

Université de Montréal

**Impacts potentiels des changements climatiques sur les terrains
de golf dans la région du sud du Québec**

Par

Victor Tapes

Département de géographie

Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de
Maître ès Science (M. Sc.) en Géographie

août, 2006

© Victor Tapes 2006



G

59

U54

2006

V.017



AVIS

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

NOTICE

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :

**Impacts potentiels des changements climatiques sur les terrains de golf dans
la région du sud du Québec**

présenté par :

Victor Tapes

a été évalué(e) par un jury composé des personnes suivantes :

Christopher Bryant
président - rapporteur

Bhawan Singh
directeur de recherche

Thora Martina Herrmann
membre du jury

RÉSUMÉ

La présente étude utilise les projections générées par les modèles couplés de circulation générale (MCGAO) afin d'identifier les impacts potentiels des changements climatiques sur les terrains de golf au sud du Québec. La recherche est axée sur trois régions: la région des Laurentides y compris Montréal, la région des Cantons de l'Est et la région de Québec.

Ce projet de recherche applique la méthodologie classique du couplage d'un modèle climatique à un modèle de culture pour évaluer les besoins en eau et les taux d'irrigation. Ainsi, sont utilisés deux modèles climatiques : CGCM1 et le HadCM3 en considérant les scénarios d'émission *IS92a* (IPCC, 1992) et *A2* et *B2* (SRES, 2000) et un modèle de culture: le modèle EPIC (*Erosion Productivity Impact Calculator*). Pour réduire l'échelle spatiale grossière des modèles climatiques à une échelle spatiale plus fine, le modèle SDSM (*Statistical DownScaling Model*) a été employé. Cette étude utilise également des indicateurs agroclimatiques et climatiques afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur les conditions atmosphériques liées à la pratique de golf ainsi que sur la «santé» du gazon des parcours et des verts. Finalement, a été développée une méthode pour estimer le début et la fin de la saison de golf ainsi que la durée de celle-ci.

Les résultats montrent que en utilisant les paramètres météorologiques collectés sur deux terrains de golf, le modèle EPIC s'acquitte adéquatement de sa tâche de simuler des taux mensuels d'irrigation. Le modèle donne des résultats parfois insatisfaisants pour certaines variables, notamment la fréquence d'irrigation. Les scénarios climatiques futurs indiquent que dans le sud du Québec les besoins en eau accroîtraient durant la saison de golf, les conditions climatiques hivernales seraient moins propices pour les cultures de gazon et la durée de la saison de golf s'allongerait.

MOTS CLÉS

Changement climatique, Québec, modèle EPIC, irrigation, cultures de gazon, terrain de golf, indices agroclimatiques, indices climatiques, paramètres météorologiques

ABSTRACT

This study uses the projections generated by Coupled General Circulation Models (CGCM) in order to identify the potential impacts of climate change on golf courses in southern Quebec. The research is focused on three zones: the Laurentides (including Montreal), the Eastern Townships and the Quebec City regions.

This project applies the traditional methodology of coupling a climate model with a crop model to evaluate water needs and rates of irrigation. Two climate models are used: CGCM1 and HadCM3 respectively based on emissions scenarios IS92a (IPCC, 1992), A2 and B2 (SRES, 2000). The crop model used in this research is the EPIC (*Erosion Productivity Impact Calculator*) model. This crop model together with the SDSM (*Statistical DownScaling Model*) model which is employed to reduce the coarse resolution of the climate models to a finer spatial scale are used to complete the data analyses. This study also uses agro-climatic and climatic indices to evaluate the impacts of climatic change on weather conditions related to the practice of golf, and on the "health" of the turf grass. Finally, we developed a method to estimate the beginning, the ending as well as the duration of the golf season.

Using field weather data collected on two golf courses, the results showed that the EPIC model adequately simulates the monthly rates of irrigation. However, the model does not perform satisfactorily with certain variables, in particular the frequency of irrigation. Future climate scenarios indicate that in Southern Quebec the need for water would increase during the golf season; the duration of the golf season would lengthen; while, the winter climatic conditions would be less favourable for the turf grass of golf courses.

KEY WORDS

Climate change, Quebec, EPIC model, irrigation, golf courses, turf grass, agro-climatic indices, climatic indices, weather parameters

TABLE DES MATIERES

<i>RÉSUMÉ</i>	<i>i</i>
<i>ABSTRACT</i>	<i>ii</i>
<i>TABLE DES MATIERES</i>	<i>iii</i>
<i>LISTE DE TABLEAUX</i>	<i>vi</i>
<i>LISTE DES FIGURES</i>	<i>xii</i>
<i>LISTE DE SIGLES ET DES SYMBOLES</i>	<i>xv</i>
<i>REMERCIEMENTS</i>	<i>xviii</i>
INTRODUCTION	1
1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	4
1.1 LA VARIABILITÉ DU CLIMAT ET LA «SANTÉ» DU GAZON DES TERRAINS DE GOLF	4
1.1.1 Le climat de la période de croissance des espèces gazonnantes	4
1.1.1.1 Le régime thermique	4
1.1.1.2 Le régime hydrique	6
1.1.2 Le climat et la période latente (hivernale) des espèces gazonnantes	8
1.2 ÉTUDES ANTÉRIEURES.....	9
2 PROBLÉMATIQUE, HYPOTHÈSE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	11
2.1 PROBLÉMATIQUE DE LA RECHERCHE	11
2.2 HYPOTHÈSE DE LA RECHERCHE	12
2.3 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	12
3 MÉTHODOLOGIE	14
3.1 LA RÉGION D'ÉTUDE	14
3.2 MODÈLES DE CIRCULATION GÉNÉRALE COUPLÉS ATMOSPHÈRE-OCÉAN (MCGAO)....	14
3.2.1 Le modèle CGCM1	16
3.2.2 Le modèle HadCM3.....	17
3.3 LE MODÈLE DE MISE À ÉCHELLE STATISTIQUE SDSM	18
3.4 LE MODÈLE DE CULTURE EPIC	21
3.4.1 La validation du modèle EPIC	22
3.4.1.1 Les régions d'étude	22
3.4.1.2 La station météo Davis.....	22
3.4.1.3 Données climatiques	23
3.4.1.4 Données du sol.....	24
3.4.1.5 Données de culture.....	25
3.4.1.6 Les résultats de l'étude sur le terrain de golf Inverness été 2004.....	26
3.4.1.7 Les résultats des études sur le terrain de golf Challenger été 2005.....	30
3.5 DONNÉES CLIMATIQUES	36
3.5.1 Région des Laurentides (sous région de Montréal)	36
3.5.2 Région des Cantons de l'Est	37
3.5.3 Région du Québec.....	38
3.6 DONNÉES DE LA CULTURE	38
3.6.1 Les caractéristiques biologiques principales du pâturin annuel (<i>Poa annua</i> L.)	39
3.6.2 Les caractéristiques biologiques principales de l'agrostide traçante (<i>Agrostis stolonifera</i>)	41
3.6.3 Les paramètres biologiques des espèces du gazon	41
3.7 DONNÉES DU SOL	41
3.7.1 Région des Laurentides (sous région de Montréal)	41

3.7.2 La région des Cantons de l'Est	43
3.7.3 Région de la ville de Québec	44
3.8 LA DURÉE DE LA SAISON DE GOLF, LES INDICATEURS AGROCLIMATIQUES ET CLIMATIQUES	45
3.8.1 La durée de la saison de golf.....	45
3.8.2 Les indicateurs agoclimatiques	45
3.8.2.1 Les indicateurs agoclimatiques automnaux.....	46
3.8.2.2 Les indicateurs agoclimatiques hivernaux	46
3.8.3 Les indicateurs climatiques.....	46
4 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....	48
4.1 LES SIMULATIONS DES TAUX D'IRRIGATION AVEC LES DONNÉES OBSERVÉES	48
4.1.1 Région des Laurentides (sous région de Montréal)	48
4.1.2 La région des Cantons de l'Est	53
4.1.3 La région de la ville du Québec	56
4.2 LES SIMULATIONS AVEC LES PROJECTIONS DU CGCM1- SCÉNARIOS FUTURS	59
4.2.1 Région des Laurentides (sous région de Montréal)	59
4.2.1.1 Les tendances futures des paramètres climatiques	59
4.2.1.2 Les tendances futures des taux d'irrigation.....	62
4.2.2 La région des Cantons de l'Est	65
4.2.2.1 Les tendances futures des paramètres climatiques	65
4.2.2.2 Les tendances futures des taux d'irrigation.....	67
4.2.3 La région de la ville de Québec	70
4.2.3.1 Les tendances futures des paramètres climatiques	70
4.2.3.2 Les tendances futures des taux d'irrigation.....	73
4.3 LES SIMULATIONS DES TAUX D'IRRIGATION AVEC LES PROJECTIONS FUTURES DE HADCM3	75
4.3.1 Région de Montréal.....	76
4.3.1.1 Les caractéristiques climatiques simulées par le modèle HadCM3 SRES A2	76
4.3.1.2 Les caractéristiques climatiques simulées par le modèle HadCM3 SRES B2	78
4.3.1.3 Les tendances futures des taux d'irrigation.....	80
4.3.2 La région des Cantons de l'Est	82
4.3.2.1 Les caractéristiques climatiques simulées par le modèle HadCM3 SRES A2	82
4.3.2.2 Les caractéristiques climatiques simulées par le modèle HadCM3 SRES B2	83
4.3.2.3 Les tendances futures des taux d'irrigation.....	86
4.3.3 Région de Québec	88
4.3.3.1 Les caractéristiques climatiques simulées par le modèle HadCM3 SRES A2	88
4.3.3.2 Les caractéristiques climatiques simulées par le modèle HadCM3 SRES B2	90
4.3.3.3 Les tendances futures des taux d'irrigation.....	92
4.4 IRRIGATION : DIFFERENCES ENTRE LES SCÉNARIOS CLIMATIQUES	95
4.5 LES INDICATEURS AGROCLIMATIQUES, L'ÉTAT DU GAZON ET LA QUALITÉ DE JEU DES GOLFEURS	97
4.5.1 La région de Laurentides (y compris Montréal)	97
4.5.1.1 Les indicateurs agoclimatiques automnaux	97
4.5.1.2 Les indicateurs agoclimatiques hivernaux	98
4.5.2 <i>La région des Cantons de l'Est</i>	100
4.5.2.1 Les indicateurs agoclimatiques automnaux	100
4.5.2.2 Les indicateurs agoclimatiques hivernaux	101
4.5.3 La région de la ville de Québec	103
4.5.3.1 Les indicateurs agoclimatiques automnaux	103

4.5.3.2 Les indicateurs agroclimatiques hivernaux	104
4.5.4 Vue d'ensemble de la région d'étude.....	106
4.6 LES INDICATEURS CLIMATIQUES, L'ÉTAT DU GAZON ET LA QUALITÉ DU JEU DES GOLFEURS	107
4.6.1 La région de Laurentides (y compris Montréal)	107
4.6.2 La région des Cantons de l'Est	110
4.6.3 La région de la ville de Québec	113
4.6.4 Vue d'ensemble de la région d'étude.....	116
4.7 LA DURÉE DE LA SAISON DE GOLF	116
4.7.1 La région de Laurentides (y compris Montréal)	116
4.7.2 La région des Cantons de l'Est	118
4.7.3 La région de la ville de Québec	119
4.7.4 Vue d'ensemble de la région d'étude.....	119
5 CONCLUSIONS	121
BIBLIOGRAPHIE.....	125

<i>ANNEXE A.....</i>	<i>xvii</i>
<i>ANNEXE B.....</i>	<i>xxi</i>
<i>ANNEXE C.....</i>	<i>xxvii</i>
<i>ANNEXE D.....</i>	<i>xxviii</i>
<i>ANNEXE E.....</i>	<i>xxxiv</i>
<i>ANNEXE F.....</i>	<i>xxxvii</i>
<i>ANNEXE G.....</i>	<i>xxxviii</i>
<i>ANNEXE H.....</i>	<i>xli</i>
<i>ANNEXE I.....</i>	<i>xlvii</i>
<i>ANNEXE J.....</i>	<i>xlviii</i>

LISTE DE TABLEAUX

Tableau I Le régime annuel des principales variables climatiques à Montréal à Sherbrooke et à Québec (valeurs moyennes de la période 1971-2000)	16
Tableau II Principales caractéristiques des familles de scénarios SRES (Dessai et Hulme, 2001)	18
Tableau III. Variables atmosphériques Source :CICS	21
Tableau IV. Paramètres physiques du sol de la région du Lac Brome. Série du sol : Sol franc sableux Blandford (Cann, et al., 1948).....	26
Tableau V. Paramètres physiques du sol de la région de la ville de Montréal, terrain de golf Challenger. Série du sol : Terre franche sableuse Châteauguay (Lajoie et Baril, 1956)	26
Tableau VI. Seuils thermiques des espèces gazonnantes des régions tempérés (<i>cool season turfgrass</i>) (Beard, 1969).....	27
Tableau VII. Les températures et les précipitations moyennes mensuelles de la période 1961-1990 et de l'année 2004 dans la région du Sherbrooke.....	28
Tableau VIII. L'échelle de la gamme de saturation du sol (selon le manuel de la station Davis).....	28
Tableau IX. La quantité relative d'eau du sol à différentes profondeurs (par rapport à la masse totale du sol), terrain de golf Inverness, juillet – août 2004.....	29
Tableau X. Les valeurs moyennes mensuelles des précipitations (PRCP), évapotranspiration potentielle (PET), évapotranspiration (ET), et irrigation (IRGA) (critères de 4, 9, 10, 13 et 15 mm) dans la région du Lac Brome période janvier - octobre 2004.....	30
Tableau XI. Les températures et les précipitations moyennes mensuelles de la période 1971-2000 (station météo MONTREAL/PIERRE ELLIOTT TRUDEAU INTL A) et de l'année 2005 (club de golf Challenger, mai-septembre).....	32
Tableau XII. Les valeurs moyennes mensuelles de l'indice d'humidité du sol au Montréal (<i>en centibar</i>) à quatre profondeurs (0, 10, 20 et 30cm), mesurées par la station Davis pendant la période 22 avril – 20 octobre 2005.....	32
Tableau XIII. La quantité relative de l'eau en sol (par rapport à la masse totale de sol) aux différentes profondeurs, terrain de golf Challenger, mai - août 2005.....	33
Tableau XIV. Les valeurs moyennes mensuelles des précipitations (PRCP), évapotranspiration potentielle (PET), évapotranspiration (ET), et irrigation (IRGA) selon les données observées et les simulations d'EPIC à Montréal, période janvier - octobre 2005.....	34
Tableau XV. La fréquence d'irrigation (jours), Challenger 2005	35
Tableau XVI. Les paramètres physiques du sol de la région de Montréal. Série du sol: Argile St. Urbain (Lajoie et Baril, 1956)	43
Tableau XVII. Paramètres physiques du sol de la région du Sherbrooke. Série du sol: Sol franc sableux Blandford (Cann et al., 1948).....	44
Tableau XVIII. Paramètres physiques du sol de la région de Québec. Série du sol : Loam argileux à argile JOLY (Raymond et al., 1976).....	44
Tableau XIX. Les quantités moyennes mensuelles d'irrigation (les critères des 4, 9 et 13mm) sur les gazons du terrain de golf dans la région de Montréal, données observées 1961-1990	50

Tableau XX. Les mois avec des fluctuations importantes des taux d'irrigation (critère de 9 mm) et des précipitations par rapport aux moyennes dans la région de Montréal, période 1961-1990	52
Tableau XXI. Les quantités moyennes mensuelles d'irrigation (les critères des 4, 9 et 13mm) sur les gazons des terrains de golf dans la région de Sherbrooke données observées 1978-90	55
Tableau XXII. Les quantités moyennes mensuelles de l'eau (selon 3 critères) calculé d'être irrigué sur le gazon du terrain du golf dans la région de Québec en utilisant les données météo observées de la période 1961-1990	57
Tableau XXIII. Le régime mensuel des précipitations (PRCP, mm) et des températures moyennes (Tmoy, °C) à Montréal selon les projections futures de CGCM1, 3 périodes	61
Tableau XXIV. Les quantités moyennes mensuelles potentielles d'eau (selon le critère de 4mm) calculées pour irriguer les gazons des terrains de golf dans la région de Montréal pour 3 périodes	64
Tableau XXV. Les quantités moyennes mensuelles potentielles d'eau (selon le critère de 9mm) calculées pour irriguer les gazons des terrains de golf dans la région de Montréal pour 3 périodes	64
Tableau XXVI. Les quantités moyennes mensuelles potentielles d'eau (selon le critère de 13mm) calculées pour irriguer les gazons des terrains de golf dans la région de Montréal pour 3 périodes	64
Tableau XXVII. Le régime mensuel des précipitations (PRCP) et des températures moyennes (Tmoy) à Sherbrooke selon les projections futures de CGCM1, 3 périodes	67
Tableau XXVIII. Les quantités moyennes mensuelles d'eau (critère de 4mm) calculées pour irriguer les gazons des terrains de golf dans la région des Cantons de l'Est en utilisant les données du CGCM1	69
Tableau XXIX. Les quantités moyennes mensuelles d'eau (critère de 9mm) calculées pour irriguer les gazons des terrains de golf dans la région des Cantons de l'Est en utilisant les données du CGCM	70
Tableau XXX. Les quantités moyennes mensuelles d'eau (critère de 13mm) calculées pour irriguer les gazons des terrains de golf dans la région des Cantons de l'Est en utilisant les données du CGCM1	70
Tableau XXXI. Le régime mensuel des précipitations (PRCP, mm) et des températures moyennes (Tmoy, °C) à Québec selon les projections futures de CGCM1, 3 périodes	72
Tableau XXXII. Les quantités moyennes mensuelles d'eau (critère de 4mm) calculées pour irriguer les gazons des terrains de golf dans la région du Québec en utilisant les données du CGCM1	74
Tableau XXXIII. Les quantités moyennes mensuelles d'eau (critère de 9mm) calculées pour irriguer les gazons des terrains de golf dans la région du Québec en utilisant les données du CGCM1	75

Tableau XXXIV. Les quantités moyennes mensuelles d'eau (critère de 13mm) calculées pour irriguer les gazons des terrains de golf dans la région du Québec en utilisant les données du CGCM1.....	75
Tableau XXXV. Le régime mensuel des précipitations à Montréal selon les projections futures de HadCM3 SRES A2 et B2, 3 périodes	77
Tableau XXXVI. Le régime mensuel des températures moyennes à Montréal selon les projections futures de HadCM3 SRES A2 et B2, 3 périodes	78
Tableau XXXVII. Les valeurs relatives (%) des taux d'irrigation annuels pour les périodes 2010-2039 et 2040-2069 (par rapport à la période 1961-1990).....	81
Tableau XXXVIII. Le régime mensuel des précipitations (mm)à Sherbrooke selon les projections futures de HadCM3 SRES A2 et B2, 3 périodes	82
Tableau XXXIX. Le régime mensuel des températures moyennes (°C) à Sherbrooke selon les projections futures de HadCM3 SRES A2 et B2, 3 périodes	83
Table XL. Les valeurs relatives (%) des taux d'irrigation annuels pour les périodes 2010-2039 et 2040-2069 (par rapport à la période 1961-1990).....	87
Tableau XLI. Le régime mensuel des précipitations à Québec selon les projections futures de HadCM3 SRES A2 et B2, 3 périodes	90
Tableau XLII. Le régime mensuel des températures moyennes à Québec selon les projections futures de HadCM3 SRES A2 et B2, 3 périodes	90
Tableau XLIII. Les valeurs relatives (%) des taux d'irrigation annuels pour les périodes 2010-2039 et 2040-2069 (par rapport à la période 1961-1990).....	93
Tableau XLIV. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Montréal selon les données observées.....	99
Tableau XLV. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Montréal selon les projections de CGCM1	99
Tableau XLVI. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Montréal selon les données de HadCM3, scénario A2	99
Tableau XLVII. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Montréal selon les données de HadCM3, scénario B2.....	99
Tableau XLVIII. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Sherbrooke selon les données observées.....	102
Tableau XLIX. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Sherbrooke selon les projections de CGCM1	102
Tableau L. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Sherbrooke selon les données de HadCM3, scénario A2	102
Tableau LI. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Sherbrooke selon les données de HadCM3, scénario B2.....	102
Tableau LII. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Québec selon les données observées.....	105
Tableau LIII. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Québec selon les projections de CGCM1.....	105
Tableau LIV. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Québec selon les données de HadCM3, scénario A2	106

Tableau LV. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Québec selon les données de HadCM3, scénario B2.....	106
Tableau LVI. Les valeurs des indicateurs climatiques qui pourraient affecter la qualité du gazon et les conditions de jeu des golfeurs à Montréal selon les données observées	109
Tableau LVII. Les valeurs des indicateurs climatiques susceptibles d'affecter la qualité du gazon et les conditions de jeu des golfeurs à Montréal selon les projections de CGCM1.....	109
Tableau LVIII. Les valeurs des indicateurs climatiques susceptibles d'affecter la qualité du gazon et les conditions de jeu des golfeurs à Montréal selon les données de HadCM3, scénario A2	109
Tableau LIX. Les valeurs des indicateurs climatiques susceptibles d'affecter la qualité du gazon et les conditions de jeu des golfeurs à Montréal selon les données de HadCM3, scénario B2.....	110
Tableau LX. Les valeurs des indicateurs climatiques susceptibles d affecter la qualité du gazon et les conditions du jeu des golfeurs à Sherbrooke selon les données observées	112
Tableau LXI. Les valeurs des indicateurs climatiques susceptibles d'affecter la qualité du gazon et les conditions du jeu des golfeurs à Sherbrooke selon les projections de CGCM1	112
Tableau LXII. Les valeurs des indicateurs climatiques susceptibles d'affecter la qualité du gazon et les conditions du jeu des golfeurs à Sherbrooke selon les données de HadCM3, scénario A2	112
Tableau LXIII. Les valeurs des indicateurs climatiques susceptibles d'affecter la qualité du gazon et les conditions du jeu des golfeurs à Sherbrooke selon les données de HadCM3, scénario B2.....	113
Tableau LXIV. Les valeurs des indicateurs climatiques susceptibles d'affecter la qualité du gazon et les conditions du jeu des golfeurs à Québec selon les données observées..	114
Tableau LXV. Les valeurs des indicateurs climatiques susceptibles d'affecter la qualité du gazon et les conditions du jeu des golfeurs à Québec selon les projections de CGCM1	115
Tableau LXVI. Les valeurs des indicateurs climatiques susceptibles d'affecter la qualité du gazon et les conditions du jeu des golfeurs à Québec selon les données de HadCM3, scénario A2	115
Tableau LXVII. Les valeurs des indicateurs climatiques susceptibles d'affecter la qualité du gazon et les conditions du jeu des golfeurs à Québec selon les données de HadCM3, scénario B2.....	115
Tableau LXVIII. Le début, la fin et la durée de la saison de golf à Montréal selon les données observées.....	117
Tableau LXIX. Le début, la fin et la durée de la saison de golf à Montréal selon les sortis de CGCM1	117
Tableau LXX. Le début la fin et la duré de la saison de golf à Montréal selon les sortis de HadCM3, scénario A2	117
Tableau LXXI. Le début, la fin et la durée de la saison de golf à Montréal selon les sortis de HadCM3, scénario B2.....	117

Tableau LXXII. Le début, la fin et la durée de la saison de golf à Sherbrooke selon les données observées.....	118
Tableau LXXIII. Le début, la fin et la durée de la saison de golf à Sherbrooke selon les sortis de CGCM1	118
Tableau LXXIV. Le début, la fin et la durée de la saison de golf à Sherbrooke selon les sortis de HadCM3, scénario A2	118
Tableau LXXV. Le début, la fin et la durée de la saison de golf à Sherbrooke selon les sortis de HadCM3, scénario B2	119
Tableau LXXVI. Le début, la fin et la durée de la saison de golf à Québec selon les données observées.....	120
Tableau LXXVII. Le début, la fin et la durée de la saison de golf à Québec selon les sortis de CGCM1	120
Tableau LXXVIII. Le début, la fin et la durée de la saison de golf à Québec selon les sortis de HadCM3, scénario A2.....	120
Tableau LXXIX. Le début la fin et la durée de la saison de golf à Québec selon les sortis de HadCM3, scénario B2.....	120

<i>Tableau AI Les valeurs d'indice d'humidité du sol au Lac Brome (en centibar) à quatre profondeurs (0, 15, 30 et 50cm), établi par la station Davis pendant la période 21 juillet – 24 août 2004.....</i>	<i>xx</i>
---	-----------

LISTE DES FIGURES

Figure 1 . Les familles de scénarios du SRES 2000	19
Figure 2. Station Davis (terrain de golf Inverness, Lac Brome, été 2004)	24
Figure 3. Station Davis (terrain de golf Challenger, Montréal été 2005)	25
Figure 4. Les PRCP ¹ , PET ² , ET ³ et IRGA ⁴ (critère de 10mm) au Lac Brome, année 2004 30	
Figure 5. Les PET, PRCP, déficit hydrique (DH), IRGA réelle et IRGA calculé par le modèle EPIC (critères de 4, 9, et 13mm).....	35
Figure 6. Les taux moyens mensuels d'irrigation pour la région de Montréal (les critères de 4, 9 et 13 mm), données observées 1961-1990	49
Figure 7. Irrigation prévue, critère de 9 mm, avec 4 (IRGA 4par) et 6 paramètres (IRGA 6par) pour la région de Montréal, 1961-1990 (données observées)	53
Figure 8. Les taux moyens mensuels d'irrigation pour la région de Sherbrooke (les critères de 4, 9 et 13 mm), données observées 1961-1990	54
Figure 9. Les taux moyens mensuels d'irrigation pour la région de Québec (les critères de 4, 9 et 13 mm), données observées 1961-1990	57
Figure 10. La température moyenne à Montréal pendant trois périodes (données de CGCM1 après la réduction de l'échelle spatiale)	59
Figure 11. Les précipitations à Montréal pendant trois périodes (données de CGCM1 après la réduction de l'échelle spatiale)	60
Figure 12. Déficit hydrique à Montréal pendant trois périodes à l'étude selon le scénario CGCM1	60
Figure 13. Irrigation prévue (critère de 4mm), Montréal, CGCM1, 3 périodes	60
Figure 14. Irrigation prévue (critère de 9mm), Montréal, CGCM1, 3 périodes	62
Figure 15. Irrigation prévue (critère de 13mm), Montréal, CGCM1, 3 périodes	63
Figure 16. La température moyenne à Sherbrooke pendant trois périodes (données de CGCM1 après la réduction d'échelle spatiale)	65
Figure 17. Les précipitations à Sherbrooke pendant trois périodes (données de CGCM1 après la réduction d'échelle spatiale).....	66
Figure 18. Déficit hydrique à Sherbrooke, CGCM1	66
Figure 19. Irrigation prévue (critère de 4mm) Sherbrooke CGCM1, 3 périodes	68
Figure 20 Irrigation prévue (critère de 9mm) Sherbrooke CGCM1, 3 périodes	68
Figure 21. Irrigation prévue (critère de 13mm) Sherbrooke CGCM1, 3 périodes	68
Figure 22. La température moyenne à Québec pendant trois périodes (données de CGCM1 après la réduction d'échelle spatiale).....	71
Figure 23. Les précipitations à Québec pendant trois périodes (données de CGCM1 après la réduction d'échelle spatiale)	71
Figure 24. Déficit hydrique à Québec CGCM1, 3 périodes	72
Figure 25. Irrigation prévue (critère de 4mm) Québec CGCM1, 3 périodes.....	73
Figure 26. Irrigation prévue (critère de 9mm) Québec CGCM1, 3 périodes.....	74
Figure 27. Irrigation prévue (critère de 13mm) Québec CGCM1, 3 périodes.....	74
Figure 28. Température moyenne mensuelle pour les trois périodes à l'étude pour la station de Montréal selon le scénario HadCM3 A2.....	76
Figure 29. Précipitation moyenne mensuelle pour les trois périodes à l'étude pour la station de Montréal selon le scénario HadCM3 A2.....	77
Figure 30. Déficit hydrique moyen mensuel pour les trois périodes à l'étude pour la station de Montréal selon le scénario HadCM3 A2.....	77

Figure 31. Température moyenne mensuelle pour les trois périodes à l'étude pour la station de Montréal selon le scénario HadCM3 B2	78
Figure 32. Précipitation moyenne mensuelle pour les trois périodes à l'étude pour la station de Montréal selon le scénario HadCM3 B2	79
Figure 33. Déficit hydrique moyen mensuel pour les trois périodes à l'étude pour la station de Montréal selon le scénario HadCM3 B2	79
Figure 34. Irrigation prévue (selon le critère de 4mm) pour la région de Montréal en utilisant les sorties de HadCM3 A2 et B2 pour 3 périodes	80
Figure 35. Irrigation prévue (selon le critère de 9 mm) pour la région de Montréal en utilisant les sorties de HadCM3 A2 et B2 pour 3 périodes	81
Figure 36. Irrigation prévue (selon le critère de 13 mm) pour la région de Montréal en utilisant les sorties de HadCM3 A2 et B2 pour 3 périodes	81
Figure 37. Température moyenne mensuelle à Sherbrooke pendant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 A2	83
Figure 38. Précipitation moyenne mensuelle à Sherbrooke pendant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 A2	84
Figure 39. Déficit hydrique à Sherbrooke pendant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 A2	84
Figure 40. Température moyenne mensuelle à Sherbrooke pendant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 B2	85
Figure 41. Précipitation moyenne mensuelle à Sherbrooke pendant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 B2 Sherbrooke HadCM3 B2	85
Figure 42. Déficit hydrique à Sherbrooke pendant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 B2	86
Figure 43. Irrigation prévue (selon le critère de 4mm) pour la région de Sherbrooke en utilisant les sorties de HadCM3 A2 et B2 pour 3 périodes	86
Figure 44. Irrigation prévue (selon le critère de 9 mm) pour la région de Sherbrooke en utilisant les sorties de HadCM3 A2 et B2 pour 3 périodes	87
Figure 45. Irrigation prévue (selon le critère de 13 mm) pour la région de Sherbrooke en utilisant les sorties de HadCM3 A2 et B2 pour 3 périodes	87
Figure 46. Température moyenne mensuelle à Québec durant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 A2	88
Figure 47. Précipitation moyenne mensuelle à Québec durant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 A2	88
Figure 48. Déficit hydrique moyen mensuel à Québec pendant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 A2	89
Figure 49. Température moyenne mensuelle à Québec durant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 B2	91
Figure 50. Précipitations moyenne mensuelle à Québec durant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 B2	92
Figure 51. Déficit hydrique moyen mensuel moyenne mensuelle à Québec durant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 B2	92
Figure 52. Irrigation prévue (selon le critère de 4mm) pour la région du Québec en utilisant les sorties de HadCM3 A2 et B2 pour 3 périodes	93

Figure 53. Irrigation prévue (selon le critère de 9mm) pour la région du Québec en utilisant les sorties de HadCM3 A2 et B2 pour 3 périodes.....	94
Figure 54. Irrigation prévue (selon le critère de 13mm) pour la région du Québec en utilisant les sorties de HadCM3 A2 et B2 pour 3 périodes.....	94
Figure 55. Les tendances futures des taux d'irrigation (en % par rapport au 1961-1990) pour la région de Montréal selon les résultats du couplage du modèle EPIC (critère de 9mm) au CGCM1 et au HadCM3	95
Figure 56. Les tendances futures des taux d'irrigation (en % par rapport au 1961-1990) pour la région de Sherbrooke selon les résultats du couplage du modèle EPIC (critère de 9mm) au CGCM1 et au HadCM3	96
Figure 57. Les tendances futures des taux d'irrigation (en % par rapport au 1961-1990) pour la région de Québec selon les résultats du couplage du modèle EPIC (critère de 9mm) au CGCM1 et au HadCM3	96
Figure A1. Radiation solaire: résultats des régressions Lennoxville – indépendante et Lac Brome - dépendant	xvii
Figure A2. Température maximale: résultats des régressions Sherbrooke - indépendant et Lac Brome - dépendant	xviii
Figure A3. Température minimale: résultats des régressions Sherbrooke – indépendant et Lac Brome - dépendant	xviii
Figure A4. Les précipitations: résultats de la régression linéaire Sherbrooke - indépendant et Lac Brome - dépendant.....	xviii
Figure A5. Humidité relative: résultats des régressions Sherbrooke – indépendant et Lac Brome - dépendant	xix
Figure A6. Vitesse du vent: résultats des régressions Sherbrooke – indépendant et Lac Brome - dépendant	xix
Figure C 1. Régressions du Δ IRGA (<i>critère de 9mm</i>) et du Δ PRCP, région de Montréal, 1961-1990.....	xxvii
Figure C 2. Régressions du Δ IRGA (<i>critère de 9mm</i>) et du Δ PET région de Montréal, 1961-1990.....	xxvii
Figure F.1. Régressions du Δ IRGA (<i>critère de 9mm</i>) et du Δ PRCP, région des Cantons de l'Est, 1978-1990	xxxvii
Figure F.2. Régressions du Δ IRGA (<i>critère de 9mm</i>) et du Δ PET, région des Cantons de l'Est, 1978-1990	xxxvii
Figure I.1. Régressions du Δ IRGA (<i>critère de 9mm</i>) et du Δ PRCP, région du Québec, 1961-1990.....	xlvii
Figure I.2. Régressions du Δ IRGA (<i>critère de 15mm</i>) et du Δ PET région du Québec, 1961-1990.....	xlvii

LISTE DE SIGLES ET DES SYMBOLES

CC	Capacité au champ
CDD5	Cold degree – days < 5°C
CCmaC	Centre Canadien de la Modélisation et de l'Analyse Climatique
CICS	Canadian Institute for Climate Studies
CGCM1	Modèle climatique canadien de première génération
CO ₂	Dioxyde de carbone
Da	Densité apparente
DD0	Degree – days > 0°C
DH	Déficit hydrique
DJC	Degrés jours croissance
EPIC	Erosion Productivity Impact Calculator
ET	Évapotranspiration
FH COLD	Accumulated CDD5 during hardening (fall season)
FH RAIN	Rate of rainfall accumulation during hardening (fall season)
GES	Gaz à effet de serre
HadCM2	Modèle climatique britannique de seconde génération
HadCM3	Modèle climatique britannique de troisième génération
IPPC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRGA	Irrigation
IS92a	Scénario de concentrations futures de GES et d'aérosols
LAI	Leaf area index
MAX	Maximum
MCGAO	Modèle de circulation générale couplés atmosphère-océan
MIN	Minimum
MOY	Moyen
n	Durée de l'ensoleillement
N	Durée astronomique de la journée
PET	Évapotranspiration potentielle
PMP	Point de flétrissement

PRCP	Précipitations atmosphériques
Qs	Radiation solaire
Qo	Radiation solaire reçue aux limites supérieures de l'atmosphère
SDSM	Statistical DownScaling Model
SRES	Special Report on Emissions Scenarios
T	Température
W COLD	Difference between days of snow cover and cold period
W RAIN	Rate of rainfall accumulation during cold period
W THAW	Rate of DD0 accumulation during cold period

REMERCIEMENTS

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de recherche, Bhawan Singh, d'avoir accepté de diriger la présente étude. Pendant ces deux années, ses conseils éclairés, ses encouragements et la confiance qu'il m'a accordée ont été pour moi une aide et un appui considérable. Je le remercie également de m'avoir fait découvrir les aspects pratiques de la climatologie lors des stages de climatologie en Gaspésie, les bons moments de qui resteront inoubliables.

