.) pmaxcr(ic,id) = pmax(ic)
    pmaxcr(ic,id) = occ(ic)*CCO2
    pmaxcrt(ic,id) = min(pmaxt(ic,id),pmaxcr(ic,id))
c ** computation of total daily canopy photosynthesis ****
  dphot = 0.
  do 3 it=1,3
    hour = 12.+daylen(id)*0.5*pint(it)
c ** computation of light reflexion coefficient (Goudriaan, 1977)
    sinelev = (sin(lat*rd)*sin(sd(id)))
    & + (cos(lat*rd)*cos(sd(id))*cos(15.*(hour-12.)))
    lrc = lrc1*(2./(1.+(1.6*sinelev)))
    para = par(id)*(1.-lrc)
    parh = (para/daylen(id)) *
    & (1. + sin((2.*pi*hour/daylen(id)) + (3.*pi/2.)))
    cphot1 = pe(id)*parh*pmaxcrt(ic,id)
    & /((pe(id)*lec(ic)*parh)+(pmaxcrt(ic,id)*(1.-lrc)))
    cphot = cphot1*(1.-exp(-lec(ic)*lai(ic,id)))
    dphot = dphot+cphot*daylen(id)*wint(it)
  3 continue
c ** computation of dry matter accumulation through
c ** the crop growing period (gsdma).
  dma = dma+((1.-grc)*dphot)-(ct(ic,id)*(dma+dphot))
  gsdma(ic) = pdma*0.682*3600.*24.*1.e4
  20 continue
  10 continue
  return
end
c *****
  subroutine dlength(lat,sd,daylen)
c *****
c computation of solar declinaison (sd) and daylenght (daylen)
c

```

```

c sd          : solar declinaison (in degree)
c daylen      : daylength (in hour)
c *****
  dimension sd(365),daylen(365)
  do 1 i=1,365
  sd(i) = 0.4102*(sin(2.*3.1416*(i-80.25)/365.))
  daylen(i) = (24./3.1416)*
&   acos(-(tan(lat*3.1416/180.))*tan(sd(i))))
  if (daylen(i).gt.24.) daylen(i)=24.
  if (daylen(i).lt.0.) daylen(i)=0.
1   continue
  return
  end
c *****
  subroutine xleafai(itgss,lai)
c *****
c   this subroutine computes the crop leaf area index
c   *****
  dimension lai(10,365),gslai(10)
  data gslai/4.,7*5.,2*4./
  real lai
c
  do 20 ic = 1,10
  do 10 id=1,365
  lai(ic,id) = 0.
  lgsl = id - itgss + 1
  if(lgsl.lt.0) lgsl=0
  tgsl=lgsl
  if(tgsl.gt.42.) go to 1
  lai(ic,id) =2.77e-05*tgsl**3.113
  go to 2
1   lai(ic,id)=6.691-0.9106*tgsl+0.0398*tgsl**2-6.529e-04*tgsl**3
  ' +4.693e-06*tgsl**4-1.257e-08*tgsl**5
2   continue
  if (tgsl.lt.10.00) lai(ic,id)=0.00
  if (lai(ic,id).lt.0.00) lai(ic,id)=0.00
  if (lai(ic,id).gt.gslai(ic)) lai(ic,id)=gslai(ic)
10  continue
20  continue
  return
  end

```

```

c *****
c      subroutine cheight(itgss,itgsl,tmean,y,tminy,tmaxy,ch)
c *****
c This subroutine computes the Crop Height for the crop ic
c in day i
c
c ch          : crop height (m)
c chmax       : maximum crop height (m)
c phu         : potential heat units accumulation
c pc1, pc2    : specific crop coefficients
c tbase       : base temperature (C) (crop dependent)
c *****
c      dimension chmax(10),ch(10,365),phu(10),Tbase(10),
&      hui(10,365),huf(10,365),
&      pc1(10),pc2(10),
&      tminy(365),tmaxy(365),tmean(y,365)
c      data chmax/2.5,3*1.2,3*1.5,1.5,2.5,0.8/
c      data phu/2700.,3*1000.,2500.,1600.,1200.,1000.,1300.,1250./
c      data Tbase/5.,3*5.,5.,5.,5.5,6.,7.2,2./
c      data pc1/15.05,9*15.01/
c      data pc2/10*50.95/
c      do 10 ic=1,10
c      ahu = 0.
c      do 20 i=1,365
c      fmx = 0.
c      fmn = 0.
c      hu = 0.
c      tb = tbase(ic)
c      if (i.ge.itgss) then
c      if ((i.le.4).or.(ic.eq.8).or.(ic.eq.9)) go to 30
c      hu = tmean(y,i) - tb
c      go to 40
30  continue
c      fmx = tmaxy(i) - 10.
c      if (fmx.lt.0.) fmx=0.
c      fmn = tminy(i) - 4.44
c      if (fmn.lt.0.) fmn=0.
c      hu=((fmn*9./5.) + (3.33*fmx) - (0.084*(fmx**2)))/2.
40  continue
c      if (hu.lt.0.) hu=0.
c      ahu = ahu + hu
c      hui(ic,i) = ahu / phu(ic)
c      if (hui(ic,i).gt.1.) hui(ic,i)=1.

```