Je suis très honoré que les professeurs Christopher Bryant et Thora Martina Herrmann, respectivement président – rapporteur et membre du jury, aient accepté d'évaluer le présent mémoire. Je leur en suis sincèrement reconnaissant.

Un merci particulier à M. Jimmy Williams de *Blackland Research Center* du Texas, pour l'aide très précieuse avec le modèle EPIC. Sans son appui, cette étude n'aurait pas pu être réalisée sous sa présente forme.

Un grand merci à Me Anne Debrabandere de Consortium Ouranos sur les changements climatiques, pour sa gentillesse de m'avoir aidé d'acquérir certaines données climatiques.

Je remercie, également, le *Natural Resources Canada* et le Consortium Ouranos pour le fait d'avoir financé le projet global « Impact des changements climatiques sur le ski et le golf au Québec ».

Un immense merci à toutes les personnes de l'équipe de laboratoire de climatologie qui étaient totalement mobilisées pour découvrir les impacts des changements climatiques sur divers secteurs de l'économie du Québec notamment à Kénel Delusca, Călin Obretin, Marylène Savoie et Gabriel Garcia Herrera.

Finalement, je voudrais remercier cordialement ma femme Maria et mes enfants Elena et Anna-Diana pour leur patience tout au long de mes études de maîtrise. Merci de m'avoir compris et encouragé lors des moments les plus difficiles.

Vă mulțumesc și vă iubesc foarte mult!

INTRODUCTION

Le temps et le climat ont une influence profonde sur la vie sur terre. Le temps est l'état de l'atmosphère dans une certaine région à un certain moment tandis que le climat est "le temps moyen", souvent à une échelle de temps plus grande. Le climat de la terre a été soumis à des changements importants, en particulier pendant la deuxième partie du dernier siècle. Ces changements climatiques désignent une variation statistiquement significative de l'état moyen du climat ou de sa variabilité, persistant pendant de longues périodes. Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes et externes ou à des changements anthropiques modifiant la composition de l'atmosphère (IPPC, 2001).

Le réchauffement des couches inférieures de l'atmosphère est provoqué par l'augmentation des gaz à effet de serre. Ces derniers absorbent le rayonnement infrarouge émis par la surface de la terre, par l'atmosphère elle-même et par les nuages. En conséquence, l'atmosphère émet une quantité plus élevée d'énergie sous forme de rayonnement infrarouge vers la surface de la terre et les gaz à effet de serre retiennent la chaleur dans le système surface - troposphère. Ce phénomène d'effet de serre naturel est amplifié par les activités humaines qui produisent des gaz à effet de serre supplémentaires suite au chauffage et à la climatisation des immeubles, à l'énergie utilisée chez soi et au travail, aux véhicules transportant passagers et marchandises, à l'énergie nécessaire pour les processus industriels et pour la plupart de nos gestes quotidiens consommant de l'énergie.

Plusieurs projections climatiques prévoient des augmentations de la température et des modifications de la précipitation, pendant les prochains 50 à 100 ans. En effet, l'élévation probable de la température du globe sera de 1,4⁰C à 5,8⁰C d'ici 2100. (IPPC, 2001). Face à un tel scénario de changement des conditions climatiques au cours des prochaines décennies, nous pouvons nous demander quelles seront les conséquences au Québec pour l'environnement et pour les secteurs prioritaires de notre économie (la production d'hydroélectricité, l'industrie forestière, les secteurs agroalimentaire et le tourisme) ainsi que pour la santé et la qualité de vie de la population.

L'augmentation probable de la température pourrait entraîner de graves conséquences pour le Canada :

- Les sécheresses affectant l'agriculture dans toutes les régions ;
- La baisse des niveaux d'eau des Grands Lacs et du Fleuve Saint-Laurent ;
- Les feux de forêt ;
- La réduction des pêches marines ;
- La fonte du pergélisol et l'affaissement des infrastructures dans les zones nordiques ;
- L'accroissement des vagues de chaleur : la baisse de la qualité de l'air ; les problèmes de santé ;
- L'impact sur le tourisme;
- L'impact sur l'industrie du golf et du ski.

En ratifiant le Protocole de Kyoto, le Canada en collaboration avec les Canadiens et les Canadiennes et la communauté mondiale s'oblige à diminuer les émissions des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. (ENVIRONNEMENT CANADA [[http/](#)], 2005).

Dans le cadre de cette étude, l'approche préconisée pour évaluer les impacts potentiels d'un réchauffement climatique sur les espèces de gazon est celle du couplage des modèles climatiques à un modèle de culture. Les modèles climatiques choisis, de type modèle de circulation générale couplés atmosphère-océan (MCGAO), sont ceux du Centre Canadien de la Modélisation et de l'Analyse Climatique (CCmaC) et du Centre britannique Hadley. Il s'agit du modèle climatique canadien de première génération CGCM1 (Boer et al., 2000) et du modèle climatique britannique de troisième génération HadCM3 (Gordon et al., 2000; Pope et al., 2000).

Les sorties climatiques, réduites à l'échelle locale à l'aide de SDSM, des deux MCGAO, dont les températures minimale et maximale, les précipitations et le rayonnement solaire, sont utilisées comme données d'entrées dans le modèle de culture EPIC (*Erosion Productivity Impact Calculator*) (Williams et al., 1984). Cela permet d'estimer les

conditions hydriques et les besoins d'irrigation dans les trois régions du sud du Québec pour deux périodes futures soit de 2010 à 2039 et de 2040 à 2069, par rapport à la période de contrôle, 1961 à 1990.

Le présent mémoire se présente de la façon suivante. Suite à cette introduction, le premier chapitre est une revue de littérature. Il contient les bases théoriques associées particulièrement aux impacts des conditions climatiques sur le développement des espèces gazonnantes ainsi qu'une brève analyse des études antérieures. Le chapitre suivant présente la problématique, l'hypothèse et les objectifs de la recherche. Le troisième chapitre reflète la méthodologie utilisée pour réaliser cette étude. Il décrit les modèles employés, la région d'étude, les variables climatiques étudiées, les méthodes élaborées pour identifier la durée de la saison de golf ainsi que les indicateurs climatiques et agoclimatiques. La description et la discussion des résultats se retrouvent dans le chapitre suivant. Finalement, une conclusion générale concernant la méthodologie, les résultats et la discussion termine ce travail de recherche.

1 REVUE DE LA LITTÉRATURE

Ce chapitre se divise en deux parties. La première partie aborde les considérations théoriques en lien avec les conditions de développement et de croissance des espèces gazonnantes ainsi que les situations climatiques critiques comme les stress hydriques et thermiques. La deuxième partie est en rapport avec les études antérieures qui présentent un certain point de similitude avec la présente.

1.1 LA VARIABILITÉ DU CLIMAT ET LA «SANTÉ» DU GAZON DES TERRAINS DE GOLF

Les conditions climatiques influencent grandement la croissance et le développement des espèces gazonnantes. Dans l'Amérique du Nord, plusieurs chercheurs (Beard, 1964, 1969, 1973, 1982 ; Dione, 2001, 2004 ; Tompkins, 1997, 2000, 2004 ; Vargas, 2004) ont réalisé des études sur l'état du gazon ainsi que sur les conditions météorologiques qui déterminent la croissance et les processus physiologiques des verts de gazon.

Les informations sur les conditions de développement et de croissance des espèces gazonnantes contenues dans les sous-sections suivantes proviennent principalement du travail de Beard (1973).

1.1.1 LE CLIMAT DE LA PÉRIODE DE CROISSANCE DES ESPÈCES GAZONNANTES

1.1.1.1 Le régime thermique

La germination, la croissance et le développement des espèces de gazon dépendent directement de la température ambiante. Les écarts de température par rapport à celle optimale réduisent la croissance jusqu'au moment qu'elle cesse. Les plantes subissent la mort lorsque le protoplasme est détruit. L'activité biologique des espèces gazonnantes se réduit drastiquement lorsque la température de l'air dépasse 52°C ou est inférieure à 0°C. Les taux de croissance et de développement, pour plusieurs espèces, sont optimaux entre 5°C et 41°C. La croissance de la racine de l'agrostide traçante (*creeping bentgrass*) s'inhibe lorsque la température du sol dépasse 25°C (Lucas, 1995; Beard et Sifers, 1997) et

par conséquent, limite la circulation de l'eau et des nutriments vers les pousses (Kramer, 1983) et perturbe le mouvement des substances synthétisées vers les racines (Kuroyanagi et Paulsen, 1988).

Dans les régions avec un climat tempéré frais, y compris le sud-est du Canada, se trouvent typiquement les espèces gazonnantes des régions tempérés (*cool season turfgrasses*) dont les espèces des genres Pâturin (*Poa L.*), Agrostide (*Agrostis L.*) et Fétuque (*Festuca L.*) (Beard, 1973, Dione, 2001). Ces espèces connaissent un développement optimal lorsque les températures de l'air se trouvent entre 16 et 24°C et celles du sol varient entre 10 et 18°C. Dans le monde sont connues environ de 20 espèces de gazon qui croissent dans régions tempérés et qui sont originaires de l'Eurasie.

Les espèces de gazon sont exposées assez souvent, surtout pendant le mi-été, aux **stress thermiques**. De plus, durant cette période l'intensité de l'utilisation des terrains de golf est très élevée. Les dommages pendant la période estivale des espèces gazonnantes représentent l'effet synergique de la chaleur, de l'achalandage élevé, de la déshydratation des plantes et des maladies de gazon. De ces quatre éléments, il est plus difficile d'empêcher ou de contrôler le stress thermique, c'est-à-dire le dommage provoqué par les hautes températures. Durant l'été, les principaux facteurs de stress des espèces du genre l'Agrostide sont les températures de l'air et du sol plus élevées que celles optimales (Carrow, 1996). Xu et Huang (2000) montrent que le stress thermique (en air et au sol) cause une baisse importante de la qualité, de la croissance et de l'activité photosynthétique de l'agrostide traçante. Par contre, les mêmes chercheurs établissent que cette espèce se développe très bien quand la température de l'air et du sol se situe autour de 20°C.

Les températures plus élevées que la normale peuvent provoquer des stress directs ainsi que des stress indirects. Les séquelles du stress direct sont la destruction des tissus par la chaleur qui peut provoquer par la suite la mort des plantes. Les conséquences du stress thermique indirect sont: la maturation de la racine suivie par la mort de celle-ci; le déclin de la croissance des pousses qui conduit à une réduction de la longueur et de la largeur des feuilles, et donc de l'indice de surface foliaire. De plus, la mort des racines favorise la

multiplication des microbes associée à une augmentation de la respiration qui à son tour contribuera à la réduction des taux de la concentration d'oxygène dans le sol (Kuzyakov et al., 2001). On constate que l'agrostide traçante (*Agrostis palustris*) a une tolérance à la chaleur plus élevée que le pâturin annuel (*Poa annua* L.). Aucune technique des pratiques culturales n'est pas capable d'éliminer complètement les stress des verts de gazon provoqués par les hautes températures. Les pratiques agricoles qui pourraient diminuer ces dommages sont: l'utilisation des espèces plus résistantes à la chaleur; l'augmentation de la taille de tonte du gazon; l'irrigation plus fréquente; l'amélioration de la circulation de l'air.

1.1.1.2 Le régime hydrique

Les plantes absorbent de l'eau en quantité bien plus grande que n'importe quelle autre substance exigée de celles-ci pour la croissance. Cependant, seulement entre 1 et 3% de la quantité de l'eau absorbée est utilisée effectivement dans les processus métaboliques de la plante. La quantité d'eau absorbée dépend de la profondeur et de la densité des racines, de la quantité d'eau disponible au niveau de la racine, de la longueur totale de la racine, du taux de transpiration et de la température du sol. Dans le processus de transpiration le stomate joue un rôle primordial. Bien que composant seulement 2 à 3% de l'indice de surface foliaire (*leaf area index* (LAI)) de la plante, les stomates sont responsables de presque 90% de la quantité totale d'eau perdue par la transpiration. Le taux d'évapotranspiration est déterminé par la durée du jour, par la température, par la pression de vapeur d'eau et par la vitesse du vent.

La quantité d'eau nécessaire pour la croissance normale est définie par le volume d'eau exigé pour la croissance des plantes gazonnantes à qui s'ajoute l'eau perdue par l'évapotranspiration. Le besoin en eau, dans la plupart de régions, est maximale, généralement, durant le mi-été. La quantité d'eau optimale, demandée pour la croissance que pour le développement des plantes, varie d'une espèce à l'autre et même d'un cultivar à l'autre. Certaines pratiques culturales peuvent influencer la quantité d'eau utilisée par les plantes. Par exemple, le taux d'utilisation de l'eau accroît tandis que la taille de tonte du gazon augmente elle aussi. Cependant, la tonte très courte réduit la croissance des racines de l'agrostide traçante (Beard et Daniel, 1965; Salaiz et al., 1995) et augmente la sensibilité

aux stress thermique et hydrique (Madison, 1962). Pendant les mois d'été, fréquemment, se produisent des déficits hydriques déterminés par la balance négative entre l'eau absorbée et celle transpirée. Le manque d'eau, en certain cas, stimule le développement des maladies (*le Pythium*, par exemple). Le déficit d'eau peut conditionner *le flétrissement* (*wilting*) des organes aériens de la plante. Ceci peut se produire à n'importe quel moment pendant la période de croissance, mais la probabilité augmente vers le mi-été. Les conditions climatiques qui favorisent la transpiration et par la suite le flétrissement des espèces gazonnantes sont: les températures élevées, le vent, le rayonnement solaire et les taux faibles d'humidité de l'air. L'absorption de l'eau peut être rendu difficile par deux causes : tout d'abord, d'une quantité insuffisante de l'humidité disponible au sol et, aussi, d'un système racinaire limité. Les espèces gazonnantes, caractérisées par des racines peu profondes, ont une plus grande prédisposition à se faner. L'enracinement insuffisant est conditionné par le manque d'aération, le tassement du sol, la fertilisation excessive à l'azote et la concentration élevée des sels solubles en sol.

Les plus résistantes à la sécheresse (excellente tolérance) sont les espèces gazonnantes des genres cultivés dans les régions avec un climat chaud: *Zoysia*, *Cynodon*. Ceux-ci sont suivis des espèces du genre de la *Fétuque* (bonne tolérance). Quelques espèces du genre *Poa* (*Poa pratensis*, *Poa compressa*) ont une tolérance moyenne tandis que celles du genre de l'*Agrostide* (*Agrostis stolonifera*) ont une faible tolérance.

Suite à un stress double (stress thermique et stress hydrique) les variétés du *Poa pratensis* (Kentucky bluegrass) se récupèrent plus rapidement lorsqu'on les irrigue (Wang et Huang 2004). Plusieurs chercheurs recommandent de diminuer la fréquence des irrigations et d'augmenter les taux d'eau prévue pour irrigation afin d'arroser une couche plus profonde du sol (Madison et Hagan, 1962; Beard, 1973). En effet, les irrigations moins fréquentes favorisent un bon développement des racines (Bennett et Doss, 1960) de même qu'une densité plus élevée des pousses et une longueur plus grande des racines (Jordan et al., 2003). De plus, les plantes qui sont rarement irriguées développent des caractéristiques physiologiques particulières. Ainsi, elles demandent une quantité plus petite d'eau afin d'accomplir leurs nécessités liées au processus d'évapotranspiration (Brian et al., 1981).

Un surplus d'eau causé par des facteurs naturels (les précipitations abondantes, la présence des nappes phréatiques près de la surface) ou par des facteurs anthropiques (les irrigations excessives) est capable, aussi, d'endommager le gazon: l'occurrence de certaines maladies, la formation des algues, l'accumulation des chaumes (Jordan et al., 2003), le tassement du gazon. La tolérance des espèces gazonnantes aux conditions submersibles varie d'une espèce à l'autre. Ainsi, est constaté que l'agrostide traçante a une tolérance aux conditions submersibles excellente tandis que le pâturin annuel a une tolérance plus faible.

1.1.2 LE CLIMAT ET LA PERIODE LATENTE (HIVERNALE) DES ESPECES GAZONNANTES

Le climat hivernal peut endommager les espèces gazonnantes lorsque les températures basses causent des **stress thermiques**. La glace, causée par des certaines conditions climatiques, peut couvrir le gazon totalement ou partiellement, représentant le deuxième facteur qui attaque le gazon durant la période froide de l'année (Tompkins, 2004). Les dommages directs du régime thermique impliquent la formation des cristaux de glace d'une nature intracellulaire ou extracellulaire. La formation des cristaux de glace intracellulaire détermine une interruption mécanique de la structure protoplasmique et, par la suite, la mort possible du tissu. Le givrage extracellulaire amène à la diffusion de l'eau de l'intérieur des cellules vers l'espace extracellulaire en raison de la pression plus petite de la glace que celle du liquide. Par conséquent, il y a une déshydratation à cause du gel. La détérioration de la santé du gazon, suite à une couverture de glace, peut être conditionnée par les conditions de gel - dégel et par la grande concentration d'humidité dans les parties aériennes des plantes (Beard, 1964a), par la suffocation (Rochette et al., 2000), par la diminution de l'endurcissement (Olien et Smith, 1981), ou par une combinaison de plusieurs de ces facteurs (Tompkins, 2004).

L'agrostide traçante a une tolérance plus élevée face aux températures basses ainsi qu'à la couche de glace que le pâturin annuel (Tompkins, 2004). Il est préférable de garder la couverture de neige le plus longue possible, car cela maintiendra la dormance des plantes et par conséquent assurera une bonne qualité du gazon (Tompkins, 2000).

1.2 ÉTUDES ANTÉRIEURES

Jusqu'à maintenant, il existe très peu des recherches sur les impacts potentiels des changements climatiques sur l'industrie de golf. Pourtant, il y a un nombre réduit d'études qui présentent un certain point de similarité avec la présente étude. Les résultats les plus pertinents pour la présente recherche sont décrits ici. La pertinence des résultats est établie en fonction de la méthodologie suivante: les articles choisis ont tous des points tangibles par rapport au présent soit par l'approche méthodologique, soit par le type de cultures étudiées, soit par les modèles climatiques ou par le modèle de culture utilisés, soit par la région d'étude.

Tout d'abord, c'est le travail de Bélanger et al. (2002) qui essaye de prédire les impacts des changements climatiques sur la survie hivernale des plantes fourragères pérennes dans l'est du Canada par la moyenne des indicateurs agroclimatiques. Ces dernières décrivent les dégâts de la période hivernale liés à l'acquisition et le maintien de l'endurcissement automnal, à l'intensité et la durée du froid, à la couverture nivale et à l'englacement et le déchaussement des racines. Les indicateurs agroclimatiques ont été calculés pour plusieurs régions du Canada, y inclus le sud du Québec, pour des conditions actuelles (1961-1990) et futures (2010-2039 et 2040-2069). Les chercheurs utilisent les sorties diagnostiques du CGCM1 du CCmaC. Selon cette recherche, dans le futur (2040-2069), la période d'endurcissement automnal serait plus courte de 4,0 jours et plus chaude de 17,6 degrés froids. La période froide ($T < -15^{\circ}\text{C}$) raccourcirait de 23,8 jours et le nombre de jours où le couvert de neige est d'au moins 0,1m serait réduit de 39,4 jours et, par conséquent, la durée de protection par la neige diminuerait de 15,7 jours. Leurs résultats semblent indiquer que les risques de dommages causés par l'hiver aux plantes fourragères pérennes augmenteraient à cause de conditions sous - optimales d'endurcissement automnal et surtout à cause d'une protection inadéquate fournie par la neige durant la saison froide. Toutefois, nous considérons que l'utilisation des projections climatiques futures des autres modèles climatiques aurait pu renforcer les résultats de cette recherche.

L'étude de Bootsma et al. (2004) présente des indicateurs agroclimatiques de la période chaude de l'année. Ceux-ci calculent les unités thermiques, le déficit hydrique et le degré d'aridité pour les principales régions agricoles de l'Ontario et du Québec pour le climat actuel (1961-1990) et pour trois périodes futures (2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099). Les auteurs utilisent les scénarios climatiques d'onze modèles de circulation générale qui tiennent compte d'un forçage par les GES basé sur le scénario d'émissions IS92a. Selon les résultats de cette étude, il est possible qu'on assistera à une augmentation importante des unités thermiques et de la durée de la saison de croissance pour les plantes fourragères dans toutes les périodes futures. En effet, durant la période entre 2070 et 2099, les unités thermiques augmenteraient de 1000 à 1200 DJC (degrés jours croissance) et la durée de la saison de croissance serait de 30 à 45 jours plus longue que pour la période actuelle. Les déficits hydriques accumulés pendant la période de croissance des plantes fourragères et des petites céréales du printemps présentent relativement peu de changements. Par contre, les résultats indiqueraient une augmentation de la demande à des fins d'irrigation dans la région d'étude. Cependant, le fait que cette recherche se base sur les données climatiques moyennes mensuelles, des températures et surtout des précipitations, pourrait augmenter l'incertitude des résultats.

Les deux études de Singh et al. (1996, 1998a), qui révèlent le rendement des cultures agricoles dans le futur, montrent aussi à une augmentation des besoins d'irrigation dans les années à venir, pour les principales régions agricoles du Québec.

L'étude de Lamothe et Périard (1988) montre une augmentation de la durée de la saison de golf suite à un réchauffement climatique durant la deuxième moitié du dernier siècle. En effet, les auteurs considèrent que la saison de golf débute lorsque le couvert de neige est complètement disparu et se termine à la dernière journée où la température moyenne atteint 10°C. Toutefois, cette méthode nécessite des ajustements parce que souvent il est possible qu'après une période sans neige au sol, durant printemps, on constate la formation d'une nouvelle couche de jusqu'à 15 cm (e.g. 1964, 1990 à Montréal) ou qu'après une période de refroidissement prolongée, pendant l'automne, il y a une occurrence des températures quotidiens moyennes de 10°C.

2 PROBLÉMATIQUE, HYPOTHÈSE ET OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

2.1 PROBLÉMATIQUE DE LA RECHERCHE

Gullett et Skinner (1992) ont examiné les températures à partir de 130 stations météorologiques à l'échelle du Canada et ont remarqué que les températures avaient augmenté significativement au cours du dernier siècle (1895 à 1991) : de près de 0,7°C. À l'échelle mondiale, les températures se sont élevées d'environ 0,5°C au cours des 100 dernières années (IPPC, 2001). La hausse des concentrations de gaz à effet de serre peut être à l'origine du réchauffement climatique du 20^e siècle ainsi qu'à l'origine de celui anticipé pour les prochaines années. Les changements climatiques prévus pour les prochains 50 à 100 ans se caractérisent par des augmentations de la température et par une modification des précipitations. Ainsi, selon plusieurs projections climatiques, la hausse probable de la température du globe pourrait être de 1,4°C à 5,8°C d'ici 2100. (IPPC, 2001). Notons que des amplitudes positives plus grandes de la température sont projetées pour les régions tempérées et arctiques.

Les espèces des gazons des terrains de golf des régions tempérées, y inclut le sud du Québec, sont assez susceptibles aux modifications des variables climatiques surtout aux variations des températures et des précipitations (Beard, 1973 ; Dione, 2001 ; Tompkins, 2004). Étant donné que plusieurs études (Bootsma et al., 2004 ; Singh et al., 1996 , 1998a) montrent que le changement climatique pourrait affecter certaines caractéristiques agroclimatiques telles le besoin en eau d'irrigation et les conditions de la survie hivernale de certaines cultures de ladite région une recherche sur l'impact potentiel d'un changement climatique sur les espèces gazonnantes s'imposera donc. De plus, l'étude de Lamothe et Périard (1988) indique que les conditions climatiques futures pourraient influencer même la pratique de golf dans le sud du Québec.

2.2 HYPOTHESE DE LA RECHERCHE

Il est fort probable, donc, que les conditions climatiques futures auront un impact potentiel sur les conditions de croissance et de développement des espèces gazonnantes et sur la durée de la saison de golf.

Notre hypothèse de recherche est que les impacts potentiels du changement climatique pourraient engendrer plusieurs modifications sur l'industrie du golf :

- des modifications des conditions hydriques surtout sur les besoins en irrigation du gazon des terrains de golf ;
- la dégradation de l'état du gazon des terrains de golf;
- la modification de la longueur de la saison de golf ;
- ainsi qu'un impact sur la pratique du sport au sud du Québec.

2.3 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

La présente étude a deux objectifs principaux. D'une part, elle cherche à évaluer les impacts possibles d'un réchauffement climatique sur les conditions hydriques des espèces gazonnantes des terrains de golf dans trois régions du sud du Québec: Les Laurentides y compris la région de Montréal, Les Cantons de l'Est et la région de Québec. D'autre part, l'étude cherche à estimer les impacts possibles d'un changement climatique sur la «santé» du gazon des terrains de golf ainsi que sur la pratique de golf, dans les mêmes régions géographiques.

Plus spécifiquement seront abordées les questions liées au régime de l'irrigation caractérisé par son volume et sa fréquence. L'étude prévoit aussi la validation d'un modèle de culture au moyen duquel seront simulées les caractéristiques du régime d'irrigation. Elle vise pareillement d'estimer les caractéristiques agroclimatiques de la période d'endurcissement automnale des espèces de gazon ainsi que les conditions climatiques hivernales qui déterminent la robustesse de ceux-là. Seront élaborés également des indices climatiques afin d'évaluer l'état physique du gazon autant durant l'été que pendant l'hiver. L'étude vise aussi l'élaboration d'une méthodologie d'estimation des dates du début et de la fin de

la saison golfable pour apprécier la variation de la durée de celle-ci dans le futur. Finalement, des indicateurs climatiques seront élaborés pour caractériser l'impact des changements climatiques sur l'achalandage des clubs de golf ainsi que sur la qualité du sport.

L'exploration de ces problèmes se justifie par le fait qu'il est nécessaire d'éviter les difficultés possibles engendrées par l'épuisement des ressources en eaux suite au réchauffement climatique. De plus, le choix de ces questions est motivé par le fait qu'il est important d'étudier les impacts possibles des changements climatiques sur l'état physique du gazon ainsi que sur la pratique de golf afin d'organiser des stratégies d'adaptation.

3 MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente les méthodes suivies pour atteindre les différents objectifs de la présente recherche. Après la présentation de la région de recherche, les différents modèles employés sont décrits : deux modèles de circulation générale couplée atmosphère - océan, un modèle de réduction statistique de l'échelle des données climatiques des grandes échelles ainsi qu'un modèle de culture. Dans les deux sous chapitres suivants sont abordées les données climatiques et celles des cultures utilisées. Finalement, le chapitre se termine avec la description des indicateurs agoclimatiques et climatiques employés.

3.1 LA RÉGION D'ÉTUDE

Dans cette étude sont examinés les impacts potentiels des changements climatiques sur les besoins en irrigation des cultures de gazon dans trois régions du sud du Québec: la région de Laurentides y compris Montréal, la région des Cantons de l'Est et la région de la ville de Québec.

Deux arguments motivent ce choix. Premièrement, dans tous les trois régions il y a une forte concentration de terrains de golf qui attire les joueurs des grandes villes: Montréal, Sherbrooke et Québec. Deuxièmement, les régions choisies sont assez éloignées les unes des autres ce qui donne des perspectives géographiques, climatiques et biophysiques variées. Par exemple, le tableau I indique que ces régions se caractérisent par des valeurs de variables climatiques assez différentes.

3.2 MODÈLES DE CIRCULATION GÉNÉRALE COUPLÉS ATMOSPHÈRE-OCÉAN (MCGAO)

À l'heure actuelle, les MCGAO sont reconnus comme étant les meilleurs outils d'analyse du climat (Lambert et Boer, 2001). Ils sont des représentations mathématiques en trois dimensions du système climatique. Les modèles climatiques tentent de reproduire le climat actuel en terme de moyenne et de variabilité et de produire des projections réalistes de l'état dans lequel ce climat pourrait se trouver lors de périodes futures (Flato et al., 2000).

Tableau I Le régime annuel des principales variables climatiques à Montréal à Sherbrooke et à Québec (valeurs moyennes de la période 1971-2000)

CARACTER.	STATIONS	JAN	FÉV	MAR	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOÛ	SEPT	OCT	NOV	DÉC	AN.
Tmoy, (°C)	Montréal¹	-10,4	-8,9	-2,4	5,7	13,3	17,9	20,9	19,5	14,4	7,9	1,6	-6,6	6,1
	Sherbrooke²	-11,9	-10,4	-3,9	4,1	11,1	15,5	18,1	16,9	12	6,1	-0,2	-8,1	4,1
	Québec³	-12,8	-11,1	-4,6	3,3	11,2	16,5	19,2	17,9	12,5	6,2	-0,7	-9,1	4,0
Tmax, (°C)	Montréal	-5,8	-4,3	2,1	10,7	18,9	23,3	26,3	24,7	19,5	12,5	5,3	-2,4	10,9
	Sherbrooke	-5,7	-3,9	2,1	9,9	18,1	22,1	24,7	23,3	18,3	11,9	4,4	-2,7	10,2
	Québec	-7,9	-6,1	0,1	7,8	17,1	22,2	25	23,4	17,7	10,7	2,9	-4,8	9,0
Tmin, (°C)	Montréal	-14,9	-13,4	-6,9	0,7	7,6	12,4	15,5	14,2	9,2	3,1	-2,2	-10,8	1,2
	Sherbrooke	-18	-16,7	-9,9	-1,7	4	8,8	11,4	10,4	5,6	0,3	-4,7	-13,5	-2,0
	Québec	-17,6	-16	-9,4	-1,3	5,3	10,6	13,4	12,4	7,2	1,7	-4,3	-13,4	-1,0
PRCP, (mm)	Montréal	70,4	59,7	72,2	76,1	75,5	84,4	90,1	94,2	91,3	77,6	93	82,3	967
	Sherbrooke	78,8	61,7	78,8	79,8	96,8	110,8	117,8	130	104,7	92,8	98,5	93,8	1144
	Québec	89,8	70,6	90,3	81,2	106,1	114,2	127,8	116,7	125,5	101,7	102	104,4	1230
Jour. avec Tmin < -20°C	Montréal	8,3	5	0,92	0	0	0	0	0	0	0	0	3,6	17,8
	Sherbrooke	13	10,9	4	0,04	0	0	0	0	0	0	0,3	7,4	35,7
	Québec	12,8	8,8	2,3	0	0	0	0	0	0	0	0,21	6,9	31,0
Jour. avec Tmax > 30°C	Montréal	0	0	0	0	0,67	1,3	3,4	1,9	0,29	0	0	0	7,6
	Sherbrooke	0	0	0	0	0,42	0,83	1,6	0,5	0,08	0	0	0	3,4
	Québec	0	0	0	0	0,63	1	2,2	0,72	0,08	0	0	0	4,6

Note :

¹ Station Montréal Pierre Elliotte Trudeau INTL A (45° 28' N ; 73° 45' O) altitude 35,70 m

² Station Sherbrooke A (45° 25' N ; 71° 40' O) altitude 241,40 m

³ Station Québec Jean Lesage INTL A (46° 48' N; 71° 22' O) altitude 74,40 m

Tmoy – température moyenne

Tmax – température maximale

Tmin – température minimale

PRCP – précipitations

Dans ce projet sont utilisées les données climatiques fournies par deux MCGAO: le modèle couplé de circulation générale canadien de première génération (CGCM1) du Centre Canadien de Modélisation et d'Analyse du Climat (CCmaC) et le modèle climatique couplé de circulation générale britannique (HadCM3). Deux arguments expliquent ce choix. Tout d'abord, le modèle climatique du CCmaC est mieux adapté aux conditions climatiques nord-américaines alors que le modèle du Centre Hadley est le plus utilisés par les scientifiques du monde parce qu'il possède une résolution plus fines qui assure de scénarios climatiques plus fiables. Ensuite, au moment de la réalisation de la présente étude, la technique de réduction d'échelle grossière des modèles climatiques

choisis, appelée SDSM (*Statistical DownScaling Model*), était celui qui offrait la possibilité de réduire l'échelle spatiale des données climatiques de ces deux modèles climatiques seulement.

3.2.1 LE MODÈLE CGCM1

Le sous - modèle atmosphérique du CGCM1 a une résolution horizontale d'environ $3,7^{\circ} \times 3,7^{\circ}$ et comporte 10 niveaux verticaux. Ce sous - modèle correspond à la deuxième version du modèle de circulation générale décrit par McFarlane et al. (1992). La composante océanique de ce modèle présente une résolution horizontale d'environ $1,8^{\circ} \times 1,8^{\circ}$ avec 29 niveaux verticaux à épaisseur variable. De cette manière, chaque cellule du modèle atmosphérique correspond à quatre cellules du modèle océanique. Le CGCM1 divise la grille de surface en trois domaines : la terre, les océans et les mers internes.

Le couplage des deux composantes de CGCM1 se réalise une fois quotidiennement par un échange entre leurs indices moyens journaliers. Le couplage est faite de la façon suivante: au début, le modèle océanique fonctionne tout seul pour une période de 4000 ans. En même temps, la composante atmosphérique fonctionne indépendamment pour 20 ans. Par la suite, les deux modèles sont couplés en utilisant les ajustements des flux et le modèle intégré, après une période d'adaptation, commence la véritable simulation à partir de l'an 1850 (Flato et al., 2000).

Nous avons exploité les données simulées de ce modèle utilisant le scénario GES+A où la concentration atmosphérique de gaz à effet de serre (GES) correspond à celle mesurée de 1900 jusqu'à 1996, avec une augmentation de 1% par an jusqu'à 2100 (scénario "IS92a"). L'effet direct des aérosols sulfatés (A) est aussi pris en compte. Le CGCM1 simule l'évolution du climat suite à l'augmentation du CO_2 atmosphérique et d'autres GES, et affiche les principales données climatiques affectant la croissance des plantes et donc du gazon (température, précipitation, radiation solaire) pour le climat futur. Aux fins de la présente étude, ce modèle de circulation générale gère les scénarios des changements climatiques pour deux périodes futures de 2010 à 2039 et de 2040 à 2069 ainsi que pour la période courante ou de référence de 1961 à 1990.

3.2.2 LE MODÈLE HADCM3

Le modèle climatique couplé de circulation générale HadCM3, (*Hadley Centre Coupled Model, version 3*) décrit par Gordon et al., (2000), a été développé au centre Hadley en Grande Bretagne. En comparaison avec la version précédente (HadCM2), ce modèle ne nécessite pas le raccord de flux (la chaleur "artificielle" additionnelle et le flux d'eau douce sur la surface d'océan) pour produire une bonne simulation. La résolution plus fine du sous- modèle océanique de HadCM3 est un facteur important.

Le sous-modèle atmosphérique de HadCM3 a une résolution horizontale de 2,5x3,75 degrés et comporte 19 niveaux à la verticale. La composante océanique de ce modèle présente une résolution de 1,25x1,25 degrés. Le couplage entre ces deux sous - modèles permet des échanges libres d'énergie et d'eau à l'interface air-mer (vent, évaporation - précipitation), donc sans réaliser des ajustements. Pour le présent projet, sont utilisées les données climatiques de HadCM3 simulées selon deux scénarios: SRES A2 et B2.

Tableau II Principales caractéristiques des familles de scénarios SRES (Dessai et Hulme, 2001)

CARACTERISTIQUES	SCÉNARIOS			
	A1	B1	A2	B2
Croissance démographique	Modérée	Modérée	Élevée	Modérée
Croissance économique	Rapide	Rapide	Lente	Modérée
Développement technologique	Rapide	Rapide	Lent	Modéré
Investissement	Elevés	Elevés	Faibles	Moyens
Développement culturel par :	Éducation	Conscience sociale et internationale	Valeurs familiales	Éducation
Institutionnalisation	Nationale et Internationale	Locale, nationale et internationale	Locale et régionale	Locale
Conscience environnementale	Moyenne	Élevée	Faible	Elevée
Hasse de température prévue pour 2050 (°C)	1,6	1,2	1,5	1,5
Hasse de température prévue pour 2100 (°C)	3,0	2,0	3,8	2,7

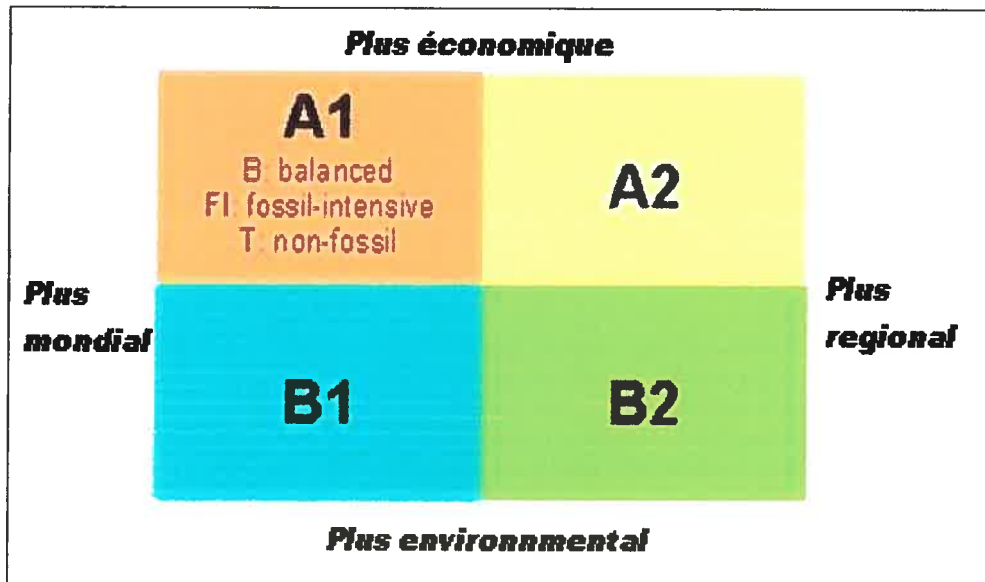


Figure 1 . Les familles de scénarios du SRES 2000

La figure 1 et le tableau II montrent que tous les deux scénarios choisis prévoient généralement un certain niveau de développement technologique avec des importantes différences régionales. Cependant, le scénario A2 est plus "pessimiste", que le B2. En effet, le scénario A2 suppose un maintien des augmentations des émissions de gaz à effet de serre à un taux équivalent à celui d'aujourd'hui. Quant au scénario B2, il considère une stabilisation des émissions des gaz à effet de serre.

3.3 LE MODÈLE DE MISE À ÉCHELLE STATISTIQUE SDSM

Le modèle SDSM (*Statistical DownScaling Model*) a été conçu par Wilby et al., (2002). Ce modèle aide les chercheurs travaillant dans le domaine de réchauffement climatique à réduire les données climatiques à grande échelle des MCGAO à une grille spatiale plus petite. Le SDSM fonctionne en combinant à la fois deux méthodes: des fonctions de transfert mathématiques (au moyen des régressions) et des générateurs stochastiques des données climatiques pour la période courante et pour le futur selon les scénarios de changements climatiques. Donc, il s'agit d'un modèle hybride qui combine deux types de méthodes.

L'information, exposée par la suite sur SDSM, est tirée principalement de manuel de l'utilisation du logiciel SDSM (Wilby et Dawson, 2004) et de l'article de référence (Wilby, et al., 2002). Le modèle SDSM réduit les données à l'échelle grossière du MCGAO au moyen de cinq étapes:

- 1 contrôle de la qualité des données;
- 2 choix des *predictors* potentiels ;
- 3 calibration du modèle;
- 4 validation du modèle;
- 5 génération des scénarios climatiques.

Le contrôle de la qualité des données permet l'identification d'erreurs et des valeurs manquantes dans la série des données observées.

Lors du *choix des predictors potentiels* les variables atmosphériques choisies sont mises en relation avec les valeurs des variables climatiques observées (*predictands*). Celles qui sont les mieux corrélées aux *predictands* en question sont retenues pour le processus de calibration du modèle. Les variables atmosphériques disponibles pour la réduction spatiale sont représentées dans le tableau III. Elles ont été développées parallèlement par deux centres de recherche: le NCEP (*National Center for Environmental Prediction*) et le NCAR (*National Center For Atmospheric Research*) (Kalnay et al., 1996). Pour le SDSM, les variables du tableau III ont été extraites de cette base de données par le CICS (*Canadian Institute of Climate Studies*) qui a réussi l'extrapolation aux point de grille de deux modèles, le CGCM1 et la HadCM3, et, par la suite, a créé une nouvelle base de données spécifique à SDSM.

Dans l'étape suivante, *la calibration du modèle*, les variables atmosphériques, choisies lors du choix des *predictors* potentiels sont utilisées pour réaliser plusieurs simulations des paramètres climatiques (les températures et les précipitations) pour la première moitié de la série de données disponibles. Ainsi, dans notre cas c'est pour la période 1961-1975. Ensuite, lors des relations entre les valeurs simulées (sous modèles) et les séries de données observées, les *predictors* accusant les plus fortes corrélations sont choisis. La deuxième partie de la série de données observées est utilisée pour la validation du modèle.

La *validation du modèle* permet de confirmer le réalisme du sous modèle sélectionné à partir de calibration. Pour cela, sont réalisées plusieurs simulations des paramètres climatiques (les températures et les précipitations) pour la deuxième partie de la période (1976-1990) à la moyenne des sous modèles de régression établis lors de calibration. Ensuite, après la comparaison entre les données observées et celles simulées, on détermine le sous modèle le plus précis. Notons que le SDSM permet de modifier les résultats des simulations en appliquant certaines fonctions. Par exemple, la fonction nommée «*corrections du biais*» permet de rapprocher la valeur de la température moyenne simulée de celle observée. Pour tester la performance du sous-modèle choisi, on simule les paramètres climatiques pour toute la période de référence et de cette façon, est obtenue la simulation de base.

Tableau III. Variables atmosphériques Source :CICS

VARIABLES ATMOSPHÉRIQUES	SYMBOLES
Pression moyenne au niveau de l'océan	mslp ¹
Température moyenne à 2m*	temp ¹
Humidité relative près de la surface	rhum ¹
Humidité spécifique près de la surface	sphu ²
Humidité spécifique à 500 hPa	s500 ¹
Humidité spécifique à 850 hPa	s850 ¹
Hauteur géopotentielle à 500 hPa	p500 ¹
Hauteur géopotentielle à 850 hPa	p850 ¹
Force de l'écoulement d'air à la surface	p_f ³
Force de l'écoulement d'air à 500 hPa	p5_f ⁴
Force de l'écoulement d'air à 850 hPa	p8_f ⁵
Vélocité zonale de surface	p_u ³
Vélocité zonale à 500 hPa	p5_u ⁴
Vélocité zonale à 850 hPa	p8_u ⁵
Vélocité méridionale de surface	p_v ³
Vélocité méridionale à 500 hPa	p5_v ⁴
Vélocité méridionale à 850 hPa	p8_v ⁵
Vorticité à la surface	p_z ³
Vorticité à 500 hPa	p5_z ⁴
Vorticité à 850 hPa	p8_z ⁵
Direction du vent à la surface	p_th ³
Direction du vent à 500 hPa	p5_th ⁴
Direction du vent à 850 hPa	p8_th ⁵
Divergence à la surface	p_zh ³
Divergence à 500 hPa	p5_zh ⁴
Divergence à 850 hPa	p8_zh ⁵

Les scénarios climatiques sont réalisés en appliquant les quatre procédures décrites ci-dessus sauf qu'on change les variables atmosphériques qui proviennent d'une part du CGCM1 et d'autre part du HadCM3 (via CICS). Pour chacun des modèles sont créés trois scénarios climatiques, un représentant la période actuelle (1961-1990) et deux - les périodes futures (2010-2039 et 2040-2069).

3.4 LE MODÈLE DE CULTURE EPIC

Dans cette étude, les impacts du changement climatique futur sur les besoins d'irrigation des espèces gazonnantes dans la région du sud du Québec sont évalués en couplant les données climatiques des modèles de circulation générale, CGCM1 et HadCM3, à un modèle de culture EPIC (*Erosion Productivity Impact Calculator*). Le choix de ce modèle a été fait en fonction de son applicabilité par rapport aux simulations de croissance et de développement des espèces gazonnantes. Le modèle EPIC est largement utilisé en Amérique du Nord et dans le monde (Adejuwon, 2004 ; Brown et Rosenberg, 1997 ; Easterling et al., 1996 ; 1997 ; Gassman, 2005 ; Roloff et al., 1998a,b).

Ce modèle a été développé pour estimer les relations entre l'érosion du sol et la productivité de la culture (Williams et al., 1984). Il intègre des composantes de la croissance de la culture, de l'érosion du sol, de la simulation du climat, du cycle des nutriments et des pratiques culturales. EPIC a une résolution temporelle journalière. Il nécessite l'introduction des paramètres climatiques journaliers dont les températures maximales et minimales, la radiation solaire, la vitesse du vent et l'humidité relative. Le modèle EPIC exige également de l'information sur les propriétés physiques du sol dont la densité apparente, la teneur en eau selon la capacité au champ et le point de flétrissement et de la gestion de la culture (par exemple la fertilisation, le tillage, la plantation, l'irrigation). Ce modèle simule ou calcule l'évapotranspiration, la température du sol, la croissance potentielle de la culture, les obstacles à la croissance (le stress hydrique, le stress thermique, le stress suite au manque ou au surplus de nitrogène et de phosphore), le taux d'irrigation et le rendement de la culture. La dynamique de la biomasse est ajustée de façon quotidienne en tenant compte des situations de stress (Mearns et al, 2001). Le modèle

EPIC utilise un seul algorithme pour simuler la croissance des toutes les cultures, mais chacune a des valeurs propres requises par le modèle (la température optimale de croissance, les seuils thermiques maxima et minima de développement, l'indice de la surface foliaire (*leaf area index* (LAI)) (Easterling et al., 2003).

3.4.1 LA VALIDATION DU MODÈLE EPIC

Le but de cette partie de la présente étude est de tester le modèle EPIC en comparant le taux et la fréquence d'irrigation prédits par le modèle avec les données observées collectées sur les terrains de golf Inverness et Challenger, durant les étés 2004 et 2005 respectivement.

3.4.1.1 Les régions d'étude

L'étude sur la validation du modèle de culture EPIC se base sur les données collectées sur deux terrains de golf : le terrain de golf Inverness, situé dans la région des Cantons de l'Est et le terrain de golf Challenger, situé dans la région de Montréal. En effet, pendant l'été 2004, la collecte des données climatiques et de la culture a été effectué sur le terrain de golf Inverness situé à côté de la localité Lac Brome. Les observations ont été réalisées du 21 juillet au 24 août 2004. Durant l'été 2005, la recherche sur le terrain s'est déroulée dans la région de Montréal. Les données ont été collectées sur le terrain de golf Challenger situé dans la ville Saint Laurent au Nord Ouest de l'île de Montréal. La période d'observations a commencé le 22 avril et a pris fin le 20 octobre 2005.

3.4.1.2 La station météo Davis

La station météorologique Davis est utilisée pour enregistrer les paramètres climatiques requis par le modèle EPIC à un pas temporel de 15 minutes. Elle est représentée par deux sections: la première collecte les paramètres atmosphériques (le rayonnement solaire, la température, les précipitations, la vitesse et la direction du vent et l'humidité de l'air) et la deuxième enregistre les paramètres du sol (la température et l'humidité) (figures 2 et 3).

3.4.1.3 Données climatiques

Les paramètres météorologiques journaliers enregistrés par la station météo Davis ont servi comme données climatologiques requises par le modèle EPIC. Ces données portaient sur le rayonnement solaire, les températures maximale et minimale, les précipitations, l'humidité relative et la vitesse du vent. Étant donné que pendant l'été 2004 nos observations ont été d'une durée relativement courte (seulement du 21 juillet au 24 août), pour simuler les besoins d'irrigation à partir du début de la période de végétation des espèces gazonnantes jusqu'à mois d'octobre. Nous avons utilisé également les paramètres climatiques extrapolés, enregistrés aux stations météo se trouvant à Sherbrooke et à Lennoxville. Ceux-ci sont situées au Sud – Est de Lac Brome à une distance d'environ de 20 km. L'extrapolation des éléments météorologiques est réalisée au moyen d'analyses de régression linéaire. Les résultats des celle-ci sont présentés dans les figures A.1 – A.6 de l'annexe A.



Figure 2. Station Davis (terrain de golf Inverness, Lac Brome, été 2004)



Figure 3. Station Davis (terrain de golf Challenger, Montréal été 2005)

Pour la région de Montréal nous avons utilisé les valeurs des paramètres climatiques mesurés par la station Davis du 22 avril jusqu'à 20 octobre 2005. À cause de certains problèmes techniques qui ont provoqué l'arrêt de la station du 21 au 31 août, nous avons remplacé les données manquantes par des données tirées de la station Montréal Pierre Elliott Trudeau A. Avec cette station, nous avons utilisé les valeurs climatiques pour les intervalles de l'année 2005 qui précèdent le 22 avril et qui succèdent le 20 octobre.

3.4.1.4 Données du sol

Pour la région de Lac Brome les données concernant les paramètres du sol dont la granulométrie et les valeurs de pH (Carte des sols, 1952) ont été obtenues du travail de Cann et al. (1948). Les caractéristiques du sol pour l'aire occupée par le terrain de golf Challenger ont été prises du travail de Lajoie et Baril (1956). Les paramètres physiques du sol comme la capacité au champ (CC) et le point de flétrissement (PMP) ont été estimés à partir de la texture en utilisant la méthode du Saxton et al. (1986). Les données obtenues sont présentées dans les tableaux IV et V.

Les résultats de l'analyse granulométrique sur les trois échantillons de sol collectés sur le terrain de golf Inverness ont confirmé la présence dans la région du Lac Brome de la même série du sol: *Sol franc sableux Blandford*.

Tableau IV. Paramètres physiques du sol de la région du Lac Brome. Série du sol : Sol franc sableux Blandford (Cann, et al., 1948)

<i>Profondeur</i> <i>cm</i>	<i>Sable</i> (%)	<i>Limon</i> (%)	<i>Argile</i> (%)	<i>PH</i>	<i>CC</i>	<i>PMP</i>
2,5-5,0	59,2	36,8	4,0	4,0	0,200	0.07
7,5-25	57,2	38,0	4,8	4,3	0,206	0.07
25-65	63,2	32,4	4,4	5,1	0,189	0.07
> 65	67,2	26,4	6,4	5,3	0,194	0.07

Tableau V. Paramètres physiques du sol de la région de la ville de Montréal, terrain de golf Challenger. Série du sol : Terre franche sableuse Châteauguay (Lajoie et Baril, 1956)

<i>Profondeur</i> <i>cm</i>	<i>Sable</i> (%)	<i>Limon</i> (%)	<i>Argile</i> (%)	<i>PH</i>	<i>CC</i>	<i>PMP</i>
0-18	57	21	22	7,4	0,24	0,137
18-53	59	21	20	7,0	0,23	0,129
> 53	59	21	20	7,6	0,23	0,129

3.4.1.5 Données de culture

Les données concernant les paramètres biologiques ou culturels des espèces gazonnantes ont été prises, en grande partie, des travaux du Beard (1969; 1973). Les indices de la croissance de ces espèces basés sur la température (Beard, 1969) sont exposés dans le tableau VI.

Un autre paramètre important de culture est l'indice de surface foliaire (*leaf area index* (LAI)), qui pour les plants matures varie de 3,0 à 6,0 (Brede et Duich, 1986). Selon les mesures sur le terrain de golf Inverness (été 2004) cet indice varie entre 3,5 et 4,5. En effet,

plusieurs mesures ont permis d'établir le rapport entre la surface foliaire et la surface occupée des plantes gazonnantes sur une aire de 5 cm².

Tableau VI. Seuils thermiques des espèces gazonnantes des régions tempérées (*cool season turfgrass*) (Beard, 1969)

<i>Les seuils</i>	<i>Température (°C)</i>
Optimale	15,6 – 21,1
Maximale	37,8
Minimale	0,0

3.4.1.6 Les résultats de l'étude sur le terrain de golf Inverness été 2004

Les conditions climatiques et hydriques dans la région de Lac Brome pendant l'été 2004

L'été 2004 s'est caractérisé par des conditions climatiques distinctes. Pendant cette période, dans la région à l'étude, sont tombées des quantités importantes de précipitations dépassant la normale multiannuelle pour les mois de juillet et d'août (175% et 168% respectivement) (tableau VII). De plus, les températures au-dessous de la normale ont probablement fait diminuer l'évapotranspiration pendant le mois de juin. Par conséquent, le gazon du terrain de golf Inverness, grâce à la quantité suffisante d'humidité du sol, pendant l'été 2004 y compris la période d'observations (juillet – août) n'a pas été irrigué.

Les données concernant l'humidité du sol, enregistrées par la deuxième section de la station Davis pendant la période 21 juillet – 24 août, attestent également du degré élevé de saturation du sol de la région à l'étude (tableau A. I, Annexe A). Selon les caractéristiques techniques de la station, on doit irriguer quand les senseurs enregistrent plus de 30 *centibar* (tableau VIII). Étant donné que pendant la période d'observation, les valeurs moyennes maximales journalières ont enregistré seulement 9 *centibar* (30 juillet), il est possible de déduire que les résultats sur l'humidité du sol de la station Davis reflètent assez bien la situation réelle.

Les observations sur la quantité d'humidité stockée dans les différentes couches de sol du terrain de golf Inverness indiquent que pendant la période juillet – août 2004 l'eau représenta 20 – 30% de la masse totale du sol de la couche entre 5 et 15 cm (tableau IX). De ce fait, pour la série du sol *Sol franc sableux Blandford* un volume de 20 - 30% de l'eau par rapport à la masse totale du sol pourrait assurer une quantité suffisante d'humidité et, par conséquent, un développement satisfaisant des espèces gazonnantes.

Tableau VII. Les températures et les précipitations moyennes mensuelles de la période 1961-1990 et de l'année 2004 dans la région du Sherbrooke

Paramètres*	MOIS											
	jan	fév	mar	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc
TMAX m, (°C)	-5,7	-4,0	2,0	9,7	17,7	22,3	24,7	23,1	18,7	12,3	4,5	-3,1
TMAX, (°C) a. 2004	-10,6	-2,6	4,8	10,7	18,9	21,7	25,0	23,2	20,6	13,2	-	-
TMINm, (°C)	-17,6	-16,8	-9,8	-1,9	4,0	8,8	11,5	10,4	5,8	0,8	-4,3	-13,3
TMIN, (°C) a. 2004	-20,2	-15,8	-5,5	0,9	7,2	8,8	14,4	13,6	9,2	0,3	-	-
PRCPm, (mm)	70,5	60,7	74,2	76,6	94,7	100,8	115,2	129,7	96,8	89,0	98,6	97,5
PRCP, (mm) a.2004	48,3	58,7	57,9	84,3	127,9	88,2	201,7	217,6	69,0	41,0	-	-

* Note : TMAXm – la température maximale moyenne multi annuelle de la période 1961-1990;
 TMAX a.2004 - la température maximale moyenne mensuelle de l'année 2004;
 TMINm - la température minimale moyenne multi annuelle de la période 1961-1990;
 TMIN a.2004 – la température minimale moyenne mensuelle de l'année 2004;
 PRCPm – les précipitations moyennes multi annuelles de la période 1961-1990;
 PRCP a.2004 – les précipitations mensuelles totales de l'année 2004.

Tableau VIII. L'échelle de la gamme de saturation du sol (selon le manuel de la station Davis)

Centibar	Conditions du sol
0 -10	Sol saturé. Se produit dans un ou deux jours après l'irrigation.
10 - 20	Sol suffisant humide (excepté les sables bruts qui se dessèchent à cette gamme.).
30 - 60	Gamme habituelle à irriguer ou arroser (excepté les sols lourds argileux)
60 -100	Gamme habituelle à irriguer les sols lourds argileux.
100 - 200	Le sol devient dangereusement sec.

Tableau IX. La quantité relative d'eau du sol à différentes profondeurs (par rapport à la masse totale du sol), terrain de golf Inverness, juillet – août 2004

La date d'échantillon	La profondeur et la quantité relative de l'eau en %			
	5 cm	15 cm	30 cm	50 cm
09-07-2004	21,7	-	-	-
15-07-2004	26,0	22,4	20,2	12,8
18-07-2004	30,0	20,3	18,4	11,1
20-07-2004	25,7	18,6	18,6	-
25-07-2004	30,4	20,0	20,0	17,5
01-08-2004	26,4	20,4	24,2	18,5
06-08-2004	34,6	27,5	25,2	16,2
16-08-2004	27,8	25,3	22,7	20,4

Les résultats des simulations avec EPIC

En utilisant les données climatiques observées et interpolées de la période 01 janvier 2004 – 31 octobre 2004 nous avons réalisé cinq simulations pour estimer la fréquence et les taux d'irrigation pour les espèces gazonnantes dans la région de Lac Brome, pendant la période de végétation de l'année 2004. Pour la première simulation nous avons prévu l'irrigation quand il y a un déficit hydrique en sol de 4 mm tandis que pour les autres des déficits hydriques de 9, 10, 13 et 15 mm ont été utilisés respectivement. Sont choisis plusieurs critères afin de trouver le meilleur, c'est-à-dire le critère à partir duquel la simulation du taux d'irrigation se rapproche plus des données observées. De ce fait, les besoins en irrigation sont simulés avec EPIC selon cinq critères choisis:

1. *le critère de déficit hydrique en sol de 4mm;*
2. *le critère de déficit hydrique en sol de 9mm;*
3. *le critère de déficit hydrique en sol de 10 mm;*
4. *le critère de déficit hydrique en sol de 13 mm;*
5. *le critère de déficit hydrique en sol de 15 mm.*

Les résultats montrent que les besoins en irrigation prédits par le modèle EPIC, selon les premiers trois critères, diffèrent des données observées. Par contre, les simulations selon les critères de 13 et 15 mm révèlent des valeurs qui sont proches de données de terrain. On constate, ainsi, que les plus réalistes sont les résultats de la simulation selon le critère de 15

mm pour lequel le modèle a prédit seulement deux irrigations: une pour le mois de juillet et un autre pour le mois de septembre (tableau X).

Tableau X. Les valeurs moyennes mensuelles des précipitations (PRCP), évapotranspiration potentielle (PET), évapotranspiration (ET), et irrigation (IRGA) (critères de 4, 9, 10, 13 et 15 mm) dans la région du Lac Brome période janvier - octobre 2004

Mois	PRCP	PET	ET	IRGA,mm Terrain Inverness	IRGA EPIC, mm				
					critère 4mm	critère 9mm	critère 10mm	critère 13mm	critère 15mm
1	58,17	5,49	2,75						
2	65,21	18,23	9,12						
3	68,59	55,22	28,40						
4	90,08	97,17	54,95	0					
5	136,94	165,81	111,30	0	4				
6	97,23	197,88	131,32	0	8	9			
7	203,62	195,62	116,90	0	48	36	30	26	15
8	220,09	153,86	79,59	0	40	27	20		
9	81,27	117,82	62,51	?	44	27	20	13	15
10	67,37	64,87	46,03	?	20				

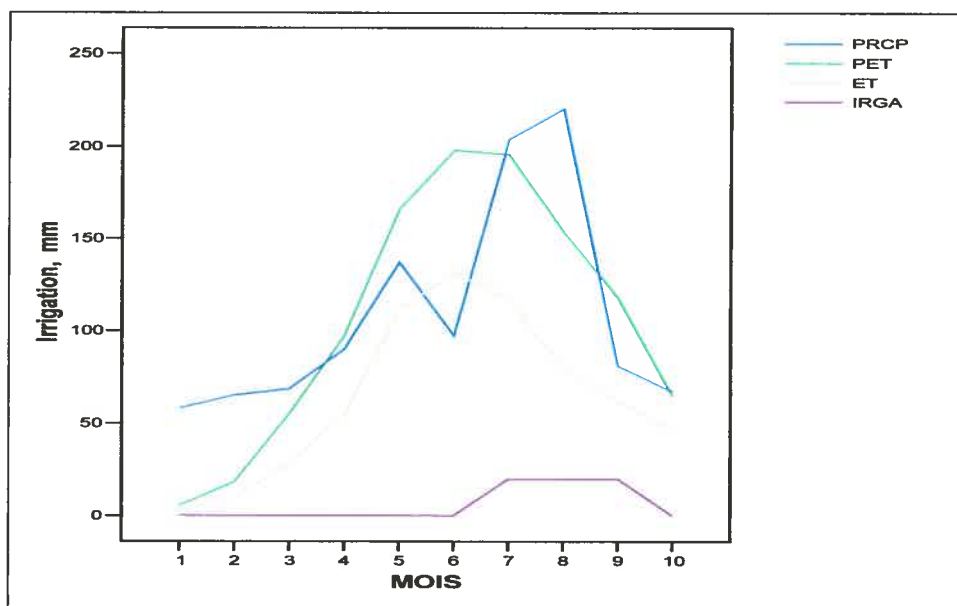


Figure 4. Les PRCP¹, PET², ET³ et IRGA⁴ (critère de 10mm) au Lac Brome, année 2004

Note :

¹ précipitations

² évapotranspiration potentielle

³ évapotranspiration

⁴ irrigation

À l'aide de la figure 4 nous constatons qu'il est compliqué de trouver des liens entre les valeurs de l'irrigation et celles des autres paramètres climatiques. Toutefois, il semble que les taux réduits d'arrosage sont déterminés par les taux élevés des précipitations (PRCP) plus au moins égaux à ceux d'évapotranspiration potentielle (PET).

3.4.1.7 Les résultats des études sur le terrain de golf Challenger été 2005

Les conditions climatiques et hydriques dans la région de Montréal pendant l'été 2005

La période estivale de l'année 2005 se caractérise premièrement par des températures au-dessus de la normale et deuxièmement par un caractère torrentiel de la précipitation. Les températures moyennes maximales et minimales de trois mois d'été 2005 ont dépassés de 2,3 °C et de 3,5 °C, respectivement, les normales de celles-ci au cours de la période 1971-2000. Par contre, le début de la saison de végétation a été marqué par un mois de mai plus froid et plus sec que la normale. En effet, la température moyenne maximale du mois de mai a été de 2,2°C inférieure à la normale tandis que les précipitations mensuelles ont représentés seulement 57% de la normale de la période 1971-2000 (tableau XI).

Durant le mois de juin 95% de précipitations mensuelles tombent pendant quatre jours consécutives ; 54% de précipitations du mois de juillet tombe dans une seule journée; 58% de précipitations du mois d'août tombent au cours d'un seul jour soit le 31 août, illustre le caractère diluvien des précipitations d'été 2005.

Tel qu'attendu, les conditions climatiques spécifiques de l'été 2005 ont provoqué un déficit hydrique important du sol. Les valeurs correspondant à l'humidité du sol, enregistrées par la station Davis, confirment nos suppositions. En effet, on constate que du début du mois de mai jusqu'à 20 octobre les valeurs moyennes mensuelles d'humidité du sol à la surface et à la profondeur de 10 cm dépassent toujours le seuil de 30 *centibar* (tableau XII). Ceux-ci démontrent la nécessité d'irrigation pendant plusieurs jours de cette période.