```

    huf(ic,i) = hui(ic,i)/(hui(ic,i)+exp(pc1(ic)-(pc2(ic)*hui(ic,i))))
    ch(ic,i) = chmax(ic) * sqrt(huf(ic,i))
    else
    ch(ic,i) = 0.
    endif
20  continue
10  continue
    return
    end
c *****
    subroutine qsoil(tmeany,qg)
c *****
c this subroutine compute the soil heat flux (MJ/m2/d)
c
    dimension tmeany(365),tqg(365),qg(365)
    do 11 i=1,365
    k=i-1
    if (k.eq.0) k=366-1
    tqg(i) = tmeany(i)-((tmeany(k)+tmeany(k-1)+tmeany(k-2))/3.)
    qg(i) = 0.3768*tqg(i)
11  continue
    return
    end
c *****
    subroutine photmax(itgss,itgse,tmeany,tmaxy,pmaxt,ct)
c *****
c computation of the maximum photosynthetic rate as function of
c temperature (pmaxt) for the 4 main crop groups, and the maintenance
c respiration coefficients (ct) for legume and non-legume crops
c pmmdt is in units of (kgCO2/ha/h)
c pmaxt is in units of (kgCO2/m2/s)
c *****
    dimension tmeany(365),tmaxy(365),tmdt(365),
& pmmdt(2,365),ctt(2,365),pmaxt(10,365),
& ct(10,365),isubct(10),isubgm(10),mat(10)
    data isubgm/2,9*1/
    data isubct/4*1,3*2,3*1/
    do 20 ic=1,10
    do 10 id=itgss,itgse
    tmdt(id)=tmeany(id)+(2.*(tmaxy(id)-tmeany(id))/3.1416)
    pmmdt(1,id)=5.1685*tmdt(id) - 0.142*tmdt(id)**2 - 16.585
    pmmdt(2,id)= 33,835*tmdt(id) - 1,085*tmdt(id)**2
    + 0,01079*tmdt(id)**3 - 232,98

```

```

    if (pmmdt(2,id).gt.65.) pmmdt(2,id)=65.
    ctt(1,id)=0.0108*(0.044+0.0019*tmean(y(id)+0.001*tmean(y(id)**2)
    ctt(2,id)=0.0283*(0.044+0.0019*tmean(y(id)+0.001*tmean(y(id)**2)
    ir = isubct(ic)
    ip = isubgm(ic)
    pmaxt(ic,id) = pmmdt(ip,id)*1.e-04/3600
    ct(ic,id) = ctt(ir,id)
    if (pmaxt(ic,id).lt.0.0) pmaxt(ic,id)=0.0
10  continue
20  continue
    return
    end
c *****
    subroutine tleaf(itgss,itgse,tmean,y,radia,spt,dsat,ro,tl)
c *****
c   This subroutine computes the leaf temperature (C)
c
c   abss      : leaf absorption coefficient for shortwave radiation.
c   absp      : leaf absorption coefficient for PAR.
c   gamma     : psychrometric constant.
c   agamma    : apparent psychrometric constant.
c   as/al     : leaf absorption coefficient (PAR/0.7-3um).
c   ra        : leaf boundary layer resistance to convective heat flux(s/m).
c   rca       : leaf resistance to CO2 transfert (30 s/m; Rosenberg, 1981).
c   re        : total thermal resistance to heat loss from the leaf
c               by convection and radiation (s/m).
c   rr        : radiative transfer resistance (s/m).
c   sbc       : Stefan-Boltzmann constant (W/m2/K4).
c   spt       : slope of saturation vapour curve.
c   tl        : leaf temperature (C)
c               *****
c
c   dimension tmean(y(365),tmean(k(365),tl(365),spt(365),ro(365),
&       dsat(365),re(10,365),rr(365),rabs(365),
&       rap1(365),rap2(10,365),rap3(365),radia(365)
parameter (sbc=5.67e-08,cp=1.004e-03,gamma=0.066,
&       as=0.1,al=0.4,ec=0.95,rca=30.)
    agamma = 0.93*gamma
    do 10 ic = 1,10
    do 20 id = itgss,itgse
    ra(ic,id) = 0.76*rca
    tmean(k(id) = tmean(y(id) + 273.15
    rr(id) = ro(id)*cp/(4.*sbc*(tmean(k(id)**3))

```

```
re(ic,id) = (ra(ic,id)*rr(id))/(rr(id) + 2.*ra(ic,id))
rabs(id) = 0.0418*((0.48*as*radia(id)) + (0.52*al*radia(id)))
rap1(id) = agamma/(agamma+spt(id))
rap2(ic,id) = re(ic,id)*(rabs(id) -
&      (2.*0.086*ec*sbc*(tmeank(id)**4)))/(ro(id)*cp)
rap3(id) = dsat(id)/agamma
tl(id) = tmeany(id) + (rap1(id)*(rap2(ic,id) - rap3(id)))
20 continue
10 continue
return
end
```