Tableau XI. Les températures et les précipitations moyennes mensuelles de la période 1971-2000 (station météo MONTREAL/PIERRE ELLIOTT TRUDEAU INTL A) et de l'année 2005 (club de golf Challenger, mai-septembre)

Paramètres	MOIS												IV-X
	jan	fév	mar	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	déc	
TMAXm (°C)	-5,8	-4,3	2,1	10,7	18,9	23,3	26,3	24,7	19,5	12,5	5,3	-2,4	20,57
TMAX, (°C) a. 2005	-6,4	-1,7	1,4	13,4	16,7	26,8	27,5	26,9	22,5	13,5	-	-	22,3
TMINm, (°C)	-14,9	-13,4	-6,9	0,7	7,6	12,4	15,5	14,2	9,2	3,1	-2,2	-10,8	10,45
TMIN, (°C) a. 2005	-15,5	-11,5	-7,9	2,2	7,9	17	17,9	17,6	13,8	6,9	-	-	13,88
PRCPm, (mm)	70,4	59,7	72,2	76,1	75,5	84,4	90,1	94,2	91,3	77,6	93	82,3	589,2
PRCP, (mm) a.2005	63,6	43,6	44	134,2	43	129	118	126	112,2	198,2	-	-	860,6

Note : TMAXm – la température maximale moyenne multi annuelle de la période 1971-2000;
 TMAX a.2005 - la température maximale moyenne mensuelle de l'année 2005;
 TMINm - la température minimale moyenne multi annuelle de la période 1971-2000;
 TMIN a.2005 – la température minimale moyenne mensuelle de l'année 2005;
 PRCPm – les précipitations moyennes multi annuelles de la période 1971-2000;
 PRCP a.2005 – les précipitations mensuelles totales de l'année 2005.

Tableau XII. Les valeurs moyennes mensuelles de l'indice d'humidité du sol au Montréal (*en centibar*) à quatre profondeurs (0, 10, 20 et 30cm), mesurées par la station Davis pendant la période 22 avril – 20 octobre 2005

MOIS	L'INDICE D'HUMIDITÉ (CENTIBAR) À PROFONDEUR DE :			
	0 cm	10 cm	20 cm	30 cm
Avril ¹	10,8	7,2	3,4	6,4
Mai	46,6	43,6	29,6	36,5
Juine	51,9	75,4	50,2	58,1
Juliet	63,8	62,3	50,8	78,5
Août ²	153,1	166,6	185,1	128,6
Septembre	59,1	68,2	37,4	56,9
Octobre ³	40,8	37,3	8,4	25,2

Note :

¹ période 22 - 30 avril

² période 01 – 21 août

³ période 01-20 octobre

Les résultats des simulations avec EPIC

En utilisant les données climatiques observées sur le terrain de golf Challenger et de la station météo Montréal Pierre Elliott Trudeau A (21 août – 31 août 2005) dont la température maximale, la température minimale, le rayonnement solaire, l'humidité relative et la vitesse du vent nous avons réalisé cinq simulations pour estimer la fréquence

et les taux d'irrigation pour les espèces gazonnantes dans la région de Montréal, pendant la période de végétation de l'année 2005. Pour la première simulation nous avons prévu l'irrigation quand il y a un déficit hydrique en sol de 4 mm tandis que pour les autres un déficit de 9, 10, 13 et 15 mm, respectivement.

Tableau XIII. La quantité relative de l'eau en sol (par rapport à la masse totale de sol) aux différentes profondeurs, terrain de golf Challenger, mai - août 2005

La date d'échantillon	La profondeur et la quantité relative de l'eau en %		
	<i>Surface</i>	<i>10 cm</i>	<i>20 cm</i>
06-05-2005	22	22	19
12-05-2005	18	19	16
17-05-2005	19	17	16
24-05-2005	22	17	16
05-06-2005	-	17	-
06-07-2005	23	20	21
13-07-2005	17	19	15
20-07-2005	17	17	17
27-07-2005	17	17	16
09-08-2005	10	12	12

La quantité d'eau prévue pour chaque irrigation correspond à celle du déficit hydrique. Par exemple, on irrigue 4mm d'eau à la fois quand le déficit d'eau en sol est de 4mm; 9mm – quand le déficit est de 9mm et ainsi de suite. Nous avons essayé de changer le volume d'eau prévu pour une irrigation mais les résultats obtenus n'ont pas changé la qualité de simulation. Par conséquent, dans la présente étude les taux du déficit hydrique ont les mêmes quantités que ceux d'irrigation. Donc, les besoins en irrigation sont simulés avec EPIC selon plusieurs critères choisis:

- 1 le critère de déficit hydrique en sol de 4mm;
- 2 le critère de déficit hydrique en sol de 9mm;
- 3 le critère de déficit hydrique en sol de 10 mm;
- 4 le critère de déficit hydrique en sol de 13 mm;
- 5 le critère de déficit hydrique en sol de 15 mm.

Selon les données fournies par les gestionnaires du terrain de golf Challenger en 2005 la saison d'irrigation a débuté le 11 avril et a pris fin le 6 octobre. Pendant la période du 1

juin au 20 octobre 2005 ils ont irrigué environ 200mm d'eau. Le système d'irrigation du club de golf Challenger tire l'eau des réservoirs alimentés par les puits. L'eau tirée d'un puits profond est souvent très froide et le réservoir permet à l'eau d'irrigation de s'acclimater, de façon à ne pas « saisir » le gazon. Le gazon du terrain de golf Challenger était arrosé pendant une période variable : de 9 à 24 minutes, d'habitude en soirée.

Les résultats montrent que les taux d'irrigation prédits au moyen du modèle EPIC, selon les premiers deux critères, sont assez proches des données réelles. Ainsi, suite aux simulations selon les critères de 4 et 9mm nous avons obtenus un rapport entre les taux simulés et ceux observés de 106% et de 98%, respectivement. Par contre, les simulations selon les critères de 13 et 15 mm révèlent des valeurs plus petites qui sont différentes des données observées. On constate, ainsi, que les résultats les plus réalistes sont ceux de la simulation selon le critère de 9 mm (tableau XIV, figure 5).

Tableau XIV. Les valeurs moyennes mensuelles des précipitations (PRCP), évapotranspiration potentielle (PET), évapotranspiration (ET), et irrigation (IRGA) selon les données observées et les simulations d'EPIC à Montréal, période janvier - octobre 2005

Mois	PRCP	PET ¹	ET ²	IRGA, mm Terrain Challenger	EPIC IRGA, mm				
					critère 4mm	critère 9mm	critère 10mm	critère 13mm	critère 15mm
1	63,6	10,3	5,1						
2	43,6	20,3	10,2						
3	44,0	45,6	22,8						
4	134,2	111,0	49,0	?	16				
5	43,0	138,0	129,2	?	40	18	10	13	15
6	129,0	202,9	156,8	78,5	52	72	70	52	45
7	118,0	201,1	143,4	46,6	52	45	30	26	45
8	126,0	171,4	90,35*	40,4	56	45	40	26	15
9	112,2	111,2	105,8	21,4	32	18	10		
10	198,2	54,8	39,1**	5,6	12	9			
Total	1011,8	1066,6	751,75	192,5	204	189	150	104	105

Note :

¹ calculée par EPIC

² calculée par la station Davis

* période 01 – 21 août

** période 01-20 octobre

Notons qu'en utilisant les critères de valeurs plus petits, comme celui de 4 mm, il est possible de percevoir les besoins d'eau au début et à la fin de la période de végétation. La fréquence mensuelle d'irrigation simulée par le modèle EPIC est plus précise lorsqu'on simule selon le critère de 4 mm (tableau XV). La figure 5 montre que les taux d'irrigation sont assez proches de celles du déficit hydrique de la période d'étude.

Tableau XV. La fréquence d'irrigation (jours), Challenger 2005

Mois	IRGA, mm Terrain Challenger	EPIC IRGA, mm				
		critère 4mm	critère 9mm	critère 10mm	critère 13mm	critère 15mm
1						
2						
3						
4	?	4				
5	?	10	2	1	1	1
6	24	13	8	7	4	3
7	20	13	5	3	2	3
8	20	14	5	4	2	1
9	15	8	2	1		
10	4	3	1			

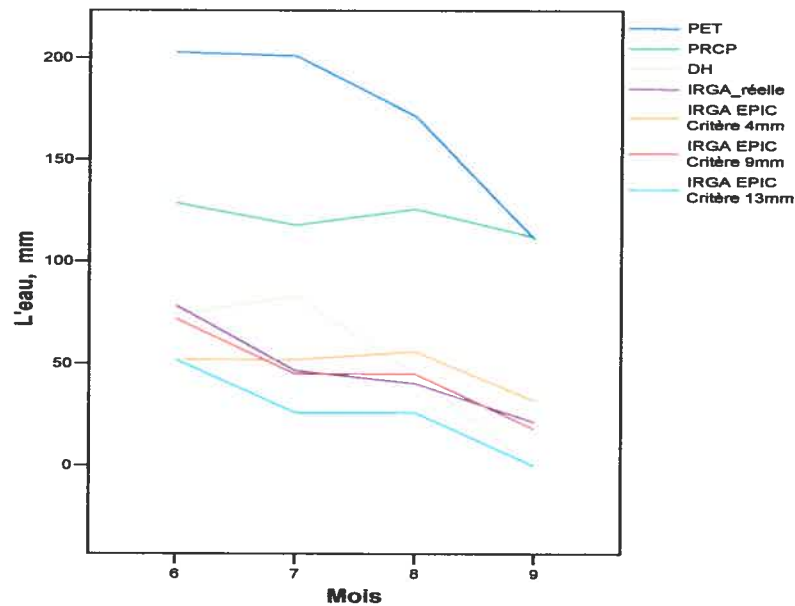


Figure 5. Les PET, PRCP, déficit hydrique (DH), IRGA réelle et IRGA calculé par le modèle EPIC (critères de 4, 9, et 13mm)

En somme, les résultats de cette partie de la présente recherche indiquent que:

- Les résultats des simulations des taux d'irrigation du modèle EPIC varient fortement en fonction du critère de déficit hydrique au sol;
- L'exactitude des résultats ou simulations du modèle EPIC est influencée par les conditions du temps ainsi que, probablement, par les conditions et les types de sol. Ainsi, pour l'année 2004, qui a été plus humide que la normale, c'est les critères plus grands (de 13 et 15 mm) qui ont donné des résultats plus réalistes tandis que pour l'année 2005, plus chaude et plus sèche, c'est les critères plus petits (de 4 et 9mm) qui ont donnés les meilleurs résultats;
- Le modèle simule mieux la quantité d'eau à fournir que la fréquence des irrigations.
- Les résultats sur l'humidité du sol et les besoins en irrigation de la station Davis reflètent assez bien la situation réelle.
- Pour la série du sol *Sol franc sableux Blandford* un volume de 20 - 30% de l'eau par rapport à la masse totale du sol pourrait assurer une quantité suffisante d'humidité et par conséquent un développement satisfaisant des espèces gazonnantes dans la région des Cantons de l'Est.
- Pour la série du sol *Terre franche sableuse Châteauguay* un volume de moins de 20% d'eau par rapport à la masse totale du sol (tableau XIII) est insuffisant pour le développement des espèces gazonnantes et par conséquent il faut irriguer.
- L'analyse suggère, pour simuler les besoins en irrigation au moyen du modèle EPIC pour les périodes futures, en utilisant les sorties diagnostiques des MCGAO, qu'on doit utiliser trois critères :
 1. le critère ou le déficit de 4mm
 2. le critère ou le déficit de 9mm
 3. le critère ou le déficit de 13mm.

3.5 DONNÉES CLIMATIQUES

3.5.1 RÉGION DES LAURENTIDES (SOUS RÉGION DE MONTRÉAL)

Pour la période actuelle de 1961 à 1990, sont utilisées les données météorologiques observées dont la température maximale, la température minimale, les précipitations totales, la vitesse du vent et l'humidité relative, enregistrées à la station climatique Montréal Pierre Elliott Trudeau Intl A, et la radiation solaire enregistrée à la station climatique Brébeuf. Un problème important de disponibilité de données s'est posé pour la radiation solaire. Pour estimer les données manquantes du rayonnement solaire nous étions obligés d'utiliser une équation empirique permettant d'avoir la radiation solaire à partir des données d'ensoleillement de la station climatique McGill. L'équation choisie a été élaborée par Baier et Robertson (1965) et utilisée pour plusieurs régions du Sud du Canada.

$$Q_s = Q_o (0.251 + 0.616 (n/N)) \quad (1)$$

Où,

Q_s est la radiation solaire en $\text{cal cm}^{-2} \text{ jour}^{-1}$.

Q_o est la radiation solaire reçue aux limites supérieures de l'atmosphère (extraterrestre) en $\text{cal cm}^{-2} \text{ jour}^{-1}$.

n = l'ensoleillement en heures.

N est la durée astronomique de la journée en heures.

Pour les périodes futures (2010 – 2039 et 2040 – 2069) ainsi que pour la période courante (1961 – 1990) nous avons utilisé les données quotidiennes tirées du modèle climatique canadien CGCM1 et du modèle climatique britannique HadCM3 dont le rayonnement solaire incident à la surface, la température d'abri maximale, la température d'abri minimale et les précipitations. Pour ajuster les températures minimales et maximales et les précipitations de la grande cellule du CGCM1 (la cellule I77 J37) à notre région d'étude nous avons employé le procédé de désagrégation (*downscaling*) des données provenant de la grande échelle (le modèle climatique CGCM1) à une plus petite échelle (la station météo Pierre Elliott Trudeau Intl A) en utilisant le SDSM (*Statistical DownScaling Model*). Sauf que les valeurs du rayonnement solaire ont été ajustées en appliquant le procédé

d'interpolation linéaire entre deux cellules avoisinantes (la cellule I77_J37 et la cellule I77_J36 avec les coordonnées 75,00W, 46,39N et 75,00W, 42,68N, respectivement) du modèle climatique canadien. Les mêmes méthodes ont été utilisées pour ajuster les scénarios climatiques du HadCM3.

3.5.2 RÉGION DES CANTONS DE L'EST

Dans la région des Cantons de l'Est, la période actuelle a été réduite de 30 à 13 ans. Ceci s'explique par le fait que les mesures sur le rayonnement solaire pour la période 1961-1990 sont manquantes et que les observations sur l'ensoleillement ne sont disponibles qu'à partir de 1978. Alors, pour la période actuelle 1978-1990, nous avons utilisé les données météorologiques observées dont la température maximale, la température minimale, les précipitations totales et la radiation solaire. En effet, le rayonnement solaire de cette période-ci a été calculé à partir des données d'ensoleillement disponibles pour la station Sherbrooke en utilisant l'équation (1).

Pour les deux périodes futures (2010 – 2039 et 2040 – 2069) ainsi que pour la période courante (1961 – 1990) nous avons utilisé les données quotidiennes provenant du modèle climatique canadien (CGCM1) et du modèle climatique britannique (HadCM3) dont le rayonnement solaire incident à la surface, la température d'abri maximale, la température d'abri minimale et les précipitations. Pour ajuster les températures minimales et maximales et les précipitations de la grande cellule du CGCM1 (qui couvre la région des Cantons de l'Est avec le numéro d'identification I78_J37) à notre région d'étude nous avons employé le même logiciel que pour la région de Montréal: le SDSM. Les valeurs de rayonnement solaire ont été ajustées en appliquant le procédé d'interpolation linéaire entre deux cellules voisines de CGCM1 (les cellules I78_J37 et I78_J36). Les mêmes méthodes ont été utilisées pour ajuster les données provenant du HadCM3.

3.5.3 RÉGION DU QUÉBEC

Pour la période actuelle de 1961 à 1990, sont utilisées les données météorologiques observées dont la température maximale, la température minimale, les précipitations totales et la radiation solaire enregistrées à la station climatique Québec A. Pour la période de 1961 jusqu'au début de 1964 ainsi que pour certaines jours de l'intervalle 1964-1990, la radiation solaire a été calculé indirectement à partir des données d'ensoleillement disponibles et enregistrées à la même station en utilisant l'équation (1). Les valeurs du rayonnement solaire, estimées à partir d'ensoleillement, ont été ajustées à l'aide d'un facteur de correction. Celui-ci est obtenu lors de la régression linéaire entre les valeurs simulées et celles observées pour la radiation solaire.

Pour les deux périodes futures (2010 – 2039 et 2040 – 2069) ainsi que pour la période courante (1961 – 1990) sont utilisés les données quotidiennes sortantes du modèle climatique canadien CGCM1 et du modèle HadCM3 dont le rayonnement solaire incidente à la surface, la température d'abri maximale, la température d'abri minimale et les précipitations. Pour ajuster les températures minimales et maximales et les précipitations de la grande échelle du CGCM1 (la cellule I78_J37) à notre région d'étude est utilisé le même procédé c'est-à-dire le logiciel SDSM. Le fait que les coordonnées géographiques de la cellule I78_J37 (71,25W et 46,39N) sont assez proches de coordonnées géographiques de la station météo Québec A (71,37W et 46,80N), nous avons employé directement les valeurs de rayonnement solaire de la grande cellule du modèle. Les mêmes méthodes ont été utilisées pour ajuster les scénarios climatiques du HadCM3.

3.6 DONNÉES DE LA CULTURE

Les espèces de plantes utilisées sur les terrains de golf au Canada poussent bien si la température se situe entre 15 et 24°C (59 à 75°F) et sont appelées *espèces gazonnantes des régions tempérées*. Elles sont représentées par les variétés principales suivantes: l'agrostide tracante, le pâturin annuel, le pâturin des prés, le ray-grass, la fétuque rouge tracante, la

fétuque élevée et la fétuque rouge var. *Chewings* et la fétuque ovine (RCGA, 2005). Dans la région d'étude les gestionnaires des gazons préfèrent généralement dans leurs pratiques culturales les espèces des trois genres dont le Pâturin (*Poa L.*), l'Agrostide (*Agrostis L.*) et la Fétuque (*Festuca L.*).

Selon Beard (1973), les espèces du genre *Poa* sont les plus utilisées dans les industries des gazons pour les régions qui ont un climat frais, y compris le Canada. Les cultivars de ce genre sont plus adaptés aux sols humides, fertiles, de texture fine et avec un pH allant de 6,0 à 7,0. Les espèces du genre *Poa* peuvent être retrouvées sur les gazons de plusieurs terrains de golf. Toutefois les espèces les plus cultivées sont le *pâturin annuel* (*Poa annua L.*) et le *pâturin des prés* (*Poa pratensis*).

Les espèces du genre *Agrostide* sont aussi adaptées aux climats frais, humides et de transition. Ces espèces forment un gazon très bien texturé, dense, uniforme et de haute qualité. Les Agrostides supportent les tontes fréquentes et rases jusqu'à 5mm grâce à leur propriété de se prosterner. Elles sont plus adaptées aux sols humides et fertiles avec un pH allant de 5,5 à 6,5. Les espèces les plus souvent utilisés sont l'agrostide traçante (*Agrostis stolonifera*), et l'agrostide commune (*Agrostis capillaris*) (Beard ,1973, Huang 2002).

Le troisième genre, en l'occurrence la Fétuque, est également fréquemment utilisé dans l'industrie des gazons. Par exemple, les Fétuques sont largement utilisées dans la région de Montréal (terrain de golf Challenger, par exemple). Ces espèces sont bien adaptées à un climat frais et humide et en même temps sont tolérantes aux sols secs, stériles et acides. La variété la plus utilisée est la fétuque rouge (*Festuca rubra*) qui forme un gazon dense et fin. C'est une espèce qui résiste bien à la sécheresse, à l'excès d'eau et au froid. Elle supporte les tontes fréquentes et rases et a une bonne pérennité (Beard ,1973).

3.6.1 LES CARACTERISTIQUES BIOLOGIQUES PRINCIPALES DU PATURIN ANNUEL (POA ANNUA L.)

L'une des espèces gazonnantes les plus fréquentes sur les terrains de golf au Canada, y compris le Québec, est le pâturin annuel (*Poa annua L.*) (Dionne et al., 2000). Le pâturin

annuel est originaire d'Europe et a été introduit en Amérique du Nord à la fin du 18^e siècle. Cette espèce se retrouve aujourd'hui sur tous les continents, même en Antarctique. Le pâturin annuel est caractérisé par deux sous-espèces: *Poa annua* var. *annua* L. Timm., une graminée adventice annuelle cespiteuse retrouvée sur les allées des terrains de golf et les pelouses résidentielles, et *Poa annua* var. *reptans* (Hauskins) Timm., une graminée vivace stolonifère endémique retrouvée sur les verts de golf (Dionne, 2001).

Poa annua se développe mieux sur les sols humides, très bien texturés, fertiles ayant un pH de 5,5 à 6,5 et un taux élevé de phosphore. Pourtant, cette espèce résiste aux sols de texture grossière et qui sont secs, moyennant une irrigation régulière (Beard, 1973). Des études sur l'influence de la fertilisation démontrent que les fortes applications d'azote augmentent la compétitivité du pâturin annuel dans les populations d'agrostide et de pâturin des prés (Dest et Guillard, 1987 ; Warwick, 1979).

Le pâturin annuel produit une quantité considérable de semences qui peuvent germer dès que les conditions environnementales sont propices (Lush, 1989). La propagation et la dissémination sont effectuées surtout par les graines (Beard, 1973). La production de stolons et le tallage permettent également la multiplication de la *Poa annua* par propagation végétative (Johnson et al., 1993). Cette espèce possède des caractéristiques agronomiques intéressantes pour le gazon : une texture fine, une densité élevée, une compétitivité accrue, une bonne tolérance à la tonte courte et une bonne croissance en sol compacté (grâce à son système racinaire agressif et superficiel) et en milieu ombragé (Beard et al., 1978). Cependant, *Poa annua* a une croissance légèrement plus droite et est d'un vert plus pâle que les autres espèces de gazon (Lush, 1988). En même temps, il est sensible aux stress environnementaux (notamment, le *Poa annua* var. *annua* L. Timm.) en particulier aux températures extrêmes, aux chaleurs prononcées et aux sécheresses (Beard, 1973). Dionne et al. (2004) ont remarqué que le pâturin annuel est plus sensible à l'anoxie que l'agrostide traçante et que l'incubation à des températures sous le point de congélation retarde les dommages causés par l'anoxie.

3.6.2 LES CARACTERISTIQUES BIOLOGIQUES PRINCIPALES DE L'AGROSTIDE TRAÇANTE (*AGROSTIS STOLONIFERA*)

L'agrostide traçante (*creeping bentgrass*) se propage par stolons et regarnit assez vite les zones dégradées. Une fois installée c'est une espèce très agressive. Elle demande des sols frais et fertiles. L'agrostide traçante a un feuillage fin et résistant aux coupes fréquentes et rases. Ainsi, elle peut être tondue à une hauteur de coupe de 4 à 6 mm (0,18 à 0,6 po.) pour produire une surface uniforme et à texture fine (RCGA, 2005).

L'agrostide traçante est plus résistante aux sécheresses et aux basses températures d'hiver que le pâturin annuel (Beard, 1973; Tompkins, 1997). L'englacement a moins d'impact sur l'agrostide traçante que sur le pâturin annuel (Tompkins, 2000)

3.6.3 LES PARAMETRES BIOLOGIQUES DES ESPECES DU GAZON

Les données concernant les paramètres biologiques et cultureux des espèces gazonnantes ont été collectées en grande partie des travaux de Beard (1969,1973). Les indices de la croissance des plantes de gazon concernant les températures (Beard, 1969) sont montrés dans le tableau VI. Un autre paramètre de culture important est l'indice de surface foliaire qui pour les espèces gazonnantes varie de 3,0 à 6,0. (Brede et Duich, 1986, 1984).

3.7 DONNÉES DU SOL

3.7.1 RÉGION DES LAURENTIDES (SOUS RÉGION DE MONTRÉAL)

Les données concernant les paramètres du sol, ont été obtenues des cartes du sol de la région de Montréal notamment la granulométrie et les valeurs de pH (Carte des sols, 1952). Les paramètres physiques du sol comme la capacité au champ (CC) et le point de flétrissement (PMP) ont été estimés à partir de la texture (Saxton et al., 1986). Cette méthode estime la CC à partir de la formule (2) et le PMP à partir de la formule (3).

$$\theta_{cc} = \left(\frac{0,3333}{a} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (2)$$

$$\theta_{PMP} = \left(\frac{15}{a} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (3)$$

Où :

θ_{CC} = capacité au champ;

θ_{PMP} = point de flétrissement;

$a = \exp(-4,396 - 0,0715 \times Fa - 0,000488 \times Fs^2 - 0,00004285 \times Fs^2 \times Fa)$;

$b = -3,14 - 0,00222 \times Fa^2 - 0,00003484 \times Fa^2 \times Fa$;

Fa = fraction argile (%);

Fs = fraction sable (%).

Ces équations ont été utilisées pour calculer les paramètres physiques du sol pour tous les trois régions à l'étude.

Les données obtenues pour la région de Montréal sont présentées dans le tableau XVI.

Tableau XVI. Les paramètres physiques du sol de la région de Montréal. Série du sol: Argile St. Urbain (Lajoie et Baril, 1956)

<i>Profondeur</i> (cm)	<i>Sable</i> (%)	<i>Limon</i> (%)	<i>Argile</i> (%)	<i>PH</i>	<i>CC</i>	<i>PMP</i>
0-10	19	35	46	6,2	0,33	0,21
10-40	10	37	53	7,2	0,38	0,26
> 40	13	31	56	7,2	0,39	0,27

3.7.2 LA RÉGION DES CANTONS DE L'EST

Les données touchant les caractéristiques du sol proviennent des cartes du sol de la région des Cantons de l'Est: la granulométrie et les valeurs de pH. Les paramètres physiques du sol dont la capacité au champ (CC) et le point de flétrissement (PMP) ont été aussi estimés à partir de la texture en utilisant les équations 2 et 3. Les données obtenues sont indiquées dans le tableau XVII.

3.7.3 RÉGION DE LA VILLE DE QUÉBEC

Les données sur les paramètres du sol de la région du Québec ont été obtenues des cartes du sol et du travail de Raymond et al. (1976) particulièrement la granulométrie et les valeurs de pH. La capacité au champ (CC) et le point de flétrissement (PMP) ont été estimés en utilisant la même méthode élaborée par Saxton et al. (1986). Les données obtenues sont indiquées dans le tableau XVIII.

Tableau XVII. Paramètres physiques du sol de la région du Sherbrooke. Série du sol: Sol franc sableux Blandford (Cann et al., 1948)

<i>Profondeur cm</i>	<i>Sable (%)</i>	<i>Limon (%)</i>	<i>Argile (%)</i>	<i>PH</i>	<i>CC</i>	<i>PMP</i>
2,5-5,0	59,2	36,8	4,0	4,0	0,119	0,07
7,5-25	57,2	38,0	4,8	4,3	0,127	0,07
25-65	63,2	32,4	4,4	5,1	0,114	0,07
> 65	67,2	26,4	6,4	5,3	0,110	0,07

Tableau XVIII. Paramètres physiques du sol de la région de Québec. Série du sol : Loam argileux à argile JOLY (Raymond et al., 1976)

<i>Profondeur cm</i>	<i>Sable (%)</i>	<i>Limon (%)</i>	<i>Argile (%)</i>	<i>PH</i>	<i>CC</i>	<i>PMP</i>
0-5	12	40,0	48,0	3,6	0,434	0,227
5-10	6,0	48,0	46,0	3,8	0,429	0,265
10-28	9,0	51,0	40,0	4,0	0,394	0,225
28-41	7,0	47,0	46,0	4,1	0,423	0,265
41-49	13,0	52,0	35,0	4,3	0,364	0,194

3.8 LA DURÉE DE LA SAISON DE GOLF, LES INDICATEURS AGROCLIMATIQUES ET CLIMATIQUES

Suite aux rencontres avec les responsables de centres de golf, nous avons pu identifier les caractéristiques du début et de fin de saison ainsi que les indicateurs d'importance ayant une influence sur l'achalandage des clubs de golf.

3.8.1 LA DURÉE DE LA SAISON DE GOLF

En s'appuyant sur la méthode de Lamothe et Périard (1988), la durée de la saison de golf a été calculée en tenant compte de la température moyenne de l'air et de la séquence des jours avec une couche nivale supérieur à 0,1m. Pour estimer le début et la fin de la saison de golf les conditions suivantes ont été déterminées :

1. Début de la saison commence lorsque les conditions suivantes sont réunies: le couvert de neige = 0,0 m pendant 10 jours consécutifs et la température moyenne =10°C (la journée de départ).
2. Fin de saison coïncide avec la dernière occurrence d'une température moyenne de 10°C ou la première occurrence d'un couvert de neige >0,1m.

3.8.2 LES INDICATEURS AGOCLIMATIQUES

Pour évaluer les impacts des conditions climatiques néfastes hors saison, par exemple les pluies excessives automnales ou l'englacement des gazons pendant l'hiver, nous avons utilisé le logiciel *AgroX*, élaboré par les chercheurs d'agriculture Canada pour étudier les impacts des conditions climatiques automnales et hivernales sur le foin, une espèce assez proche des gazons utilisés sur les terrains de golf au Québec (Bélanger et al., 2001).

Le programme *AgroX* exige les paramètres climatiques suivants sous une base quotidienne: les températures minimales, maximales et moyennes et les précipitations sous forme de pluie et de neige. La simulation s'effectue du 1^{er} août au 31 juillet, afin d'obtenir la saison hivernale de chaque année au complet.

3.8.2.1 Les indicateurs agoclimatiques automnaux

L'indicateur **FH COLD** représente la somme des degrés-jours de températures <5 °C durant l'automne. Il indique les conditions thermiques pendant la période de refroidissement et reflète le durcissement (*hardening*) potentiel des racines et des parties aériennes des espèces gazonnantes.

La variable **FH RAIN** représente le rapport entre la somme des précipitations reçues durant la période de durcissement automnale et la longueur de celle-ci. Cet indice nous indique les conditions d'humidité pendant l'acquisition de la robustesse au froid : les conditions plus humides diminuent le durcissement.

3.8.2.2 Les indicateurs agoclimatiques hivernaux

Le paramètre **W THAW** reflète l'accumulation de degrés-jours avec des températures >0 °C durant la saison froide, c'est-à-dire entre la première et dernière date d'occurrence d'une température de -15 °C. Cet indice se calcule en divisant les degrés-jours >0 °C par la durée de la saison froide. Alors, il révèle la perte probable de robustesse des espèces.

Le paramètre **W COLD** indique la différence entre le nombre de jours avec un couvert de neige d'au moins 0,1m et la durée de la période froide. Cet indice comporte d'habitude des valeurs négatives (grâce à la période froide plus longue que celle qui a un couvert de neige) qui reflètent l'exposition directe des plantes de gazon au froid.

Quant à **W RAIN** il représente le rapport entre le total des précipitations liquides de la période froide et la longueur de celle-ci. Donc il reflète la probabilité de formation de glace au sol conduisant aux dommages importants à la végétation.

3.8.3 LES INDICATEURS CLIMATIQUES

A l'intérieur de la saison de golf sont calculées les caractéristiques suivantes :

- 1 **Nj tmax $\geq 30^{\circ}\text{C}$** - révèle le nombre de jours chauds. Pendant ces jours il devient difficile de pratiquer le sport à cause de la chaleur intense.
- 2 **Canicule** – montre le nombre de jours chauds consécutifs ($t_{\text{max}} \geq 30$ pendant 3 jours consécutifs) : cette variable exprime la chaleur intense prolongée.
- 3 **Nj tmin $\geq 27^{\circ}\text{C}$** – exprime le nombre de jours avec une température minimale de 27°C : cette caractéristique indique les nuits très chaudes propices au développement d'une bactérie ravageant les verts (bactérie mangeuse de *green*) (Singh et al., 2006).
- 4 **Pluviosité (précipitation $\geq 0,5\text{mm}$)** indique le nombre de cas de trois jours consécutifs pendant la saison de golf avec des précipitations de $\geq 0,5\text{mm}$. Cette caractéristique dénote les périodes très humides défavorables à la pratique du golf.
- 5 **Nj prcp $\geq 0,1\text{mm}$** - désigne le nombre de jours de pluie durant la saison de golf qui pourrait influencer l'achalandage.

En dehors de la saison de golf est ensuite calculé le paramètre climatique **Nj tmin $< -15^{\circ}\text{C}$** et **CdNj = 0,0cm** qui cumule les jours avec une température minimale de -15°C et un couvert de neige de 0,0 cm. Cet indice, de même que **W COLD**, reflète l'exposition directe des plantes de gazon au froid.

Nous avons choisi la méthodologie des indicateurs agroclimatiques ainsi que des indicateurs climatiques (Nj tmax $\geq 30^{\circ}\text{C}$, Canicule et Nj tmin $\geq 27^{\circ}\text{C}$,) en s'appuyant sur le travail de Singh et al., (2006).

4 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Ce chapitre présente les résultats obtenus ainsi que les discussions les concernant. Les premiers trois sous-chapitres sont en relation avec les simulations des taux d'irrigation au moyen du modèle EPIC basées sur trois sources de données notamment les données climatiques observées et celles simulées par CGCM1 et par HadCM3. Une analyse comparative entre les résultats obtenus au moyen des deux dernières séries de données est réalisée dans le 4^e sous-chapitre. Ensuite, les résultats relatifs aux indicateurs agroclimatiques et climatiques sont présentés. Finalement, une analyse de la durée de la saison de golf dans la région d'étude a été effectuée.

4.1 LES SIMULATIONS DES TAUX D'IRRIGATION AVEC LES DONNÉES OBSERVÉES

Pendant la période chaude de l'année, les précipitations ne sont pas toujours suffisantes pour une croissance et un développement satisfaisant des espèces gazonnantes. Alors, afin de compenser pour le déficit hydrique du sol, il faut irriguer. Selon Beard (1973) le midi est la période la plus propice de la journée pour procéder à l'irrigation car les feuilles restent humides pendant un court intervalle de temps diminuant, ainsi, la probabilité de propagation des maladies.

Ce sous chapitre contient les résultats des simulations des taux d'irrigations, en employant les données climatiques observées, pour trois régions du sud du Québec de même que leurs analyses.

4.1.1 RÉGION DES LAURENTIDES (SOUS RÉGION DE MONTRÉAL)

Le modèle EPIC offre la possibilité d'établir le volume et la fréquence d'arrosage mensuel pour cette région. En utilisant les données climatiques observées pour la période 1961-1990, notamment la température maximale, la température minimale, le rayonnement solaire, l'humidité relative et la vitesse du vent nous avons réussi trois simulations pour

estimer les taux d'irrigation pour les espèces gazonnantes dans la région de Montréal. Pour la première simulation, nous avons prévu l'irrigation quand il y a un déficit hydrique du sol de 4mm (critère de 4mm) tandis que pour la deuxième et troisième simulations du déficit de 9 mm (critère de 9mm) et 13 mm (critère de 13mm), respectivement.

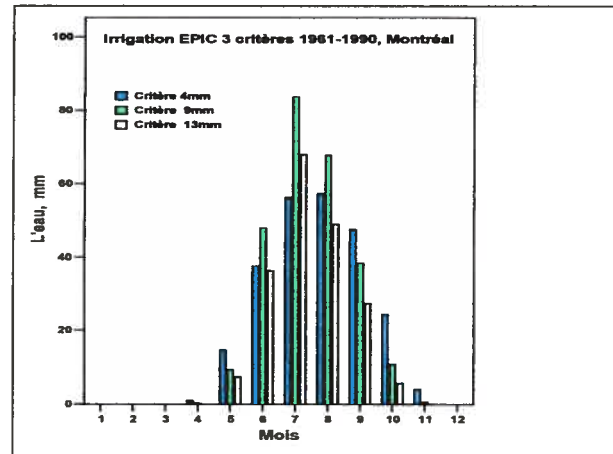


Figure 6. Les taux moyens mensuels d'irrigation pour la région de Montréal (les critères de 4, 9 et 13 mm), données observées 1961-1990

Ces critères sont choisis suite à la validation du modèle EPIC durant l'été 2004 et l'été 2005 (voire le sous-chapitre 3.4.1). Ainsi, nous avons constaté que la quantité d'irrigation diminue lorsqu'on augmente le taux du critère d'irrigation de plus de 9 mm (tableau XIX). Ceci peut s'expliquer par le fait qu'en augmentant le déficit d'eau du sol (le taux du critère d'irrigation) on augmente aussi la probabilité que ceci puisse être satisfait par des précipitations atmosphériques. C'est-à-dire qu'en attendant l'occurrence de déficit d'eau du sol (pour un déficit important il faut attendre une période plus longue) il peut pleuvoir et, par conséquent, le déficit attendu pourrait être éliminé entre-temps. Par conséquent, les taux d'irrigation mensuelles et annuelles diminuent. Toutefois toutes les trois simulations, basées sur les trois critères, indiquent que la plus grande quantité d'irrigation, (d'environ de 60-80 mm) est nécessaire dans les mois de juillet et d'août. Pour les mois de juin et septembre des quantités moyennes d'environ de 40-50 mm sont nécessaires et pour les mois de mai et d'octobre un volume d'environ de 10 mm est requis (2e critère de 9mm) (figure 6).

Les graphiques pour les taux d'irrigation annuels révèlent une grande variabilité du paramètre étudié (Annexe B). Ainsi, il y a des années où la saison d'irrigation a commencé en avril (1987). Selon le critère de 9mm, dans certaines années elle s'est terminée en novembre (1970 et 1978). Les simulations montrent que l'irrigation a été nécessaire pour toutes les années de la période d'étude, pendant au moins quatre mois par années (1976, par exemple).

Tableau XIX. Les quantités moyennes mensuelles d'irrigation (les critères des 4, 9 et 13mm) sur les gazons du terrain de golf dans la région de Montréal, données observées 1961-1990

Critères	Moyennes mensuelles, mm								An., mm
	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	
4mm	0,9	14,5	37,6	56,3	57,3	47,6	24,4	4,0	242,6
9mm	0,3	9,3	48,0	83,7	67,8	38,4	10,8	0,6	258,9
13mm	-	7,4	36,4	68,0	49,0	27,3	5,6	-	193,7

Ensuite, sont examinées les causes probables qui auraient pu déterminer la fluctuation temporelle des taux d'irrigation dans la région de Montréal pendant la période 1961 – 1990. Au moyen d'analyses de régressions les relations existantes ont été établies entre l'irrigation d'une part et les précipitations et l'évapotranspiration potentielle d'autre part. Premièrement, pour chaque paramètre climatique nous avons calculé les différences entre les taux mensuels et les taux mensuels moyens de la période 1961-1990. De cette façon sont obtenus les différences ou les indices suivantes:

- $\Delta IRGA$ - la différence entre les taux d'irrigation mensuelle et les taux d'irrigation mensuelle moyenne de la période 1961-1990 ;
- $\Delta PRCP$ - la différence entre les taux des précipitations mensuelles et les taux des précipitations mensuelles moyennes de la période 1961-1990);
- ΔPET - la différence entre les taux d'évapotranspiration potentielle mensuelle et les taux mensuels moyens de la période 1961-1990).

Deuxièmement, sont exécutées des régressions (linéaire et quadratique) où $\Delta IRGA$ est considéré comme variable dépendante tandis que $\Delta PRCP$ et ΔPET sont traités comme des variables indépendantes. Les résultats révèlent que la fluctuation des taux mensuels d'irrigation de la période 1961-1990 a été déterminée à la fois par des variations temporelles des précipitations et d'évapotranspiration potentielle (Annexe C, figures C1 et

C2). Notons que l'augmentation des taux d'irrigation pourrait être causée par une diminution des taux des précipitations ou d'une augmentation des taux d'évapotranspiration potentielle (Annexe D). Analysant les graphiques annuelles d'annexe D qui représentent les écarts mensuels d'évapotranspiration potentielle (PET), d'évapotranspiration (ET), des précipitations (PRCP), et d'irrigation (IRGA) par rapport aux moyennes mensuelles pluriannuelles de ceux-ci, nous avons établi pour la région de Montréal les caractéristiques suivantes:

- l'évapotranspiration a une faible variation interannuelle, par conséquent ceci aura un impact moins prononcé que les précipitations sur les taux mensuels d'irrigation;
- quant aux précipitations, les fluctuations quantitatives temporelles de celles-ci déterminent principalement la fréquence et les taux d'arrosage;
- l'augmentation des taux d'irrigation est causée habituellement par une diminution des valeurs mensuelles des précipitations par rapport aux moyennes mensuelles. Comme exemple, on peut citer, entre autre, le mois de septembre 1961, les mois de mai et de juin 1964, le mois de juin 1965, les mois de juin et de juillet 1970, les mois de mai et de juin 1980, le mois de juin 1983, les mois de mai et de juillet 1982 et le mois d'août 1987 ;
- parfois, le déficit hydrique mensuel est dû à la fois à un régime pluviométrique déficitaire et d'une diminution de jours pluvieux (p. ex. le mois de septembre 1961, le mois de juin 1965, et le mois de mai 1980, etc.);
- une baisse significative des taux mensuels d'irrigation peut être conditionnée par une augmentation des précipitations mensuelles par exemple au mois de juin et au mois de juillet 1972 ou au mois de juin 1973;
- des diminutions des taux d'irrigation pour certains mois se sont produits tandis qu'il y avait une baisse des précipitations et une hausse d'évapotranspiration, par exemple, aux mois de juin et juillet 1971, au mois de juin 1974. Cela a été probablement dû à une augmentation importante des valeurs mensuelles des précipitations aux mois précédents.

Il importe de souligner une situation intéressante au mois de juillet 1987. Pendant ce mois, une quantité de précipitations dépassant de 150% la valeur moyenne mensuelle a été

enregistrée. Néanmoins, les taux d'irrigation sont restés assez élevés (près de la moyenne mensuelle) du fait que la plus grande partie de ces précipitations (131,7 mm) est tombée pendant deux jours : le 14 juillet (57,4 mm) et le 18 juillet (38,0 mm). Un cas semblable a été enregistré dans le mois de juin 1988, lorsque 63,6 mm de précipitations, soit 88% du total mensuel de 72,3mm (représentant presque la normale de la période 1961-1990), sont tombés pendant les derniers six jours de ce mois et qui à provoqué l'augmentation des besoins d'irrigation pendant la première partie de mois. Un cas particulier a été enregistré en 1976. Les taux des précipitations mensuelles estivales auraient varié de $\pm 20\%$ par rapport aux valeurs moyennes mensuelles de la période 1961-1990 tandis que nous constatons une diminution des taux d'irrigation. Cela s'explique par le fait que dans ces mois un nombre important de jours pluvieux a été enregistré. De plus, une quantité importante d'humidité est tombée pendant le mois de mai (tableau XX).

Tableau XX. Les mois avec des fluctuations importantes des taux d'irrigation (critère de 9 mm) et des précipitations par rapport aux moyennes dans la région de Montréal, période 1961-1990

Année	Mois	PRCP, mm		ET, mm		Nr. jours pluvieux*		IRGA, mm	
		Mens.	Moy mens.	Mens.	Moy mens.	Mens.	Moy mens.	Mens.	Moy mens.
1961	09	21,6	86,9	64,3	63,5	9	15,1	54	38,4
1964	06	32,1	82,9	112,5	121,2	14	16,7	108	48
1965	06	19,0	82,9	108,3	121,2	12	16,7	81	48
1970	06	49,4	82,9	129,7	121,2	17	16,7	90	48
1970	07	55,5	86,1	117,2	119,8	18	16	117	83,7
1971	06	48,4	82,9	143,5	121,2	13	16,7	9	48,0
1971	07	57,0	86,1	146,0	119,8	16	16	27	83,7
1972	06	134,8	82,9	115,0	121,2	16	16,7	0	48,0
1972	07	156,2	86,1	133,7	119,8	18	16	9	83,7
1976	05	119,8	68,8	100	106,4	23	13,4	0	9,3
1976	06	84,8	82,9	140,1	121,2	18	16,7	0	48,0
1976	07	104,8	86,1	132,1	119,8	21	16	18	83,7
1976	08	80,9	100,7	91,7	97,0	20	17,2	72	67,8
1980	05	46,8	68,8	89,5	106,4	12	17,6	81	9,3
1980	06	44,4	82,9	98,3	121,2	16	16,7	99	48,0
1982	07	66,3	86,1	125,8	119,8	14	16	126	83,7
1982	07	170,2	100,7	99,4	97,0	21	17,2	126	67,8
1983	06	39,8	89,9	17	121,2	16	16,7	99	48,0
1988	06	72,3	82,9	108,5	121,2	14	16,7	99	48,0
1989	07	30,3	86,1	121,3	119,8	10	16	117	83,7
1987	07	131,7	86,1	117,4	119,8	14	16	81	83,7
1987	08	54,7	100,7	99,9	97	13	17,2	90	67,8

Note: * les jours avec des précipitations $\geq 0,1$ mm

Les simulations avec le modèle de culture EPIC ont été également effectuées selon différentes séries de données climatiques :

- 4 paramètres dont la température maximale, la température minimale les précipitations et le rayonnement solaire;
- et 6 paramètres dont la température maximale, la température minimale les précipitations le rayonnement, l'humidité relative et la vitesse du vent.

Cette méthode a été adoptée afin d'éviter les problèmes liés à la collecte de certaines données climatiques.

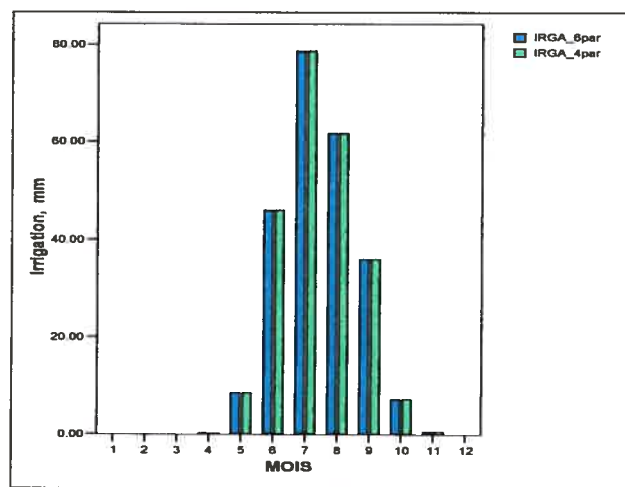


Figure 7. Irrigation prévue, critère de 9 mm, avec 4 (IRGA 4par) et 6 paramètres (IRGA 6par) pour la région de Montréal, 1961-1990 (données observées)

Les taux moyens mensuels d'irrigation obtenus au moyen du modèle EPIC avec 4 paramètres climatiques sont semblables à ceux de la simulation avec 6 paramètres (figure 7). Donc, il est possible d'effectuer le calcul des taux d'irrigation au moyen du modèle EPIC en utilisant au moins 4 paramètres climatiques: la température maximale, la température minimale les précipitations et le rayonnement solaire.

4.1.2 LA RÉGION DES CANTONS DE L'EST

En utilisant les données climatiques observées de la période 1978-1990 de la station climatique Sherbrooke dont la température maximale, la température minimale, les précipitations et le rayonnement solaire, nous avons réalisé trois simulations au moyen du

modèle EPIC afin d'estimer les taux d'irrigation pour le gazon des terrains de golf de ladite région.

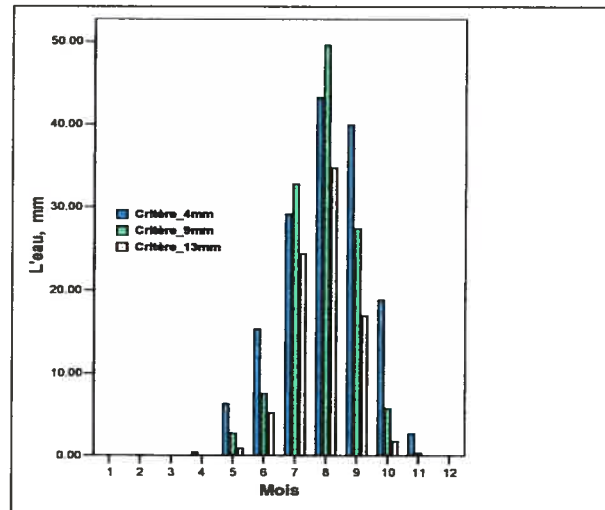


Figure 8. Les taux moyens mensuels d'irrigation pour la région de Sherbrooke (les critères de 4, 9 et 13 mm), données observées 1961-1990

Les simulations, basées sur trois critères d'irrigation, démontrent que la plus grande quantité d'eau, d'environ 50mm, (le critère de 9mm) est nécessaire pour l'irrigation au mois d'août (figure 8). Pour les mois de juillet et de septembre environ 30mm d'eau est demandée et des volumes peu significatifs sont nécessaires au début de la saison de végétation (tableau XXI). Les graphiques pour les taux d'irrigation annuels présentent une grande variabilité du paramètre étudié (Annexe E). Mais, normalement, la saison d'irrigation commence au mois de juin et se termine au mois de septembre. Cependant, il y a des années où l'irrigation a été nécessaire pendant 7 mois (1979) ou au contraire, seulement pendant 3 mois (1986, 1990) (critère de 9mm).

Ensuite, nous avons essayé de trouver les principaux facteurs qui ont déterminé la fluctuation temporelle des taux d'irrigation dans la région des Cantons de l'Est pendant la période 1978 – 1990.

Tableau XXI. Les quantités moyennes mensuelles d'irrigation (les critères des 4, 9 et 13mm) sur les gazons des terrains de golf dans la région de Sherbrooke données observées 1978-90

Le déficit d'eau, mm	Les mois, mm								An., mm
	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	
4mm	0,4	6,3	15,3	29,1	43,2	39,9	18,8	2,7	155,7
9mm	0,0	2,7	7,5	32,7	49,5	27,3	5,7	0,3	125,7
13mm	0,9	5,2	24,3	34,7	16,9	1,7	0,0	0,0	83,7

Au moyen des régressions nous avons établi le rapport corrélatif entre l'irrigation et les précipitations d'une part et entre l'irrigation et l'évapotranspiration potentielle d'autre part. D'abord, pour chaque paramètre climatique les différences entre les taux mensuels est les taux mensuels moyens de la période 1978-1990 sont calculés. De cette façon, les différences suivantes sont obtenues: $\Delta IRGA$ (la différence entre les taux d'irrigation mensuelle et les taux d'irrigation mensuelle moyenne de la période 1978-1990), $\Delta PRCP$ (la différence entre les taux des précipitations mensuelles et les taux des précipitations mensuelles moyennes de la période 1978-1990), ΔPET (la différence entre les taux d'évapotranspiration potentielle mensuelle et les taux mensuels moyens de la période 1978-1990). Ensuite, deux régressions où $\Delta IRGA$ est pris comme une variable dépendante de $\Delta PRCP$ et de ΔPET sont exécutées. Les résultats montrent que la fluctuation des taux mensuels d'irrigation de la période 1978-1990 a été déterminée à la fois par des variations temporelles des précipitations et d'évapotranspiration potentielle (Annexe F, figures F1 et F2.). Notons que la hausse des taux d'irrigation pourrait être causée par une baisse des taux des précipitations ou d'une augmentation des taux d'évapotranspiration potentielle (Annexe G.).

Analysant les graphiques annuels de l'annexe G portant sur les valeurs mensuelles et les moyens mensuels de l'évapotranspiration potentielle (PET), de l'évapotranspiration (ET), des précipitations (PRCP), et de l'irrigation (IRGA) de la période 1978-1990 pour la région du Sherbrooke plusieurs constats sont établis:

- l'évapotranspiration, de même que dans la région de Montréal, a une faible variation interannuelle; par conséquent ceci aura un impact moins prononcé que les précipitations sur les taux mensuels d'irrigation;
- quant aux précipitations, les fluctuations quantitatives temporelles déterminent principalement la fréquence et les taux d'arrosage du gazon des terrains de golf dans la région des Cantons de l'Est;
- on constate que l'augmentation des taux d'irrigation est causée normalement par une diminution des valeurs mensuelles des précipitations par rapport aux moyennes mensuelles. C'est le cas entre autre, du mois de juillet 1978, du mois de mai 1980, du mois de juin 1983 et du mois du juillet 1989;
- une baisse significative des taux mensuels d'irrigation peut être conditionnée par une augmentation des précipitations mensuelles comme par exemple aux mois de juin et de juillet 1985 ou au mois d'août 1988.

4.1.3 LA RÉGION DE LA VILLE DU QUÉBEC

En couplant le modèle EPIC aux données climatiques observées de la période 1961-1990 dont la température maximale, la température minimale, le rayonnement solaire, l'humidité relative et la vitesse du vent, nous avons effectué trois simulations pour estimer les taux d'irrigation pour les espèces de gazon des régions tempérés dans la région du Québec. De la même façon que pour les deux régions précédentes, l'irrigation est simulé au moyen du modèle EPIC en utilisant les mêmes critères: de 4, de 9 et de 13mm.

Les résultats indiquent que la plus grande quantité d'eau d'irrigation est nécessaire dans le mois d'août et est estimée à 50 mm environ (figure 9).

Pour les mois de juillet et de septembre des quantités moyennes en eau d'irrigation d'environ 30 mm sont nécessaire et pour les mois de juin et d'octobre un volume peu significatif d'environ 6 – 7mm est demandé (le critère de 9 mm, tableau XXII).

Les graphiques pour les taux d'irrigation annuels révèlent, aussi, une grande variabilité du paramètre étudié (Annexe H). Ainsi, il y a des années où la saison d'irrigation a commencé

au mois de mai (1972, 1978, 1982, etc.), des années où elle s'est terminée en novembre (1977) et des années où l'irrigation n'a été nécessaire que pendant un seul mois (1974) (critère de 13mm). Cependant, pour la plupart des années, l'arrosage a été nécessaire au moins trois mois: soit de juin à août ou de juillet à septembre.

Tableau XXII. Les quantités moyennes mensuelles de l'eau (selon 3 critères) calculé d'être irrigué sur le gazon du terrain du golf dans la région de Québec en utilisant les données météo observées de la période 1961-1990

Les critères	Moyennes mensuelles, mm								An., mm
	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov	
4mm	0,4	6,3	15,3	29,1	43,2	39,9	19,2	2,7	156,1
9mm	-	2,7	7,5	32,7	49,5	27,3	5,7	0,3	125,7
13mm	-	0,9	5,2	24,3	34,7	16,9	1,7	-	83,7

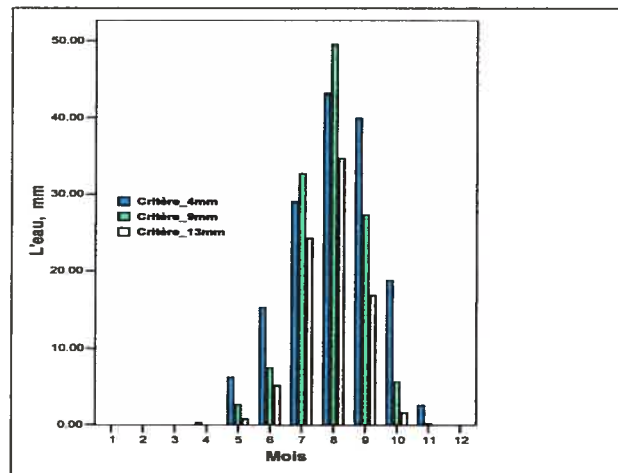


Figure 9. Les taux moyens mensuels d'irrigation pour la région de Québec (les critères de 4, 9 et 13 mm), données observées 1961-1990

Ensuite, comme pour les deux régions précédentes, nous avons essayé de trouver les principaux facteurs qui ont déterminé la fluctuation temporelle des taux d'irrigation dans la région de Québec pendant la période 1961 – 1990. Suite aux analyses de régressions la corrélation entre l'irrigation, d'une part et les précipitations et l'évapotranspiration potentielle, d'autre part est établie. Au début, pour chacun des paramètres climatiques les différences entre les taux mensuels et les taux mensuels moyens de la période 1961-1990

sont calculées. De cette façon, sont obtenus les mêmes indices que pour les régions précédentes: $\Delta IRGA$, $\Delta PRCP$, ΔPET et ΔPET . Finalement, des analyses de régressions avec $\Delta IRGA$ comme variable dépendante et $\Delta PRCP$ et ΔPET - comme variables indépendantes sont exécutées. Les résultats révèlent que la fluctuation des taux mensuels d'irrigation de la période 1961-1990 a été déterminée à la fois par des variations temporelles des précipitations et d'évapotranspiration potentielle (Annexe I, figures I1 et I2). Ainsi, l'augmentation des taux d'irrigation peut être causée par un abaissement des taux des précipitations ou d'un accroissement des taux d'évapotranspiration potentielle (Annexe J).

En analysant les graphiques de l'annexe J avec les écarts des valeurs mensuelles d'évapotranspirations potentielle (PET), d'évapotranspirations (ET), des précipitations (PRCP) et d'irrigation (IRGA), de la période 1961-1990 par rapport aux moyennes mensuelles de ceux-ci pendant la même période pour la région du Québec, nous avons établi quelques constats:

- l'évapotranspiration, de même que dans les deux régions précédentes, a une faible variation interannuelle par conséquent ceci aura un impact moins prononcé que les précipitations sur les taux mensuels d'irrigation;
- quant aux précipitations, les fluctuations quantitatives temporelles de celles-ci déterminent principalement la fréquence et les taux d'arrosage sur les terrains de golf dans la région d'étude;
- l'augmentation des taux d'irrigation est causée habituellement par une diminution des valeurs mensuelles des précipitations par rapport aux moyennes mensuelles. Par exemple, peuvent être mentionnés, entre autre, le mois de juillet 1961, le mois d'août 1962, les mois de juillet et d'août 1968, le mois d'août 1975 et le mois de d'août 1985;
- une baisse significative des taux mensuels d'irrigation peut être conditionnée par une augmentation des précipitations mensuelles comme par exemples au mois de août 1965, au mois de juillet 1967, au mois d'août 1971, aux mois de juillet et d'août 1976 et aux mois de juin et de juillet 1986.

En conclusion, l'intensité et la fréquence des précipitations pendant toute la période de l'année et surtout pendant la période de végétation ont une grande influence sur le bilan hydrique des gazons des terrains de golf. Par conséquent, l'évaluation plus exacte de ce paramètre climatique joue un rôle important dans l'estimation des activités d'irrigation des espèces gazonnantes.

4.2 LES SIMULATIONS AVEC LES PROJECTIONS DU CGCM1- SCÉNARIOS FUTURS

Ce sous-chapitre est constitué de la présentation et de l'analyse des résultats des simulations des taux d'irrigations, obtenues à l'aide des scénarios climatiques de CGCM1 pour trois régions du sud du Québec.

4.2.1 RÉGION DES LAURENTIDES (SOUS RÉGION DE MONTRÉAL)

4.2.1.1 Les tendances futures des paramètres climatiques

Les projections futures du modèle climatique canadien de première génération révèlent une tendance à la hausse pour les températures et une stabilité relative pour les précipitations. Ainsi, par rapport à la période 1961-1990, les températures moyennes annuelles de la région de Montréal connaîtront une possible augmentation de 1,4 °C et de 2,7 °C pendant les périodes 2010-2039 et 2040-2069 respectivement (figure 10).

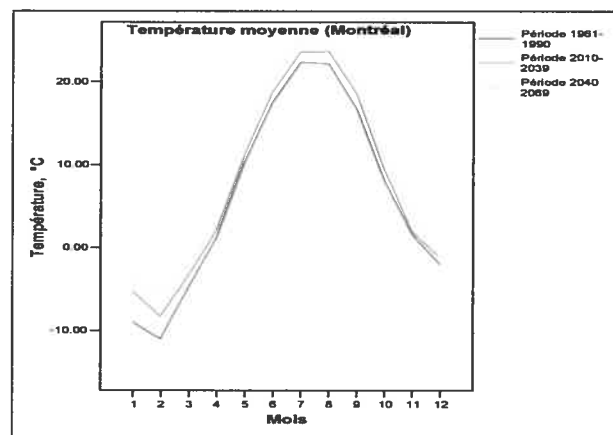


Figure 10. La température moyenne à Montréal pendant trois périodes (données de CGCM1 après la réduction de l'échelle spatiale)

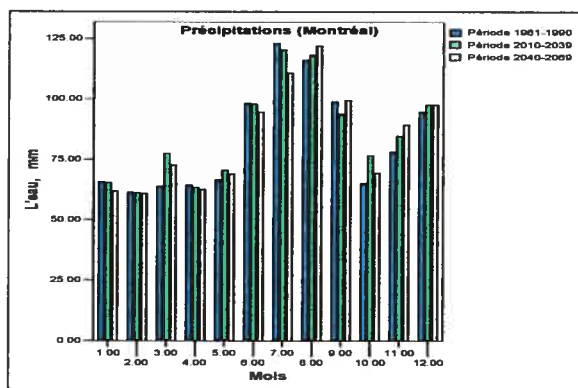


Figure 11. Les précipitations à Montréal pendant trois périodes (données de CGCM1 après la réduction de l'échelle spatiale)

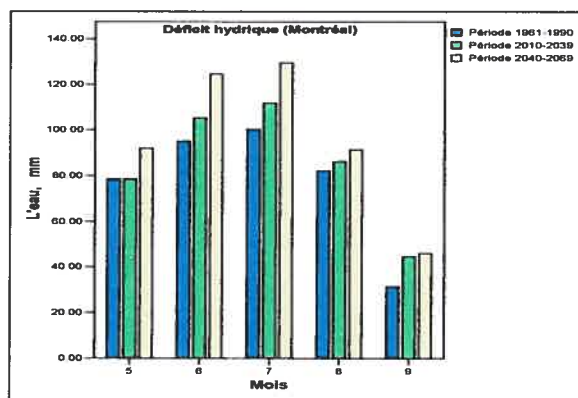


Figure 12. Déficit hydrique à Montréal pendant trois périodes à l'étude selon le scénario CGCM1

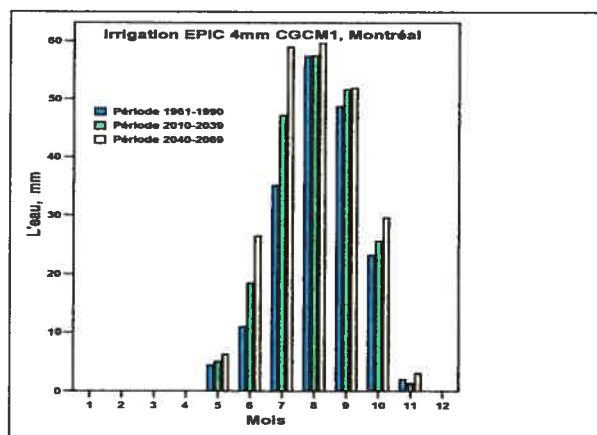


Figure 13. Irrigation prévue (critère de 4mm), Montréal, CGCM1, 3 périodes

Tableau XXIII. Le régime mensuel des précipitations (PRCP, mm) et des températures moyennes (Tmoy, °C) à Montréal selon les projections futures de CGCM1, 3 périodes

Mois	Période 1961-1990	Période 2010-2039		Période 2040-2069		Période 1961-1990	Période 2010-2039		Période 2040-2069	
	PRCP	PRCP	Δ (%)	PRCP	Δ (%)	Tmoy	Tmoy	Δ (°C)	Tmoy	Δ (°C)
1	65,7	65,2	-0,8	61,8	-5,9	-9,05	-5,32	3,7	-3,72	5,3
2	61,3	61,0	-0,5	60,9	-0,7	-11,10	-8,36	2,7	-5,56	5,5
3	63,8	77,4	21,3	72,6	13,8	-4,86	-3,39	1,5	-2,21	2,7
4	64,4	63,4	-1,6	62,6	-2,8	1,14	2,05	0,9	2,78	1,6
5	66,5	70,5	6,0	68,9	3,6	10,22	11,10	0,9	12,26	2,0
6	98,0	97,6	-0,4	94,4	-3,7	17,52	18,72	1,2	20,11	2,6
7	122,7	120,1	-2,1	110,4	-10,0	22,32	23,56	1,2	24,73	2,4
8	115,8	117,8	1,7	121,6	5,0	22,14	23,59	1,5	24,88	2,7
9	98,6	93,5	-5,2	99,2	0,6	16,74	18,53	1,8	19,64	2,9
10	65,0	76,5	17,7	69,3	6,6	8,09	9,34	1,3	10,77	2,7
11	77,9	84,5	8,5	89,2	14,5	1,55	1,92	0,4	3,56	2,0
12	94,5	97,3	3,0	97,3	3,0	-2,02	-1,24	0,8	-1,29	0,7
An,	82,9	85,4	3,0	84,0	1,3	6,1	7,5	1,4	8,8	2,7

Note : Δ - la différence entre les valeurs moyennes de la période future et celle de contrôle

Les taux moyens annuels des précipitations resteront probablement dans le futur près des valeurs de la période de contrôle (figure 11). Néanmoins, ceux-ci augmenteront légèrement de 3% en 2010 – 2039 et de 1% en 2040 – 2069 par rapport à la période courante. Par conséquent, le déficit hydrique dans la région de Montréal, sous les conditions climatiques futures, augmentera et pourra avoir des impacts sur les conditions hydriques des gazons des terrains de golf (figure 12).

En ce qui concerne la période estivale (juin-août), les températures moyennes mensuelles augmenteront de 1,3°C (2010-2039) et de 2,5 °C (2040-2069) durant les deux périodes estivales futures tandis que les précipitations moyennes mensuelles augmenteront de 1% pour chacune d'elle par rapport à la période estivale de l'intervalle de contrôle (1961-1990). Donc, les valeurs moyennes des écarts des températures et des précipitations de la période estivale sont assez proche des valeurs moyennes annuelles de ceux-ci. Cela s'explique par le fait que, selon les projections futures de CGCM1, les changements climatiques seront plus prononcés durant l'hiver et l'été et moins prononcés pendant les saisons de transition (tableau XXIII).

4.2.1.2 Les tendances futures des taux d'irrigation

Afin d'établir l'impact potentiel des changements climatiques futurs sur les conditions hydriques des espèces gazonnantes, sont simulés les taux d'irrigation avec EPIC en utilisant les mêmes paramètres biologiques des graminées spécifiques pour les régions tempérés et les caractéristiques du sol Argile St.Urbain déjà utilisés pour les simulations avec des données observées. Seules les données climatiques représentant les conditions futures ont été changées.

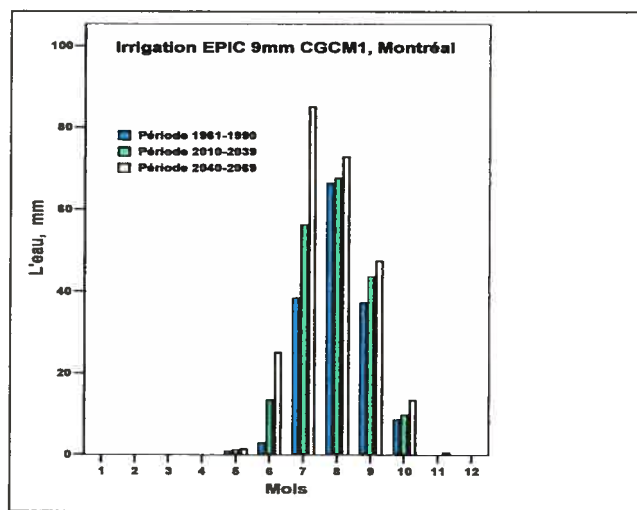


Figure 14. Irrigation prévue (critère de 9mm), Montréal, CGCM1, 3 périodes

Ainsi, sont utilisé les scénarios du modèle climatique canadien CGCM1 notamment la température maximale, la température minimale les précipitations et le rayonnement solaire des trois périodes de trente années chacune : 1961-1990 – la période courante; 2010 – 2039 – la période du futur proche; et 2040 – 2069 - la période du futur lointain. Les données ont été ajustées conformément aux méthodes mentionnées précédemment dans le troisième chapitre.

Sous les conditions du climat futur, les besoins potentiels d'irrigation des espèces de graminées des régions tempérés augmenteront (figures 13 à 15).

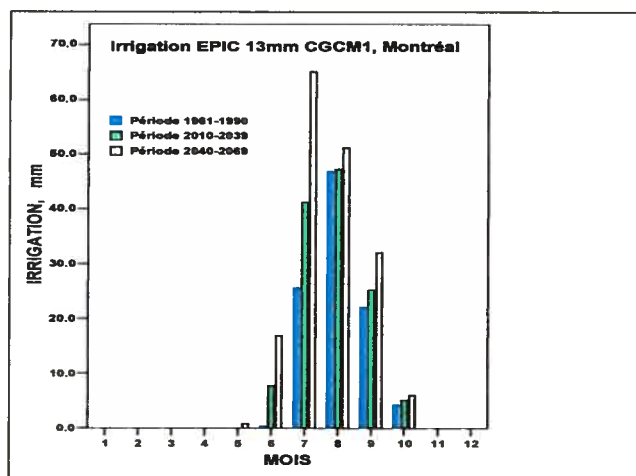


Figure 15. Irrigation prévue (critère de 13mm), Montréal, CGCM1, 3 périodes

En comparant les totaux annuels (critère de 9 mm) de trois périodes, nous avons constaté que les taux d'irrigation augmenteront de 24% dans la période du futur proche (2010-2039) et de 59 % dans la période du futur lointain (2040-2069) par rapport à la période courante (tableau XXV). Les figures 13 à 15 ainsi que les tableaux XXIV à XXVI montrent que les besoins d'irrigation, pour les deux périodes futures, s'élèveront pendant tous les mois de la saison estivale, surtout au début de l'été. Par exemple, les besoins en irrigation augmenteront au mois de juin de 4,5 fois en 2010-2039 et d'environ 8 fois en 2040-2069 par rapport à la période 1961-1990 (critère de 9mm).

Donc, les projections futures indiquent que pour la région de Montréal les taux d'irrigation auront une tendance à la hausse. Selon Beard (1973), les espèces du genre *Poa* (Kentucky bluegrass, Canada bluegrass) ont une tolérance moyenne aux sécheresses. Alors, les gestionnaires des gazons de golf de la région de Montréal doivent trouver des moyens d'adaptation pour gérer le déficit d'eau prévu.

Tableau XXIV. Les quantités moyennes mensuelles potentielles d'eau (selon le critère de 4mm) calculées pour irriguer les gazons des terrains de golf dans la région de Montréal pour 3 périodes

Périodes	Moyennes mensuelles, mm								An., mm	%, vs. 1961-1990
	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov		
1961-1990	0,0	4,4	10,9	35,1	57,3	48,7	23,2	2,0	181,6	100
2010-2039	0,0	5,1	18,4	47,1	57,5	51,6	25,6	1,3	206,6	114
2040-2069	0,0	6,3	26,4	58,9	59,6	51,9	29,6	3,1	235,8	130

Tableau XXV. Les quantités moyennes mensuelles potentielles d'eau (selon le critère de 9mm) calculées pour irriguer les gazons des terrains de golf dans la région de Montréal pour 3 périodes

Périodes	Moyennes mensuelles, mm								An., mm	%, vs. 1961-1990
	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov		
1961-1990	0,0	0,9	3,0	38,4	66,3	37,2	8,7	0,0	154,5	100
2010-2039	0,0	1,2	13,5	56,1	67,5	43,5	9,9	0,0	191,7	124
2040-2069	0,0	1,5	25,2	84,9	72,6	47,4	13,5	0,0	245,1	159

Tableau XXVI. Les quantités moyennes mensuelles potentielles d'eau (selon le critère de 13mm) calculées pour irriguer les gazons des terrains de golf dans la région de Montréal pour 3 périodes

Périodes	Moyennes mensuelles, mm							Totale, mm	%, vs. 1961-1990
	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov		
1961-1990	0,0	0,4	25,6	46,8	22,1	4,3	0,0	99,2	100
2010-2039	0,0	7,8	41,2	47,2	25,1	5,2	0,0	126,5	128
2040-2069	0,9	16,9	65,0	51,1	32,1	6,1	0,0	172,1	173

4.2.2 LA RÉGION DES CANTONS DE L'EST

4.2.2.1 Les tendances futures des paramètres climatiques

Pour la région de Sherbrooke, les projections futures du CGCM1 présentent une tendance à la hausse pour les températures et les précipitations. Ainsi, par rapport à la période de référence, les températures moyennes annuelles connaîtront une augmentation potentielle de 1,6 °C et de 2,9 °C pendant 2010-2039 et 2040-2069 respectivement (figure 16). Les taux moyens annuels des précipitations augmenteraient dans le futur de 9% en 2010 – 2039 et de 16% en 2040 – 2069 par rapport à la période courante. (figure 17).

Sous les conditions du climat futur, les valeurs des écarts moyennes mensuelles des températures et des précipitations de la période estivale (juin-août), auront plus au moins la même grandeur que les taux des écarts moyennes annuelles de ces paramètres climatiques. (tableau XXVII). Par conséquent, selon la projection future du CGCM1, le déficit hydrique augmenterait lui aussi dans la région du Sherbrooke ce qui modifiera les besoins en irrigation des terrains de golf.

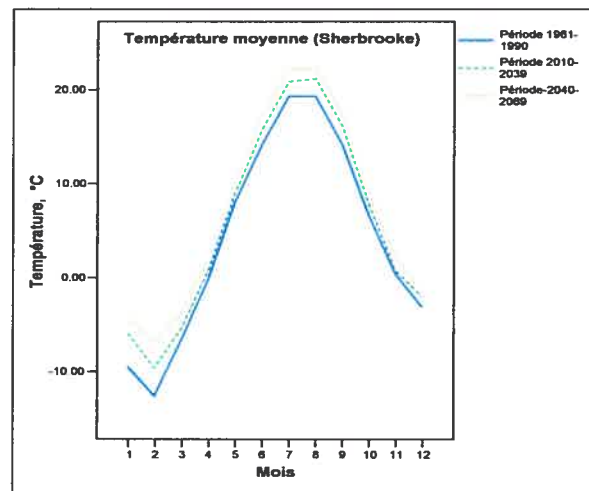


Figure 16. La température moyenne à Sherbrooke pendant trois périodes (données de CGCM1 après la réduction d'échelle spatiale)

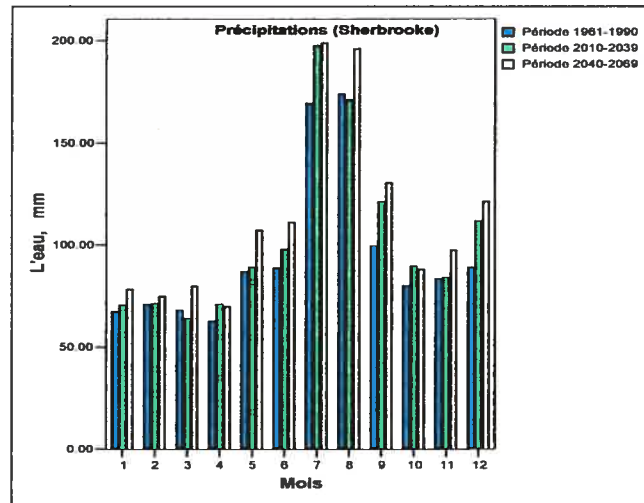


Figure 17. Les précipitations à Sherbrooke pendant trois périodes (données de CGCM1 après la réduction d'échelle spatiale)

Malgré l'augmentation des taux des précipitations, le déficit hydrique dans la région de Sherbrooke augmentera, surtout au début de l'été et par conséquent pourra avoir des impacts sur les conditions hydriques des gazons des terrains de golf (figure 18).

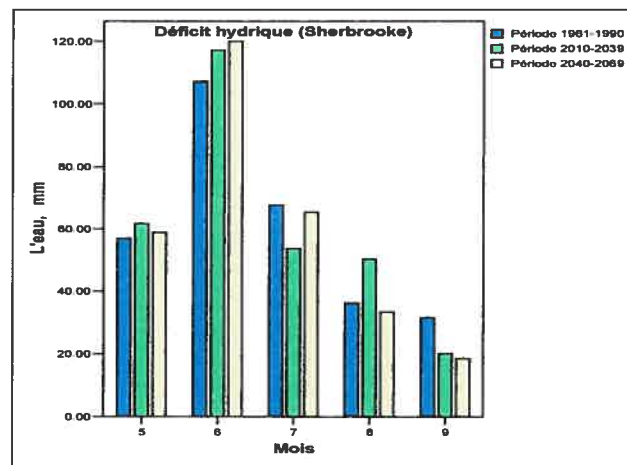


Figure 18. Déficit hydrique à Sherbrooke, CGCM1

Tableau XXVII. Le régime mensuel des précipitations (PRCP) et des températures moyennes (Tmoy) à Sherbrooke selon les projections futures de CGCM1, 3 périodes

MOIS	PÉR. 1961- 1990	PÉRIODE 2010-2039		PÉRIODE 2040-2069		PÉR. 1961- 1990	PÉRIODE 2010-2039		PÉRIODE 2040-2069	
		PRCP	Δ (%)	PRCP	Δ (%)		Tmoy	Δ (°C)	Tmoy	Δ (°C)
1	67.3	70.7	5,1	79,4	18,0	-9,4	-5,5	3,9	-3,9	5,5
2	70.3	71.3	1,4	74,4	5,8	-12,6	-9,5	3,1	-6,8	5,8
3	67.9	62.6	-7,8	79,1	16,5	-6,5	-5,5	1	-3,8	2,7
4	64.5	71.7	11,2	70,8	9,8	-0,5	0,5	1	1,6	2,1
5	86.8	90.5	4,3	106,3	22,5	7,9	8,8	0,9	9,8	1,9
6	88.8	97.8	10,1	110,4	24,3	14,1	15,6	1,5	16,9	2,8
7	169.3	196.2	15,9	198,4	17,2	19,3	20,8	1,5	22,2	2,9
8	173.9	170.2	-2,1	197,3	13,5	19,3	21,1	1,8	22,3	3
9	99.3	121.8	22,7	130,5	31,4	14,2	16,1	1,9	17,5	3,3
10	80	89.9	12,4	88,4	10,5	6,6	7,9	1,3	9,0	2,4
11	83.4	84	0,7	97,8	17,3	0,3	0,7	0,4	2,4	2,1
12	91.8	111.9	21,9	120	30,7	-2,9	-1,7	1,2	-1,6	1,3
An.	95.3	103.2	8,3	112,7	18,3	4,2	5,8	1,6	7,1	2,9

Note : Δ - la différence entre les valeurs moyennes de la période future et celle de contrôle

4.2.2.2 Les tendances futures des taux d'irrigation

Afin d'estimer l'impact potentiel des changements climatiques futurs sur les conditions hydriques des espèces gazonnantes, nous avons simulé les taux d'irrigation avec EPIC en utilisant les paramètres biologiques des espèces de gazon et les caractéristiques du sol *franc sableux Blandford* ainsi que les données climatiques issues du modèle climatique canadien CGCM1 dont la température maximale, la température minimale les précipitations et le rayonnement solaire pour trois périodes : 1961-1990, la période courante; 2010 – 2039, la période du futur proche; et 2040 – 2069, la période du futur lointain. Les données climatiques ont été ajustées conformément aux méthodes mentionnées antérieurement.

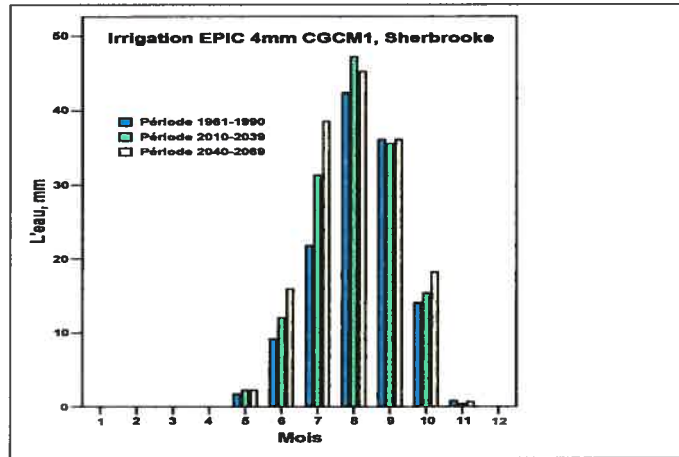


Figure 19. Irrigation prévue (critère de 4mm) Sherbrooke CGCM1, 3 périodes

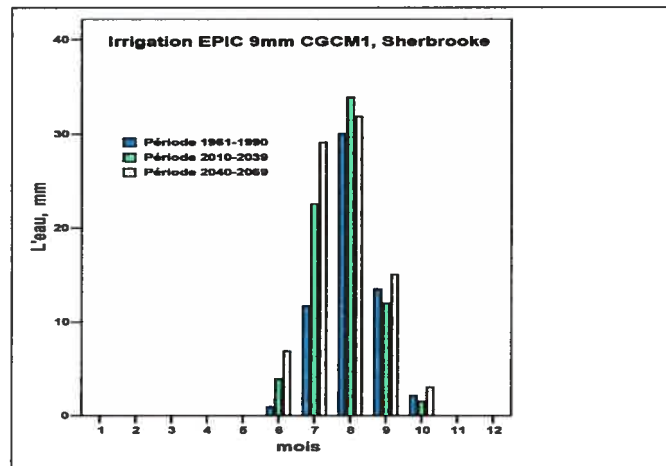


Figure 20 Irrigation prévue (critère de 9mm) Sherbrooke CGCM1, 3 périodes

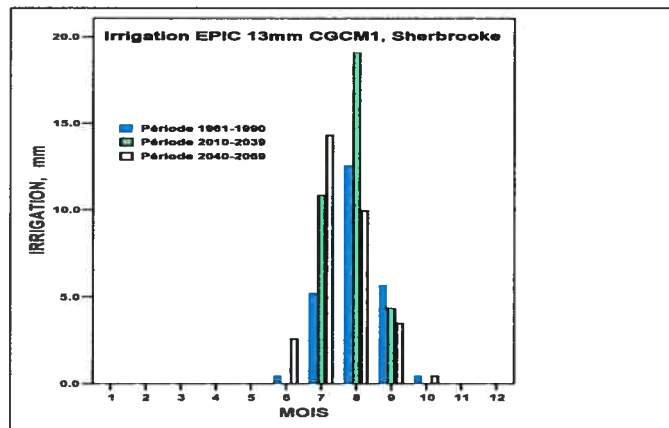


Figure 21. Irrigation prévue (critère de 13mm) Sherbrooke CGCM1, 3 périodes

Sous les conditions du climat futur, les résultats révèlent une plus grande nécessité d'irriguer le gazon des terrains de golf. Les sommes annuelles (critère de 9 mm) de trois périodes indiquent que les taux d'irrigation s'élèveront de 27 % pendant la période du futur proche (2010-2039) et de 47 % pendant la deuxième période future (2040-2069) par rapport à la période courante (tableau XXIX).

Les figures 19 à 21 ainsi que les tableaux XXVIII à XXX montrent que les besoins d'irrigation augmenteraient, spécifiquement pendant le mois de juillet. Par exemple, pendant le mois de juillet ceux-ci s'élèveront d'environ 2 fois durant la période 2010-2039 et de 2,5 fois pendant l'intervalle 2040-2069 (critère de 9 mm) par rapport à la période de contrôle. Les conditions hydriques du début et de fin de la saison de végétation ne supporteront pas des changements considérables. Les tendances à la hausse des taux d'irrigation sont plus significatives pour la période 2010-2039. En comparant la dynamique mensuelle des taux d'irrigation pour la période courante (1961-1990) calculés à partir des données observées et à partir des données du modèle CGCM1, constatons que le maximum mensuel d'irrigation s'enregistre au mois de juillet en premier cas et au mois d'août en deuxième. Ainsi, les projections climatiques du futur indiquent que les taux d'irrigations auront une tendance générale à la hausse.

Tableau XXVIII. Les quantités moyennes mensuelles d'eau (critère de 4mm) calculées pour irriguer les gazons des terrains de golf dans la région des Cantons de l'Est en utilisant les données du CGCM1

Les périodes	Moyennes mensuelles, mm								An., mm	%, vs. 1961- 1990
	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov		
1961-1990	-	1,7	9,2	21,7	42,4	36,1	14,0	0,8	125,9	100
2010-2039	-	2,3	12,0	31,3	47,2	35,6	15,3	0,4	144,1	114
2040-2069	-	2,3	15,9	38,5	45,2	36,1	18,1	0,7	156,8	125

Tableau XXIX. Les quantités moyennes mensuelles d'eau (critère de 9mm) calculées pour irriguer les gazons des terrains de golf dans la région des Cantons de l'Est en utilisant les données du CGCM

Les périodes	Moyennes mensuelles, mm								An., mm	%, vs. 1961- 1990
	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov		
1961-1990	-	-	0,9	11,7	30,0	13,5	2,1	-	58,2	100
2010-2039	-	-	3,9	22,5	33,9	12,0	1,5	-	73,8	127
2040-2069	-	-	6,9	29,1	31,8	15,0	3,0	-	85,8	147

Tableau XXX. Les quantités moyennes mensuelles d'eau (critère de 13mm) calculées pour irriguer les gazons des terrains de golf dans la région des Cantons de l'Est en utilisant les données duCGCM1

Les périodes	Moyennes mensuelles, mm								An., mm	%, vs. 1961- 1990
	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov		
1961-1990	-	-	0,4	5,2	12,6	5,6	0,4	-	24,2	100
2010-2039	-	-	-	10,8	19,1	4,3	-	-	34,2	141
2040-2069	-	-	2,6	14,3	10,0	3,5	0,4	-	30,8	127

4.2.3 LA RÉGION DE LA VILLE DE QUÉBEC

4.2.3.1 Les tendances futures des paramètres climatiques

Selon les projections futures du CGCM1, dans la région du Québec comme dans la région de Sherbrooke, les températures et les précipitations connaîtront un accroissement. De ce fait, par rapport à la période 1961-1990, les températures moyennes annuelles subiront une augmentation possible de 1,4 °C et de 2,6 °C en 2010-2039 et 2040-2069 respectivement (figure 22). Les taux moyens annuels des précipitations augmenteront possiblement dans le futur de 10% en 2010 – 2039 et de 20% en 2040 – 2069 par rapport à la période courante (figure 23).

Quant à la période estivale (juin-août), les températures moyennes mensuelles connaîtront une augmentation de la même grandeur que les températures moyennes annuelles : de 1,4 °C et de 2,5 °C pendant les étés de la période 2010-2039 et 2040-2069 respectivement, par

rapport à la période estivale de l'intervalle 1961-1990. Les taux moyens mensuels des précipitations augmenteraient durant l'été de 13% en 2010 – 2039 et de 31% en 2040 – 2069 par rapport à la période estivale de l'intervalle 1961-1990. Nous constatons donc que la précipitation aura une tendance à la hausse plus grande durant l'été que pendant l'année au complet (tableau XXXI).

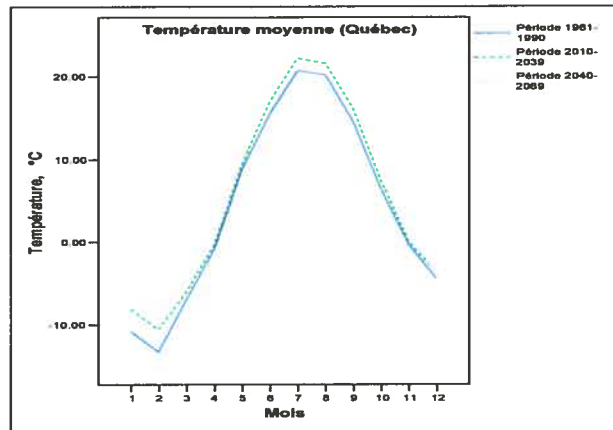


Figure 22. La température moyenne à Québec pendant trois périodes (données de CGCM1 après la réduction d'échelle spatiale)

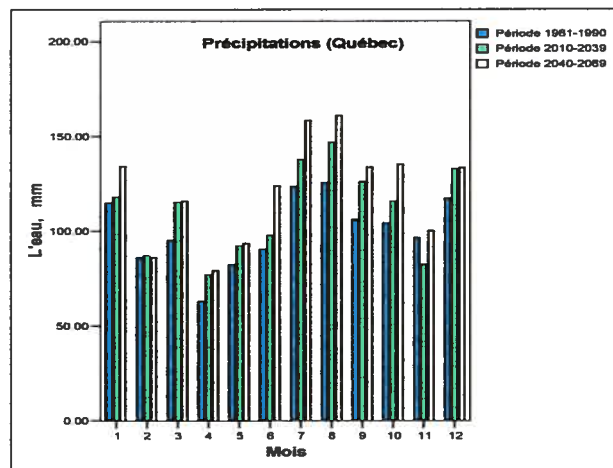


Figure 23. Les précipitations à Québec pendant trois périodes (données de CGCM1 après la réduction d'échelle spatiale)

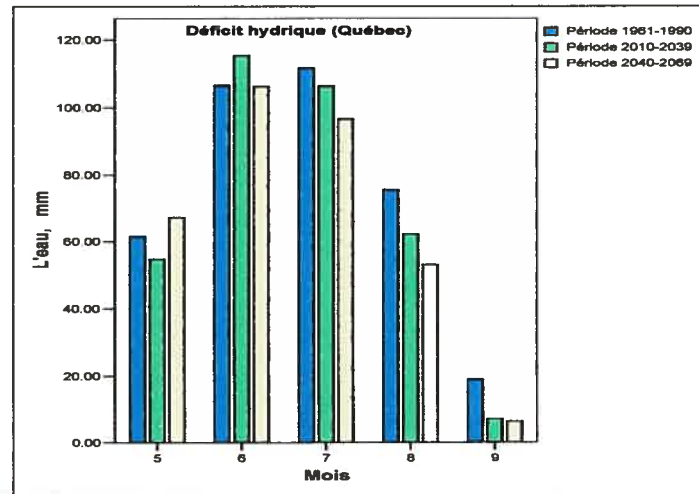


Figure 24. Déficit hydrique à Québec CGCM1, 3 périodes

Il est possible que le déficit hydrique dans la région du Québec diminuera, et par conséquent pourra avoir des impacts sur les conditions hydriques des gazons des terrains de golf (figure 24).

Tableau XXXI. Le régime mensuel des précipitations (PRCP, mm) et des températures moyennes (Tmoy, °C) à Québec selon les projections futures de CGCM1, 3 périodes

Mois	Période 1961-1990			Période 2010-2039		Période 2040-2069		Période 2010-2039			Période 2040-2069	
	PRCP	PRCP	Δ (%)	PRCP	Δ (%)	Tmoy	Tmoy	Δ (°C)	Tmoy	Δ (°C)	Tmoy	Δ (°C)
1	114,8	117,9	2,7	134,2	16,9	-10,9	-8,0	2,9	-6,7	4,2		
2	86,2	87,2	1,2	86,4	0,2	-13,3	-10,5	2,8	-8,1	5,2		
3	95,2	115,1	20,9	115,9	21,7	-6,8	-6,0	0,8	-4,7	2,1		
4	63,1	77,1	22,2	79,3	25,7	-1,5	-0,7	0,8	0,2	1,7		
5	82,4	92,3	12,0	93,7	13,7	7,5	8,4	0,9	9,9	2,4		
6	90,5	97,7	8,0	123,7	36,7	15,4	16,8	1,4	18,1	2,7		
7	123,5	137,7	11,5	158,4	28,3	20,7	22,2	1,5	23,4	2,7		
8	125,5	146,8	17,0	161,0	28,3	20,2	21,6	1,4	22,5	2,3		
9	106,1	126,0	18,8	133,7	26,0	14,5	16,1	1,6	17,3	2,8		
10	104,2	115,7	11,0	135,3	29,8	6,3	7,5	1,2	8,5	2,2		
11	96,5	82,5	-14,5	100,3	3,9	-0,5	-0,1	0,4	1,2	1,7		
12	117,2	132,7	13,2	133,5	13,9	-4,4	-3,7	0,7	-3,7	0,7		
An.	100,4	110,7	10,3	121,3	20,8	3,9	5,3	1,4	6,5	2,6		

4.2.3.2 Les tendances futures des taux d'irrigation

Dans le but d'estimer les impacts potentiels d'un réchauffement climatique sur les conditions hydriques du gazon, nous avons simulé les taux d'irrigation avec EPIC en considérant les mêmes paramètres biologiques des espèces de gazon et du sol Loam argileux à argile Joly ci-dessus mentionnés. Seules les données climatiques futures ont été changées. Ainsi, sont utilisées les données sortant du modèle climatique canadien CGCM1 dont la température maximale, la température minimale les précipitations et le rayonnement solaire pour trois périodes de trente années chacune: 1961-1990, la période courante; 2010 – 2039, la période du futur proche; et 2040 – 2069, la période du futur lointain. Les données climatiques sont ajustées conformément aux méthodes mentionnées précédemment.

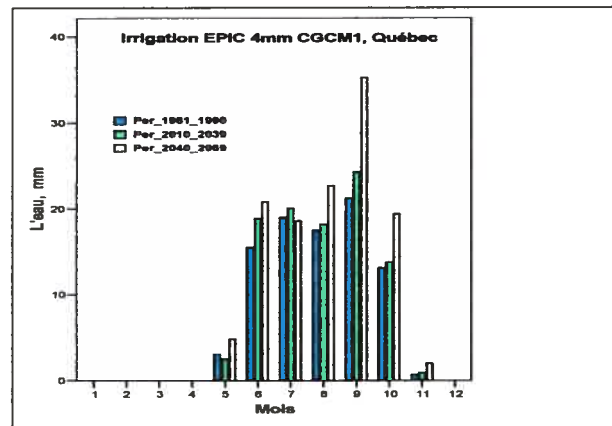


Figure 25. Irrigation prévue (critère de 4mm) Québec CGCM1, 3 périodes

Sous les conditions du climat futur, malgré une diminution des taux du déficit hydrique, les résultats montrent que les besoins potentiels en irrigation des espèces gazonnantes, dans la région du Québec, augmenteront sensiblement (figures 25 à 27). En effet, nous avons constaté que les taux d'irrigation augmenteront de 20 % dans la période du futur immédiat et de 58% dans la période du future éloigné (critère de 9mm) par rapport à la période courante (tableau XXXIII). Notons que les plus importantes augmentations des taux moyens mensuels d'irrigation sont prévues pour la période 2040-2069. Les taux d'arrosage s'élèveront, spécifiquement, pendant les mois d'août et de septembre. Les conditions hydriques du début de la saison de végétation resteront presque inchangées dans le futur.

Les projections du futur indiquent que les taux d'irrigations auraient une tendance générale à la hausse (tableaux XXXII à XXXIY).

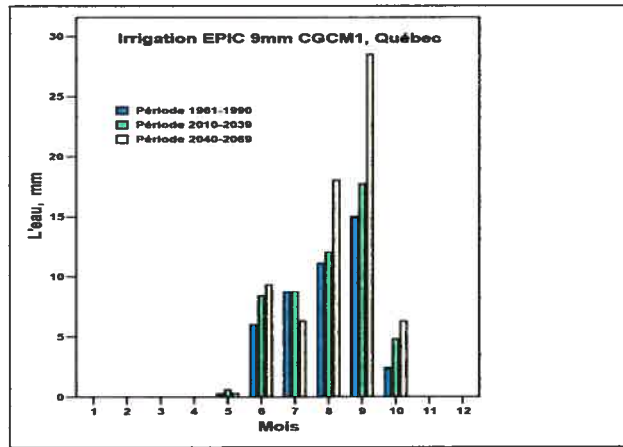


Figure 26. Irrigation prévue (critère de 9mm) Québec CGCM1, 3 périodes

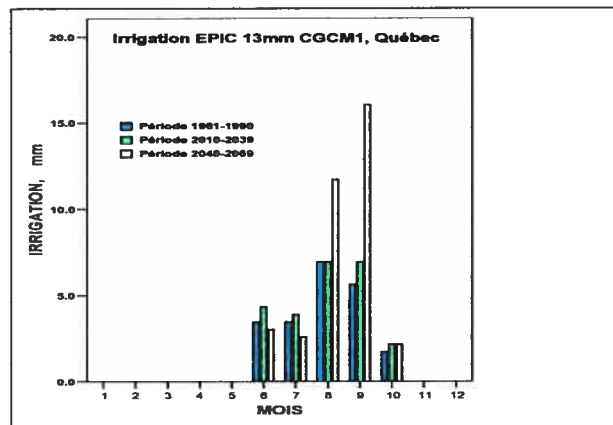


Figure 27. Irrigation prévue (critère de 13mm) Québec CGCM1, 3 périodes

Tableau XXXII. Les quantités moyennes mensuelles d'eau (critère de 4mm) calculées pour irriguer les gazons des terrains de golf dans la région du Québec en utilisant les données du CGCM1

Les périodes	Moyennes mensuelles, mm								An., mm	%, vs. 1961-1990
	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov		
1961-1990	-	3,1	15,5	18,9	17,5	21,2	13,1	0,7	90	100
2010-2039	-	2,5	18,8	20,0	18,1	24,3	13,7	0,9	98,3	109
2040-2069	-	4,8	20,8	18,5	22,7	35,2	19,3	2,0	123,3	137

Tableau XXXIII. Les quantités moyennes mensuelles d'eau (critère de 9mm) calculées pour irriguer les gazons des terrains de golf dans la région du Québec en utilisant les données du CGCM1

Les périodes	Moyennes mensuelles, mm								An., mm	%, vs. 1961-1990
	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov		
1961-1990	-	0,3	6,0	8,7	11,1	15,0	2,4	-	43,5	100
2010-2039	-	0,6	8,4	8,7	12,0	17,7	4,8	-	52,2	120
2040-2069	-	0,3	9,3	6,3	18,0	28,5	6,3	-	68,7	158

Tableau XXXIV. Les quantités moyennes mensuelles d'eau (critère de 13mm) calculées pour irriguer les gazons des terrains de golf dans la région du Québec en utilisant les données du CGCM1

Les périodes	Moyennes mensuelles, mm								An., mm	%, vs. 1961-1990
	avr	mai	juin	juil	août	sept	oct	nov		
1961-1990	-	-	3,5	3,5	6,9	5,6	1,7	-	21,2	100
2010-2039	-	-	4,3	3,9	6,9	6,9	2,0	-	24	113
2040-2069	-	-	3,0	2,6	11,7	16,0	3,0	-	36,3	171

Donc, les gestionnaires des gazons de golf de la région du Québec comme les ceux des terrains de golf des deux régions précédentes doivent trouver des moyens pour éliminer le déficit d'eau prévue.

4.3 LES SIMULATIONS DES TAUX D'IRRIGATION AVEC LES PROJECTIONS FUTURES DE HADCM3

Cette partie fournit une description détaillée des résultats des simulations des taux d'irrigation au moyen du modèle de culture EPIC en utilisant les scénarios climatiques tirés du MCGAO HadCM3. D'abord, pour chacune des trois régions à l'étude, nous avons analysé les tendances futures des paramètres climatiques, suivies des études des taux d'irrigation selon deux scénarios SRES futurs: A2 et B2.

4.3.1 RÉGION DE MONTRÉAL

4.3.1.1 Les caractéristiques climatiques simulées par le modèle HadCM3 SRES A2

Les résultats des simulations du modèle climatique HadCM3 forcé par SRES A2 montrent, pour la région de Montréal, une hausse possible des températures moyennes annuelles. En effet, celles-ci augmenteront de 0,8°C pendant la période 2010-2039 et de 1,8°C pendant les périodes 2040-2069 par rapport à la période 1961-1990. Quant à la précipitation, le modèle britannique prévoit une légère augmentation de 2,0% pour la période du futur proche (2010-2039) et de 1,0% pour celle du futur lointain (2040-2069), par rapport à la période 1961-1990. Le déficit hydrique augmentera légèrement lui aussi surtout au début et à la fin de la saison estivale. (figures 28 à 30).

En ce qui concerne la période estivale, cette projection climatique future de HadCM3 prévoit une augmentation des températures de la même amplitude que pour l'année au complet. Toutefois, elle montre une augmentation plus importante de la précipitation pendant l'été : 10% pour la période 2010-2039 et 6,5% pour la période 2040-2069 par rapport à la période estivale de la période de référence (1961-1990) (tableaux XXXV et XXXVI).

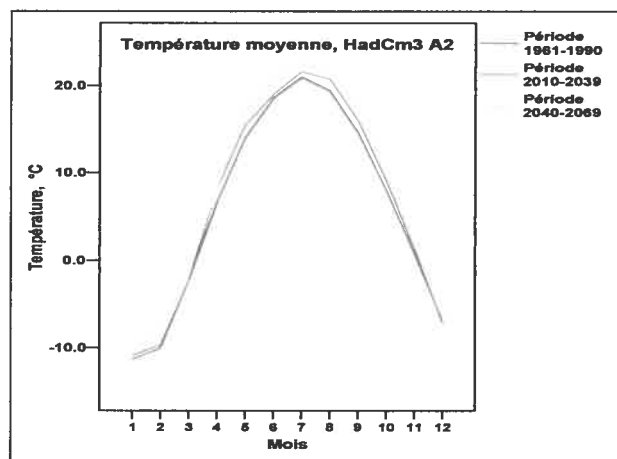


Figure 28. Température moyenne mensuelle pour les trois périodes à l'étude pour la station de Montréal selon le scénario HadCM3 A2

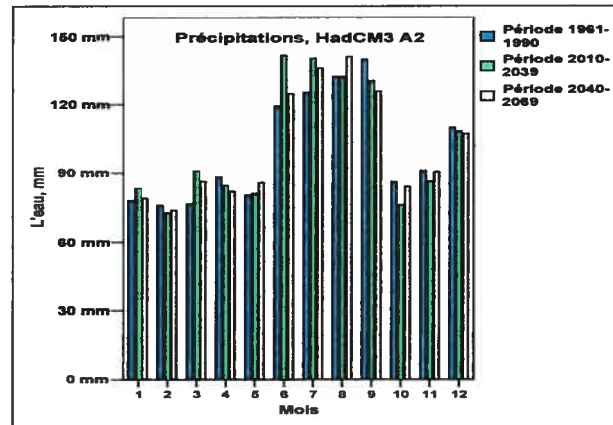


Figure 29. Précipitation moyenne mensuelle pour les trois périodes à l'étude pour la station de Montréal selon le scénario HadCM3 A2

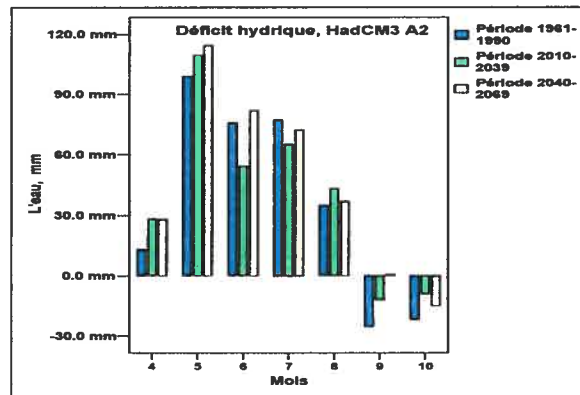


Figure 30. Déficit hydrique moyen mensuel pour les trois périodes à l'étude pour la station de Montréal selon le scénario HadCM3 A2

Tableau XXXV. Le régime mensuel des précipitations à Montréal selon les projections futures de HadCM3 SRES A2 et B2, 3 périodes

Mois	Période 1961-1990		Période 2010-2039				Période 2040-2069			
	A2	B2	A2	Δ (%)	B2	Δ (%)	A2	Δ (%)	B2	Δ (%)
1	77,8	80,2	83,2	6,9	76,5	-4,6	78,8	1,3	77,1	-3,9
2	75,8	69,8	72,5	-4,4	73,0	4,6	73,8	-2,6	71,8	2,9
3	76,4	78,5	90,6	18,6	80,7	2,8	86,3	13,0	90,5	15,3
4	88,2	88,6	84,3	-4,4	83,5	-5,8	81,8	-7,3	77,4	-12,6
5	80,3	85,0	81,0	0,9	80,5	-5,3	85,6	6,6	83,1	-2,2
6	119,1	108,0	141,2	18,6	110,0	1,9	124,4	4,5	98,7	-8,6
7	125,1	122,1	140,1	12,0	127,8	4,7	135,7	8,5	146,3	19,8
8	132,1	141,1	131,9	-0,2	152,0	7,7	140,6	6,4	166,3	17,9
9	139,5	130,5	130,1	-6,7	137,3	5,2	125,6	-10,0	131,2	0,5
10	86,1	84,2	76,0	-11,7	87,9	4,4	83,9	-2,6	81,2	-3,6
11	90,7	88,5	86,2	-5,0	83,3	-5,9	90,3	-0,4	93,2	5,3
12	109,6	112,3	108,0	-1,5	107,8	-4,0	106,9	-2,5	111,1	-1,1
An.	100,1	99,1	102,1	2,0	100,0	0,9	101,1	1,0	102,3	3,2

Tableau XXXVI. Le régime mensuel des températures moyennes à Montréal selon les projections futures de HadCM3 SRES A2 et B2, 3 périodes

Mois	Période 1961-1990		Période 2010-2039				Période 2040-2069			
	A2	B2	A2	Δ (°C)	B2	Δ (°C)	A2	Δ (°C)	B2	Δ (°C)
1	-11,3	-11,3	-10,9	0,4	-10,3	1	-10,1	1,2	-10,4	0,9
2	-10,1	-9,7	-9,7	0,4	-10,3	-0,6	-8,5	1,6	-9,5	0,2
3	-2,2	-2,1	-2,2	0	-3,6	-1,5	-1,4	0,8	-1,5	0,6
4	6,6	6,7	8,1	1,5	6,4	-0,3	8,2	1,6	8,7	2
5	14,0	13,9	15,5	1,5	14,8	0,9	17,0	3	16,7	2,8
6	18,6	18,3	19,0	0,4	19,0	0,7	20,3	1,7	20,4	2,1
7	21,0	20,8	21,6	0,6	21,5	0,7	23,0	2	22,5	1,7
8	19,4	19,3	20,7	1,3	20,5	1,2	21,5	2,1	21,4	2,1
9	14,6	14,6	16,0	1,4	16,7	2,1	17,1	2,5	16,4	1,8
10	8,1	8,3	9,1	1	9,9	1,6	10,1	2	9,5	1,2
11	0,8	0,7	1,4	0,6	2,4	1,7	2,4	1,6	1,8	1,1
12	-6,9	-7,2	-7,1	-0,2	-5,7	1,5	-6,3	0,6	-6,3	0,9
An.	6,0	6,0	6,8	0,8	6,8	0,8	7,8	1,8	7,5	1,5

4.3.1.2 Les caractéristiques climatiques simulées par le modèle HadCM3 SRES B2

De même que pour le scénario climatique précédent, les paramètres climatiques provenant de modèle climatique HadCM3 forcé par SRES B2, présentent, pour la région de Montréal, une hausse des températures: de 0,8°C, pendant la période 2010-2039 et de 1,5°C pendant la période 2040-2069 par rapport à la période de référence.

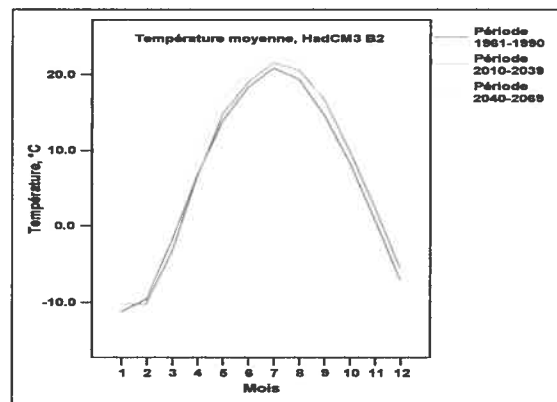


Figure 31. Température moyenne mensuelle pour les trois périodes à l'étude pour la station de Montréal selon le scénario HadCM3 B2

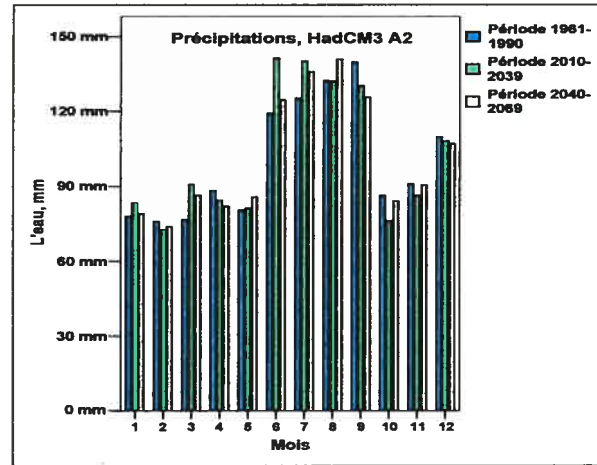


Figure 32. Précipitation moyenne mensuelle pour les trois périodes à l'étude pour la station de Montréal selon le scénario HadCM3 B2

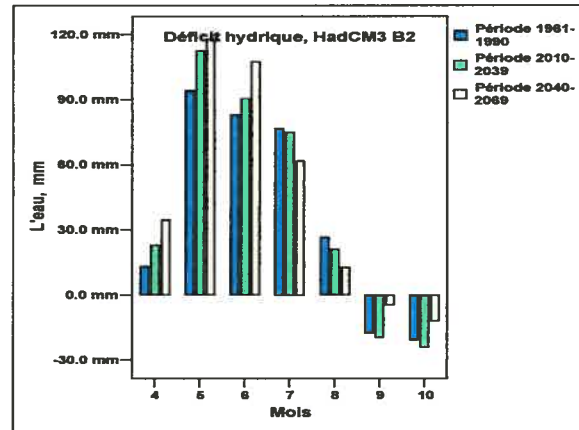


Figure 33. Déficit hydrique moyen mensuel pour les trois périodes à l'étude pour la station de Montréal selon le scénario HadCM3 B2

Quant à la précipitation moyenne annuelle, le scénario B2 prévoit une légère augmentation d'environ 1% pour 2010-2039 et de 3,2% pour 2040-2069 par rapport à la période de contrôle (tableaux XXXV et XXXVI). Les changements climatiques futurs entraîneront une augmentation du déficit hydrique surtout au début de la période estivale qui conduira, à son tour, à une augmentation des besoins en irrigation (figures 31 à 33).

Par rapport à la période estivale de référence (1961-1990), les périodes estivales futures (2010-2039 et 2040-2069), garderont une tendance à la hausse des températures moyennes plus au moins égale à celle de l'année au complet, plus précisément de 0,8°C et de 1,9°C

respectivement. Par contre, les précipitations moyennes mensuelles connaîtront, durant été, une hausse plus importante que pendant l'année au complet : de 5% en 2010-2039 et de 10% en 2040-2069 par rapport à la période estivale (juin-août) de la période 1961-1990 (tableau XXXV).

4.3.1.3 Les tendances futures des taux d'irrigation

Le couplage du modèle EPIC au modèle climatique britannique HadCM3 montre que les besoins en irrigation selon les scénarios A2 et B2 dans la région de Montréal augmenteront dans le futur (figures 34 à 36 et tableau XXXVII). Selon le critère de 9mm, les besoins en irrigation augmenteraient de 113 (A2) à 127% (B2) en 2010-2039 et de 134 (A2) à 140% (B2) en 2040-2069 par rapport à la période 1961-1990. La nécessité d'arrosage est plus accrue après le couplage du modèle EPIC aux scénarios climatiques forcés par SRES B2. Mais, de façon générale, il n'y a pas de différences importantes entre les besoins en irrigation simulés en utilisant les sorties de HadCM3 forcé par les deux différents scénarios: A2 et B2. Cela pourrait s'expliquer par le fait que il n'y a pas de différences notables entre les paramètres climatiques, surtout au niveau de la température moyenne estivale, simulés par le MCGAO britannique selon ces deux scénarios. Toutefois pour la période 2010-2039, les besoins en irrigation seront plus grands selon le scénario B2 que celui de A2.

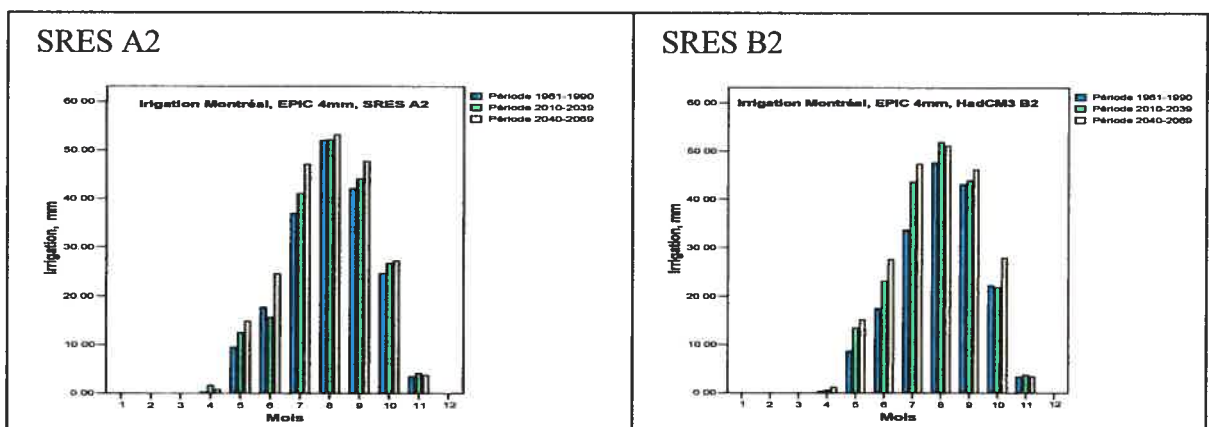


Figure 34. Irrigation prévue (selon le critère de 4mm) pour la région de Montréal en utilisant les sorties de HadCM3 A2 et B2 pour 3 périodes

Cela s'explique par le fait que ce dernier prévoit pour la période estivale de 2010-2039 une hausse des taux moyens mensuels des précipitations de 10% tandis que le scénario B2 une augmentation de seulement 5%.

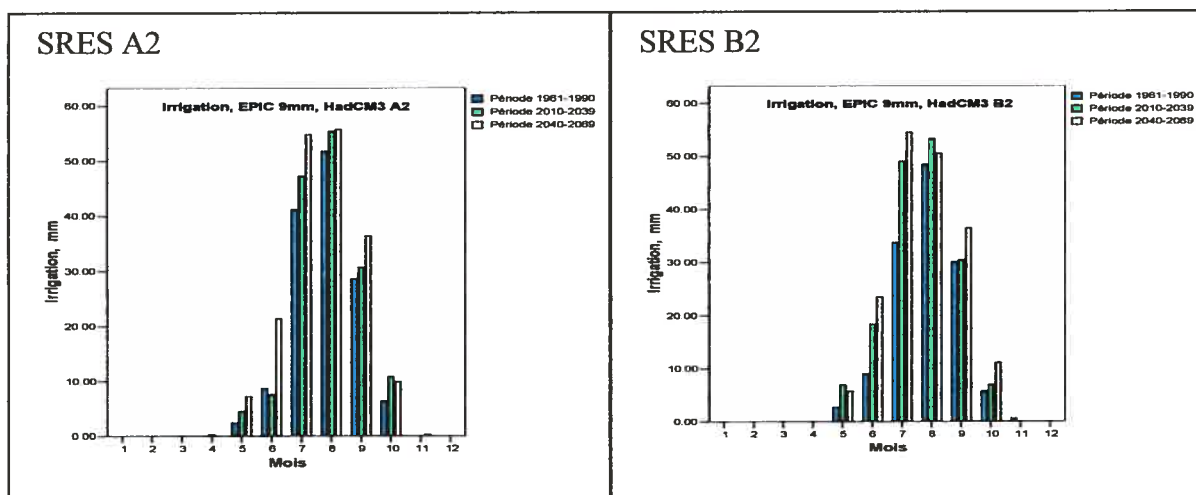


Figure 35. Irrigation prévue (selon le critère de 9 mm) pour la région de Montréal en utilisant les sorties de HadCM3 A2 et B2 pour 3 périodes

Tableau XXXVII. Les valeurs relatives (%) des taux d'irrigation annuels pour les périodes 2010-2039 et 2040-2069 (par rapport à la période 1961-1990)

Périodes	Critère de 4mm		Critère de 9mm		Critère de 13mm	
	SRES A2	SRES B2	SRES A2	SRES B2	SRES A2	SRES B2
2010-2039	106	115	113	127	109	130
2040-2069	118	124	134	140	144	149

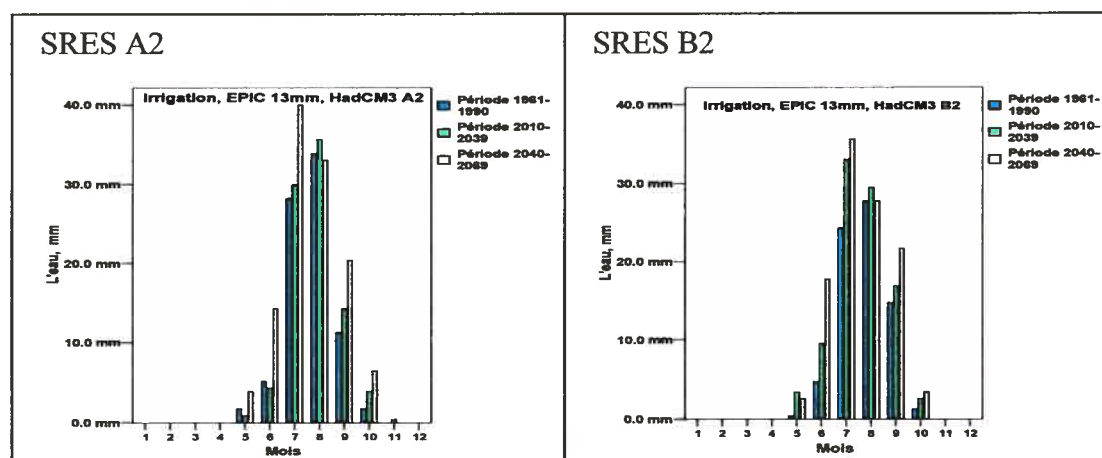


Figure 36. Irrigation prévue (selon le critère de 13 mm) pour la région de Montréal en utilisant les sorties de HadCM3 A2 et B2 pour 3 périodes

4.3.2 LA RÉGION DES CANTONS DE L'EST

4.3.2.1 Les caractéristiques climatiques simulées par le modèle HadCM3 SRES A2

Les résultats des simulations du modèle climatique HadCM3 forcé par le scénario A2 montrent, pour la région des Cantons de l'Est, une hausse potentielle des températures moyennes annuelles. Ainsi celles-ci augmenteraient de 1,3°C, pendant la période 2010-2039 et de 2,8°C, durant la période 2040-2069 par rapport à la période de contrôle (1961-1990). La hausse des températures moyennes mensuelles sera plus élevée pendant les mois d'été et d'hiver. Pour la précipitation moyenne annuelle, le modèle britannique prévoit une légère baisse de 3,8% pour 2010-2039 par rapport à la période 1961-1990. Pendant la période du futur lointain (2040-2069), les taux moyens annuels des précipitations augmenteront par rapport à la période précédente (2010-2039) mais ils ne dépasseront pas les valeurs moyennes de la période de référence (1961-1990) (tableaux XXXVIII et XXXIX). Par conséquent, le déficit hydrique ainsi que les besoins en irrigation augmenteront considérablement tout au long de la période de végétation des espèces gazonnantes (figures 37 à 39).

Tableau XXXVIII. Le régime mensuel des précipitations (mm) à Sherbrooke selon les projections futures de HadCM3 SRES A2 et B2, 3 périodes

Mois	Période 1961-1990		Période 2010-2039				Période 2040-2069			
	A2	B2	A2	Δ (%)	B2	Δ (%)	A2	Δ (%)	B2	Δ (%)
1	58,6	60,1	62,1	6,0	61,2	1,8	66,5	13,5	64,4	7,2
2	71,8	65,2	66,5	-7,4	62,6	-4,0	69,8	-2,8	70,3	7,8
3	78,9	80,4	83,4	5,7	81,1	0,9	87,9	11,4	84,0	4,5
4	86,3	84,4	83,9	-2,8	78,1	-7,5	86,0	-0,3	82,8	-1,9
5	77,0	75,8	72,1	-6,4	73,0	-3,7	70,3	-8,7	72,6	-4,2
6	97,0	99,4	98,6	1,6	99,0	-0,4	101,7	4,8	95,4	-4,0
7	138,1	156,9	138,0	-0,1	139,2	-11,3	139,4	0,9	145,1	-7,5
8	143,9	139,8	119,5	-17,0	145,4	4,0	129,2	-10,2	126,4	-9,6
9	106,8	107,8	106,2	-0,6	105,8	-1,9	108,3	1,4	100,0	-7,2
10	88,7	82,7	71,9	-18,9	92,2	11,5	84,0	-5,3	86,3	4,4
11	80,3	85,9	82,9	3,2	83,4	-2,9	86,7	8,0	81,1	-5,6
12	89,6	85,6	90,3	0,8	85,6	0,0	87,9	-1,9	85,8	0,2
An.	93,1	93,7	89,6	-3,8	92,2	-1,6	93,1	0,0	91,2	-2,7

Tableau XXXIX. Le régime mensuel des températures moyennes (°C) à Sherbrooke selon les projections futures de HadCM3 SRES A2 et B2, 3 périodes

Mois	Période 1961-1990		Période 2010-2039				Période 2040-2069			
	A2	B2	A2	Δ (°C)	B2	Δ (°C)	A2	Δ (°C)	B2	Δ (°C)
1	-11,6	-11,5	-9,9	1,7	-10,2	1,3	-8,6	3	-9,0	2,5
2	-10,5	-10,4	-9,8	0,7	-10,4	0	-7,9	2,6	-8,7	1,7
3	-4,9	-4,6	-3,3	1,6	-4,3	0,3	-2,6	2,3	-3,3	1,3
4	4,3	4,0	6,1	1,8	5,2	1,2	6,3	2	6,0	2
5	10,9	10,7	12,2	1,3	12,3	1,6	13,9	3	13,1	2,4
6	15,2	15,2	16,3	1,1	16,7	1,5	17,9	2,7	17,8	2,6
7	17,9	18,0	19,4	1,5	19,9	1,9	22,1	4,2	20,8	2,8
8	16,3	16,4	18,4	2,1	18,0	1,6	20,1	3,8	19,9	3,5
9	12,4	12,4	14,1	1,7	14,3	1,9	15,5	3,1	14,5	2,1
10	6,7	6,8	7,7	1	7,8	1	9,6	2,9	8,9	2,1
11	-1,0	-0,9	0,7	1,7	0,9	1,8	1,7	2,7	2,0	2,9
12	-7,1	-7,3	-6,6	0,5	-5,6	1,7	-5,1	2	-5,0	2,3
An.	4,1	4,0	5,4	1,3	5,4	1,4	6,9	2,8	6,4	2,4

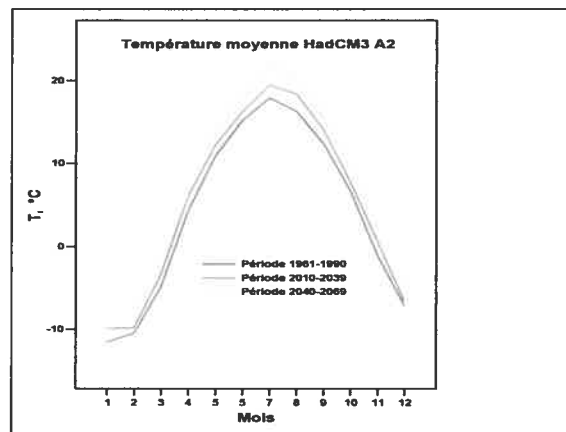


Figure 37. Température moyenne mensuelle à Sherbrooke pendant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 A2

4.3.2.2 Les caractéristiques climatiques simulées par le modèle HadCM3 SRES B2

Les scénarios climatiques du modèle HadCM3 forcé par SRES B2 présentent également une hausse par rapport à la période de référence (1961-1990) des températures moyennes annuelles: de 1,4°C durant la période 2010-2039 et de 2,4°C, pendant la période 2040-2069. L'écart de températures sera plus grand pendant les mois d'été et d'hiver. Quant à la précipitation moyenne annuelle, le modèle britannique comme dans le cas précédent,

prévoit pour la région du Sherbrooke, une légère diminution de 1,6% pour 2010-2039 et de 2,7% pour 2040-2069 par rapport à la période de contrôle (figures 40 à 41).

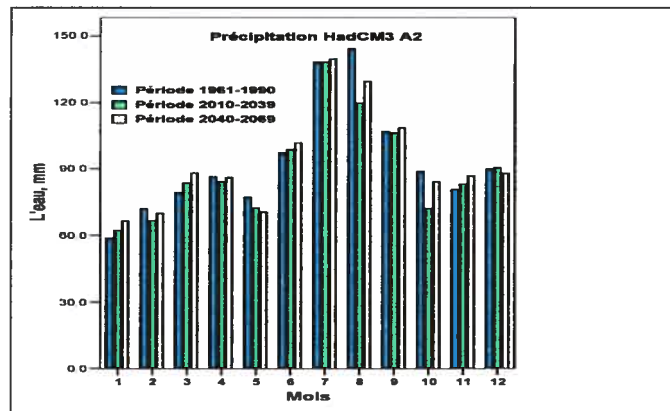


Figure 38. Précipitation moyenne mensuelle à Sherbrooke pendant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 A2

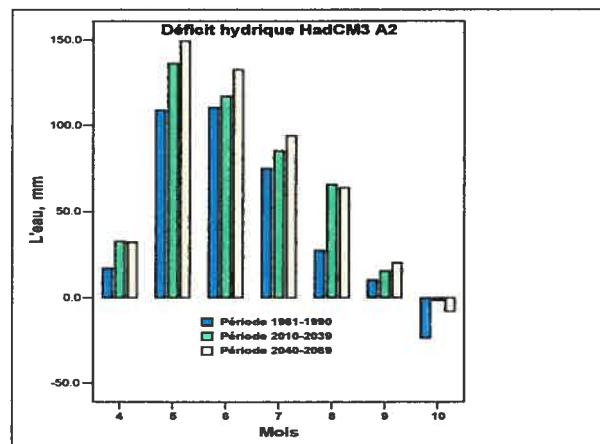


Figure 39. Déficit hydrique à Sherbrooke pendant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 A2

La hausse de la température moyenne pendant la période estivale (juin-août), sera légèrement plus grande que la hausse de celle de l'année au complet : de 1,7°C pour la période estivale de la période 2010-2039 et de 3,0°C pour celle de la période 2040-2069 par rapport à la période estivale de contrôle (1961-1990). Les précipitations moyennes mensuelles diminueront pendant toutes les deux périodes estivales futures: de 3,2% pendant le futur proche (2010-2039) et de 7,4% durant le futur lointain (2040-2069) par rapport aux valeurs moyennes de la période estivale de contrôle (1961-1990) (tableaux

XXXVIII et XXXIX). Suite à ces changements, il en résultera une augmentation importante du déficit hydrique et des besoins en irrigation dans le futur pour la région du Sherbrooke (figure 42).

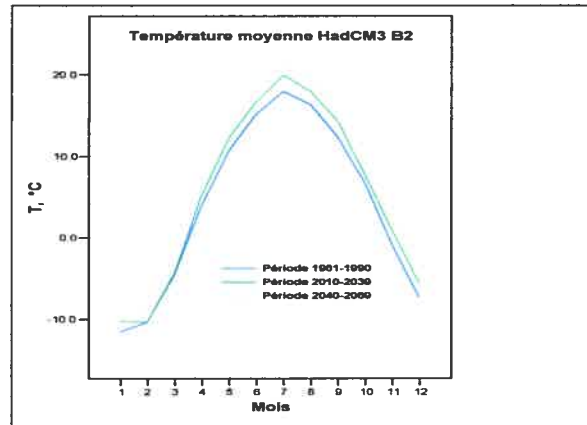


Figure 40. Température moyenne mensuelle à Sherbrooke pendant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 B2

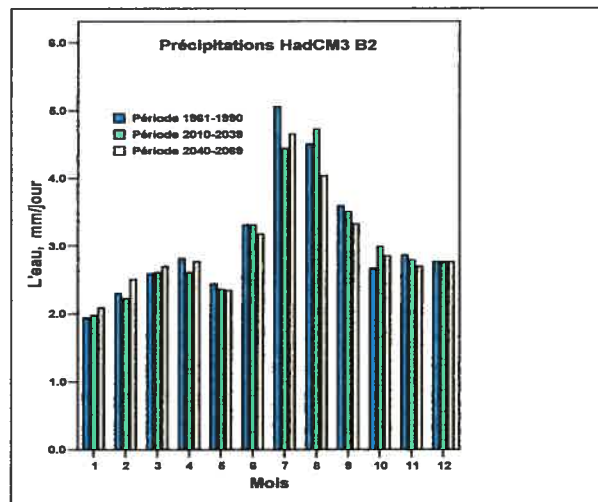


Figure 41. Précipitation moyenne mensuelle à Sherbrooke pendant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 B2

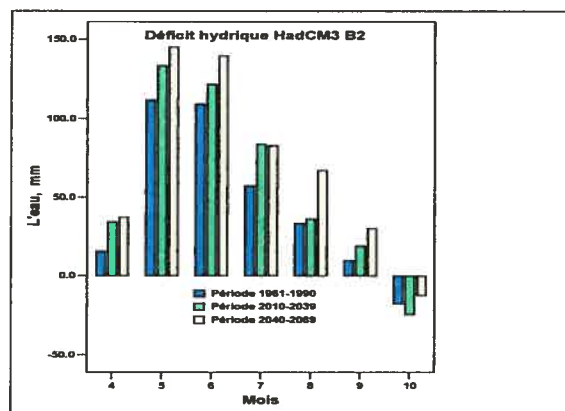


Figure 42. Déficit hydrique à Sherbrooke pendant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 B2

4.3.2.3 Les tendances futures des taux d'irrigation

Le couplage du modèle EPIC au modèle climatique britannique montre que les besoins en irrigation dans la région de Sherbrooke augmenteront dans le futur (figures 43 à 45 et tableau XL). Selon le critère de 9mm, les besoins en irrigation accroîtront d'environ 150% en 2010-2039 et de 190% en 2040-2069 par rapport à la période 1961-1990. Selon les deux scénarios, les nécessités d'arrosage s'élèveront considérablement pendant le mois de juin. Il n'y a pas de différences importantes entre les besoins en irrigation simulés en utilisant les sorties de HadCM3 forcés par les scénarios A2 et B2. Cela pourrait s'expliquer par le fait que il n'y a non plus de différences significatives entre les paramètres climatiques simulés par le MCGAO britannique selon les deux scénarios.

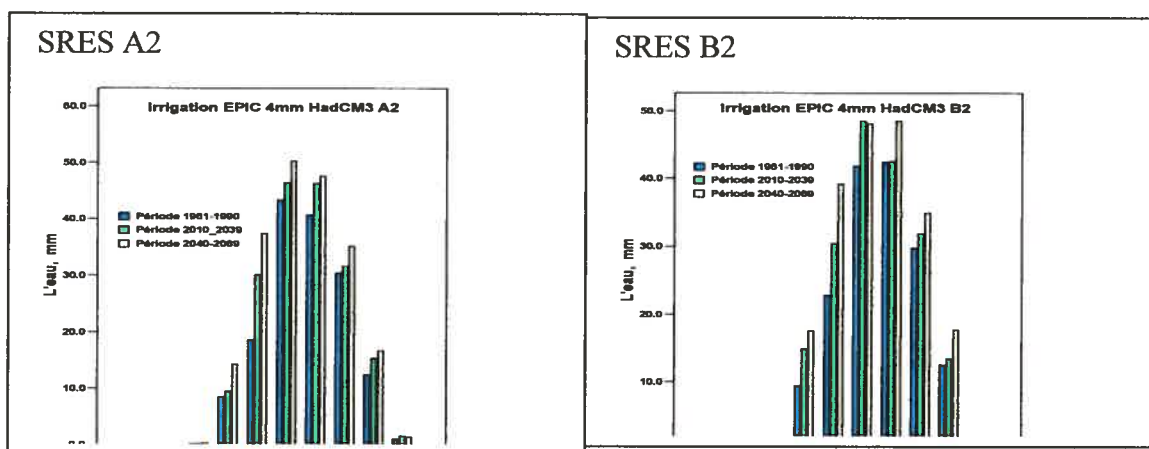


Figure 43. Irrigation prévue (selon le critère de 4mm) pour la région de Sherbrooke en utilisant les sorties de HadCM3 A2 et B2 pour 3 périodes

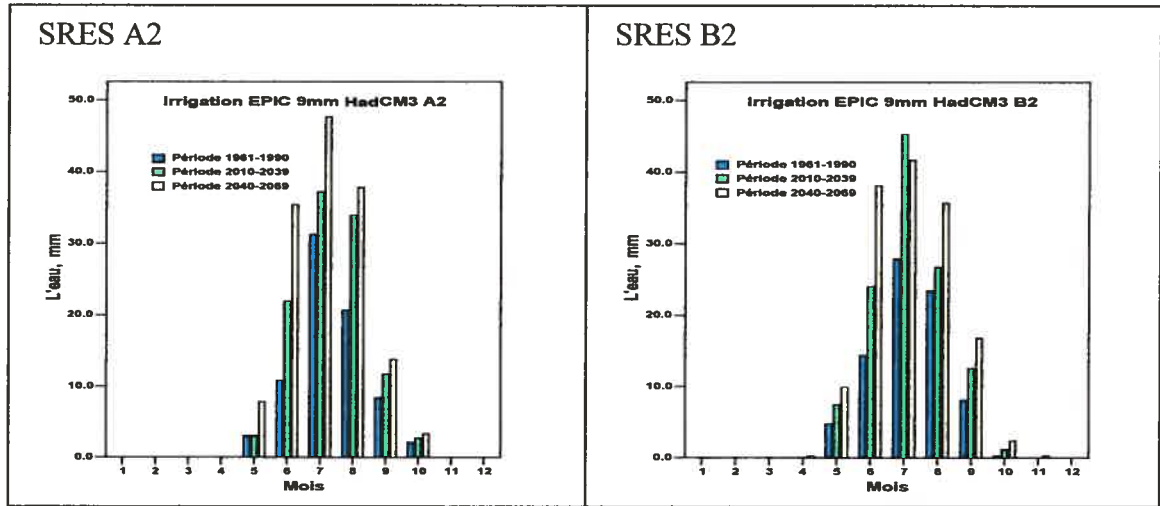


Figure 44. Irrigation prévue (selon le critère de 9 mm) pour la région de Sherbrooke en utilisant les sorties de HadCM3 A2 et B2 pour 3 périodes

Table XL. Les valeurs relatives (%) des taux d'irrigation annuels pour les périodes 2010-2039 et 2040-2069 (par rapport à la période 1961-1990)

Périodes	Critère de 4mm		Critère de 9mm		Critère de 13mm	
	SRES A2	SRES B2	SRES A2	SRES B2	SRES A2	SRES B2
2010-2039	117	115	145	149	168	164
2040-2069	131	131	191	184	236	223

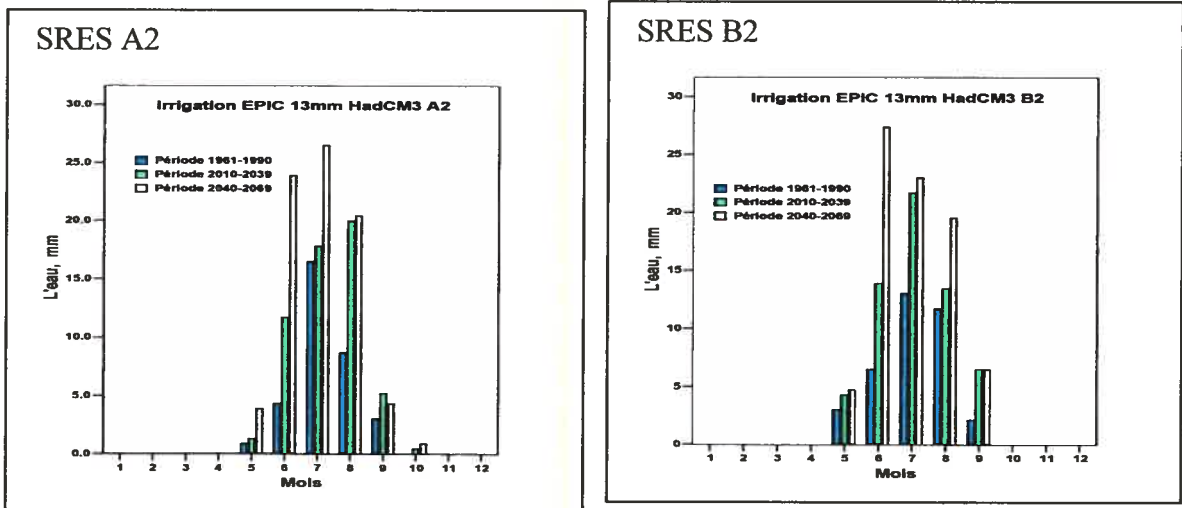


Figure 45. Irrigation prévue (selon le critère de 13 mm) pour la région de Sherbrooke en utilisant les sorties de HadCM3 A2 et B2 pour 3 périodes

4.3.3 RÉGION DE QUÉBEC

4.3.3.1 Les caractéristiques climatiques simulées par le modèle HadCM3 SRES A2

Les résultats des simulations du modèle climatique HadCM3 forcé par SRES A2 montrent, pour la région du Québec, une hausse potentielle des températures moyennes annuelles: de 1,2°C, pendant la période 2010-2039, et de 1,6°C, durant la période 2040-2069 par rapport à la période 1961-1990.

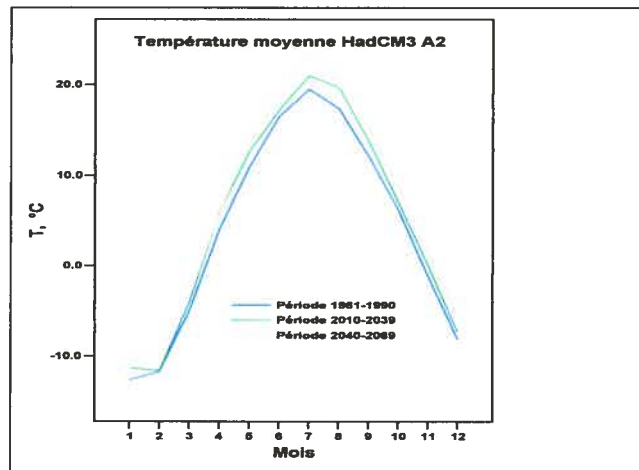


Figure 46. Température moyenne mensuelle à Québec durant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 A2

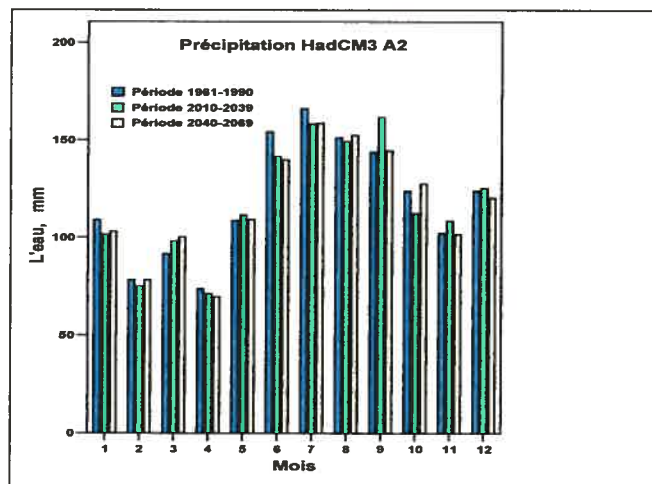


Figure 47. Précipitation moyenne mensuelle à Québec durant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 A2

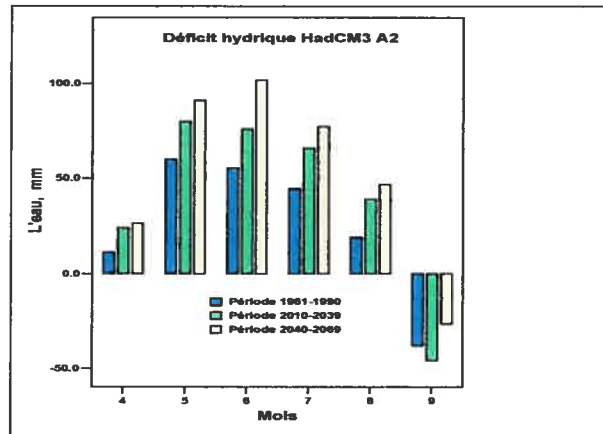


Figure 48. Déficit hydrique moyen mensuel à Québec pendant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 A2

La hausse des températures sera plus élevée pendant les mois d'été et d'hiver. Quant à la précipitation, le modèle britannique prévoit une légère baisse de 0,8% pour 2010-2039 et de 1,5% pour 2040-2069 par rapport à la période 1961-1990 (figures 46 à 47).

Pour les périodes estivales futures, cette projection prévoit une augmentation des températures moyennes mensuelles plus grande que pour l'année au complet : de 1,5°C pour la période estivale de l'intervalle 2010-2039 et de 3,4°C pour celle de la période 2040-2069 par rapport à la période estivale de contrôle (1961-1990). Les taux des précipitations resteront stables pendant la période du futur proche et augmenteront de 4,6% durant la période du futur lointain par rapport à la période estivale de contrôle (tableaux XLI et XLII). Néanmoins, le déficit hydrique accroîtra considérablement dans le futur pendant tous les mois de la période de végétation des espèces de gazon ce qui entraînera une hausse des besoins en irrigation (figure 48).

Tableau XLI. Le régime mensuel des précipitations à Québec selon les projections futures de HadCM3 SRES A2 et B2, 3 périodes

Mois	Période 1961-1990		Période 2010-2039				Période 2040-2069			
	A2	B2	A2	Δ (%)	B2	Δ (%)	A2	Δ (%)	B2	Δ (%)
1	109,1	109,9	101,5	-7,0	95,7	-12,9	103,0	-5,6	106,8	-2,8
2	78,1	81,5	75,0	-4,0	69,5	-14,7	78,2	0,1	79,8	-2,1
3	91,6	104,3	98,1	7,1	94,1	-9,8	100,3	9,5	92,7	-11,1
4	73,6	82,2	71,3	-3,1	78,1	-5,0	69,5	-5,6	75,3	-8,4
5	108,8	117,2	111,6	2,6	110,8	-5,5	109,4	0,6	107,1	-8,6
6	154,4	135,9	141,6	-8,3	142,0	4,5	140,0	-9,3	132,8	-2,3
7	166,5	146,7	158,5	-4,8	173,6	18,3	158,9	-4,6	151,6	3,3
8	151,4	160,8	149,5	-1,3	159,3	-0,9	152,7	0,9	167,8	4,4
9	144,1	142,7	162,0	12,4	144,8	1,5	144,7	0,4	139,0	-2,6
10	124,0	129,3	112,5	-9,3	120,7	-6,7	127,6	2,9	112,1	-13,3
11	102,2	108,6	108,6	6,3	109,4	0,7	101,7	-0,5	107,5	-1,0
12	124,1	117,5	125,4	1,0	118,2	0,6	120,5	-2,9	112,7	-4,1
An.	119,0	119,7	118,0	-0,8	118,0	-1,4	117,2	-1,5	115,4	-3,6

Tableau XLII. Le régime mensuel des températures moyennes à Québec selon les projections futures de HadCM3 SRES A2 et B2, 3 périodes

Mois	Période 1961-1990		Période 2010-2039				Période 2040-2069			
	A2	B2	A2	Δ (°C)	B2	Δ (°C)	A2	Δ (°C)	B2	Δ (°C)
1	-12,6	-12,5	-11,3	1,3	-11,4	1,1	-10,1	2,5	-10,4	2,1
2	-11,7	-11,6	-11,6	0,1	-11,9	-0,3	-9,9	1,8	-10,0	1,6
3	-5,0	-4,9	-4,1	0,9	-4,7	0,2	-3,5	1,5	-3,9	1
4	4,0	4,1	5,9	1,9	5,1	1	5,8	1,8	5,7	1,6
5	10,9	11,1	12,6	1,7	12,6	1,5	13,6	2,7	13,5	2,4
6	16,5	16,3	17,2	0,7	17,7	1,4	18,8	2,3	18,7	2,4
7	19,5	19,6	21,0	1,5	21,7	2,1	23,5	4	22,5	2,9
8	17,3	17,3	19,7	2,4	19,3	2	21,4	4,1	21,1	3,8
9	12,1	12,1	13,8	1,7	13,9	1,8	15,3	3,2	14,5	2,4
10	6,2	6,0	7,0	0,8	6,8	0,8	8,6	2,4	8,1	2,1
11	-1,2	-1,2	0,0	1,2	0,5	1,7	1,4	2,6	1,4	2,6
12	-8,1	-8,2	-7,4	0,7	-6,5	1,7	-5,7	2,4	-6,1	2,1
An.	4,0	4,1	5,2	1,2	5,3	1,2	6,6	2,6	6,3	2,2

4.3.3.2 Les caractéristiques climatiques simulées par le modèle HadCM3 SRES B2

Les simulation du modèle climatique HadCM3 forcé par le SRES B2 présentent, aussi, une hausse des températures par rapport à la période de contrôle (1961-1990): de 1,2°C durant la période 2010-2039 et de 2,2°C, pendant la période 2040-2069. Les écarts de

températures seront plus grands pendant les mois d'été et d'hiver. En ce qui concerne la précipitation, le modèle britannique, comme dans le cas précédent, prévoit une légère diminution de 1,4% pour 2010-2039 et de 3,6% pour 2040-2069 par rapport à la période de contrôle.

Quant à la période estivale, cette projection climatique prévoit une augmentation plus grande de la température moyenne que pour l'année au complet: de 1,9°C pour la période estivale du futur proche (2010-2039) et de 3,1°C pour celle du future lointain (2040-2069) par rapport a celle de la période de contrôle (1961-1990). Si les valeurs moyennes annuelles de la précipitation, selon le scénario HadCM3 B2, seront à la baisse, alors les précipitations moyennes mensuelles des périodes estivales seront à la hausse. Ainsi, les précipitations augmenteront de 2,0% pendant la période estivale du futur proche (2010-2039) et de 7,1% durant l'été de la période du futur lointain (2040-2069) par rapport à la période estivale de la période de contrôle (1961-1990) (tableaux XLI et XLII). Malgré cela, le déficit hydrique accroîtra pendant la période de végétation (figure 51). C'est-à-dire que l'augmentation des précipitations durant les périodes estivales futures n'empêchera pas l'occurrence d'un déficit d'humidité au sol.

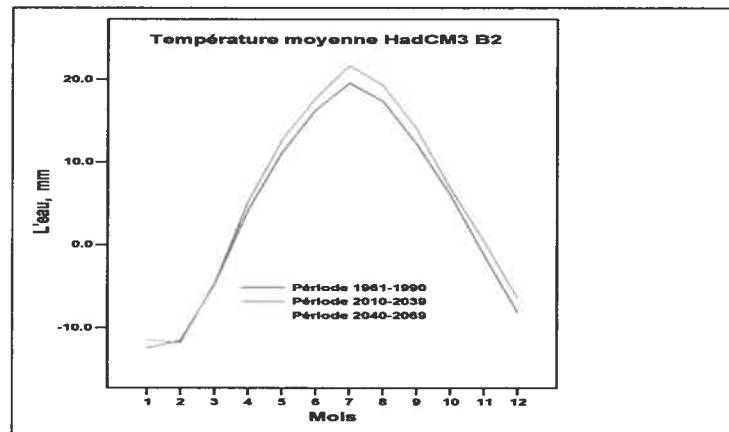


Figure 49. Température moyenne mensuelle à Québec durant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 B2

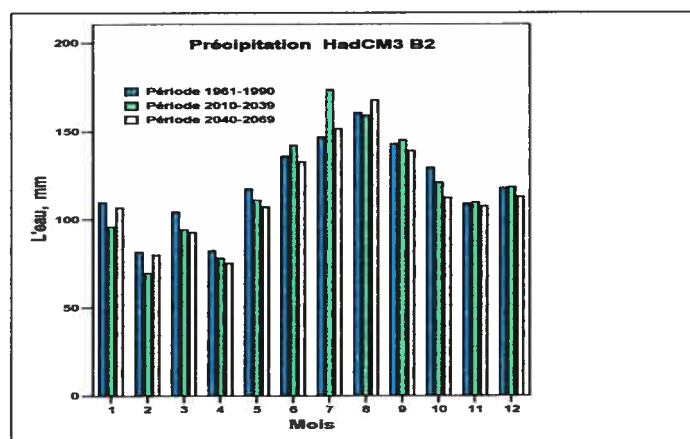


Figure 50. Précipitations moyenne mensuelle à Québec durant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 B2

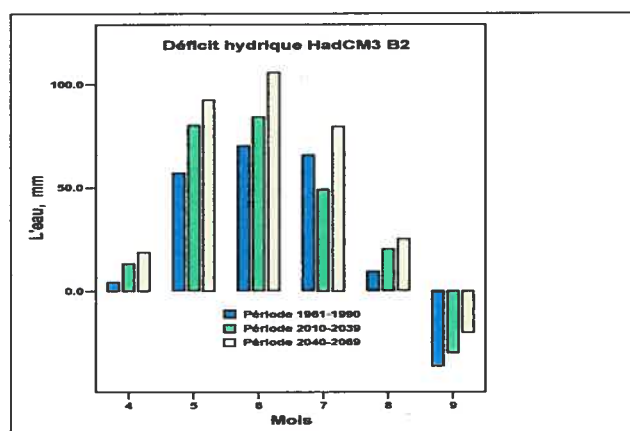


Figure 51. Déficit hydrique moyen mensuelle à Québec durant trois périodes à l'étude selon le scénario HadCM3 B2

4.3.3.3 Les tendances futures des taux d'irrigation

Le couplage du modèle EPIC au modèle climatique britannique indique qu'en comparaison avec les deux régions précédentes, le besoin futur d'irrigation dans la région du Québec augmentera d'une façon plus prononcée (figures 52 à 54 et tableau XLIII). Selon le critère de 9mm, les besoins d'irrigation augmenteront d'environ 2 fois en 2010-2039 et de 3 fois en 2040-2069 par rapport à la période 1961-1990. Selon les deux scénarios, les nécessités d'arrosage s'élèveront considérablement pendant tous les mois d'été. Un plus grand volume d'arrosage sera probablement dû principalement à des températures plus chaudes combinées parfois à des précipitations moins importantes. Il n'y a pas de différences

importantes entre les besoins en irrigation simulés en utilisant les différents scénarios : A2 et B2. Cela pourrait s'expliquer par le fait que il n'y a pas de différences notables entre les paramètres climatiques simulés par le MCGAO britannique selon ces 2 scénarios.

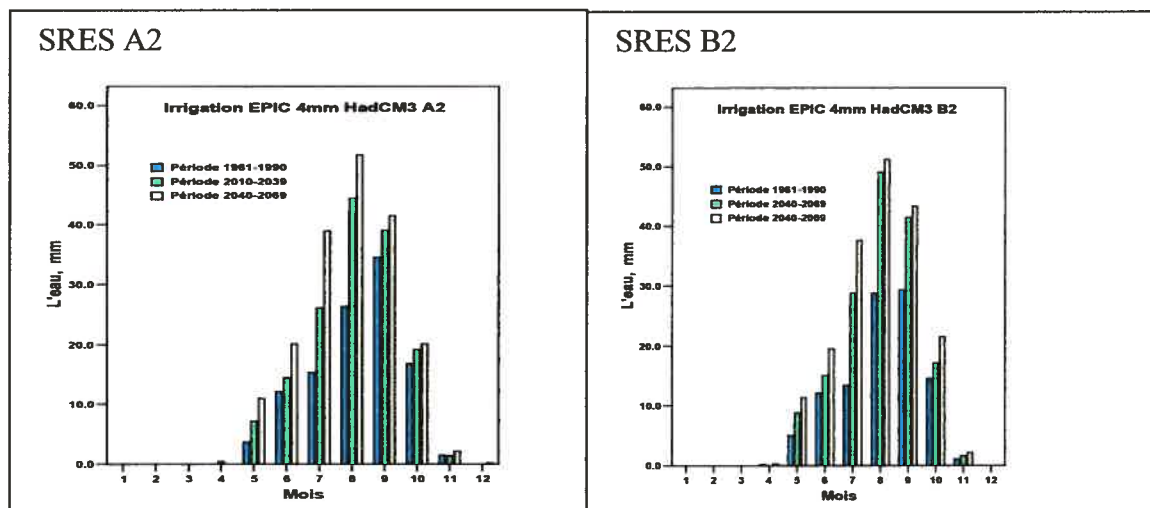


Figure 52. Irrigation prévue (selon le critère de 4mm) pour la région du Québec en utilisant les sorties de HadCM3 A2 et B2 pour 3 périodes

Tableau XLIII. Les valeurs relatives (%) des taux d'irrigation annuels pour les périodes 2010-2039 et 2040-2069 (par rapport à la période 1961-1990)

Périodes	Critère de 4mm		Critère de 9mm		Critère de 13mm	
	SRES A2	SRES B2	SRES A2	SRES B2	SRES A2	SRES B2
2010-2039	138	155	196	215	214	241
2040-2069	168	179	296	265	368	318

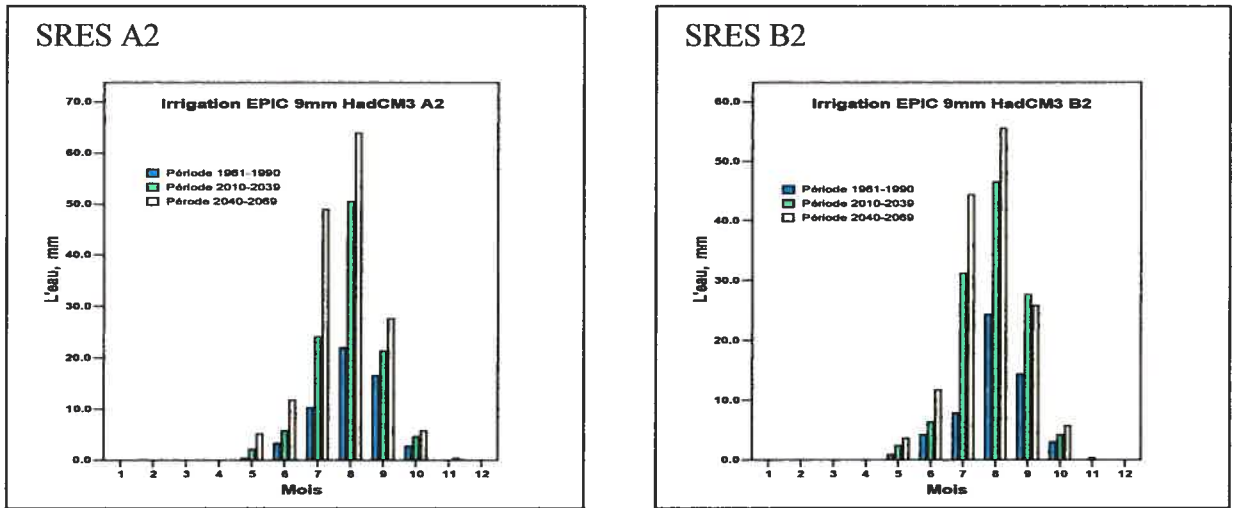


Figure 53. Irrigation prévue (selon le critère de 9mm) pour la région du Québec en utilisant les sorties de HadCM3 A2 et B2 pour 3 périodes

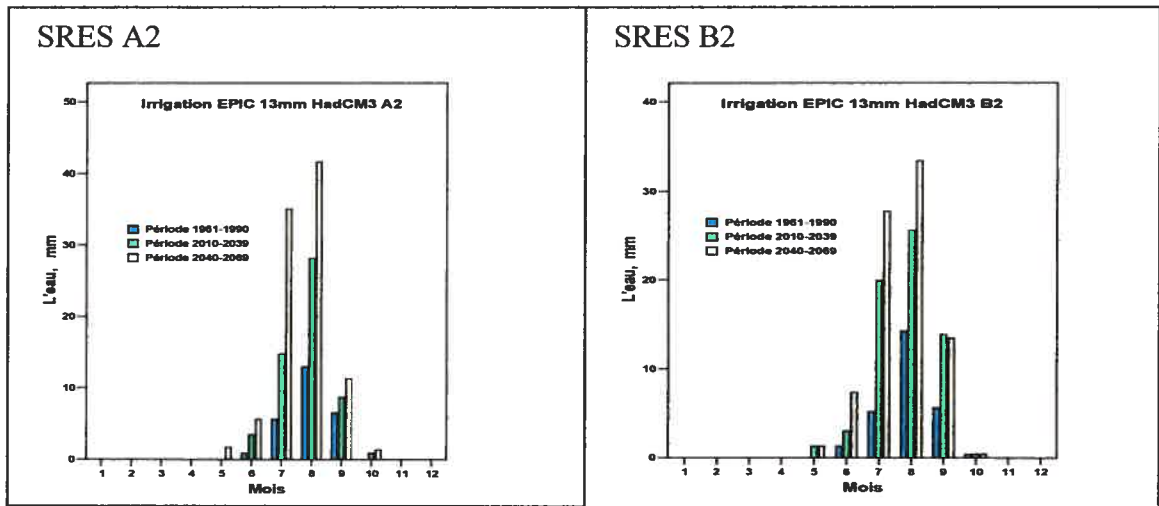


Figure 54. Irrigation prévue (selon le critère de 13mm) pour la région du Québec en utilisant les sorties de HadCM3 A2 et B2 pour 3 périodes

4.4 IRRIGATION : DIFFERENCES ENTRE LES SCÉNARIOS CLIMATIQUES

Après le couplage du modèle de culture EPIC aux données climatiques tirées des deux modèles climatiques (CGCM1 et HadCM3), les résultats, selon le critère de 9mm, montrent que les besoins d'arrosage accroîtront tout au long du 21^e siècle, dans toutes les régions à l'étude. De ce fait, tous les deux modèles anticipent presque la même augmentation des taux d'irrigation pour les régions de Montréal et de Sherbrooke (figures 55 et 56). Par contre, pour la région de Québec le MCGAO britannique HadCm3 prévoit une augmentation d'irrigation nettement plus élevée que le CGCM1 (figure 57).

En ce qui concerne le régime mensuel d'irrigation, tous les deux modèles simulent la même tendance : pour les régions des Laurentides et de Cantons de l'Est, les taux d'irrigation s'élèveront surtout au début de l'été tandis que pour la région de Québec ces augmentations sont prévues principalement pour la deuxième partie de l'été.

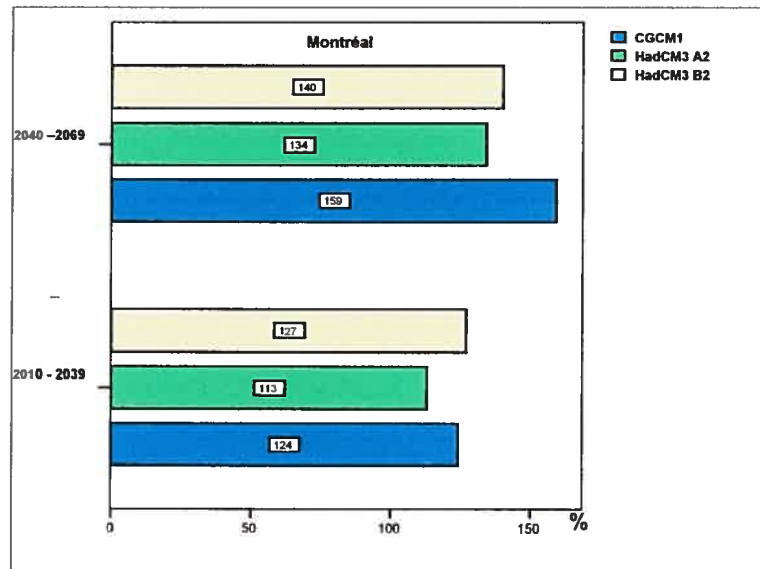


Figure 55. Les tendances futures des taux d'irrigation (en % par rapport au 1961-1990) pour la région de Montréal selon les résultats du couplage du modèle EPIC (critère de 9mm) au CGCM1 et au HadCM3

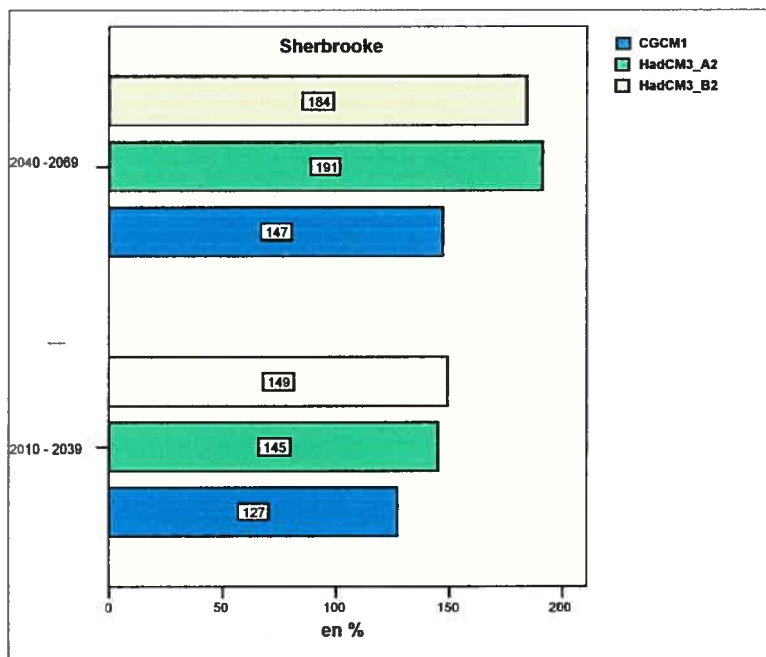


Figure 56. Les tendances futures des taux d'irrigation (en % par rapport au 1961-1990) pour la région de Sherbrooke selon les résultats du couplage du modèle EPIC (critère de 9mm) au CGCM1 et au HadCM3

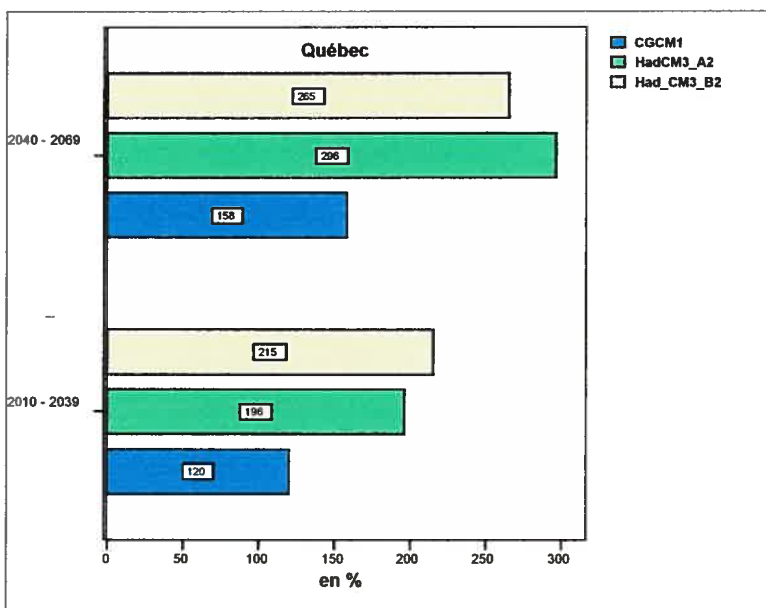


Figure 57. Les tendances futures des taux d'irrigation (en % par rapport au 1961-1990) pour la région de Québec selon les résultats du couplage du modèle EPIC (critère de 9mm) au CGCM1 et au HadCM3

4.5 LES INDICATEURS AGROCLIMATIQUES, L'ÉTAT DU GAZON ET LA QUALITÉ DE JEU DES GOLFEURS

4.5.1 LA REGION DE LAURENTIDES (Y COMPRIS MONTREAL)

4.5.1.1 Les indicateurs agroclimatiques automnaux

FH-COLD

Suite à un climat automnal futur plus doux, dans la région de Montréal l'indice FH-COLD diminuera. Cela entraînera une diminution du potentiel de durcissement de 3 % et 12 % (CGCM1) de 22% et 1 % (HadCM3 A2) et de 6,3 et de 11,2% (HadCM3 B2) pour les périodes 2010-2039 et 2040-2069, respectivement, par rapport à la période 1961-1990. Ainsi, nous constatons que les projections futures de HadCM3 B2 sont semblables aux celles issues de CGCM1 et que le scénario A2 de HadCM3 est bien différent des autres. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que ce dernier prévoirait une durée différente de la période de durcissement que les deux autres scénarios climatiques futurs (tableaux XLV à XLVII).

FH-RAIN

Cet indice varie selon les scénarios. Ainsi il augmentera de 8% à 13% (CGCM1) et de 12% à 13% (HadCM3 B2) dans les deux périodes futures (2010-2039 et 2040-2069), respectivement, tandis que selon le scénario A2 (HadCM3) il restera presque inchangé. Cela pourrait s'expliquer par le fait que la projection A2 de HadCM3 prévoit, par rapport à la période de contrôle (1961-1990), une diminution des taux des précipitations moyennes mensuelles de la période automnale (septembre-novembre) pour les périodes futures 2010-2039 et 2040-2069 de 7,6% et de 5,3% respectivement tandis que la projection HadCM3 B2 indique une augmentation de 1 à 2% et celle de CGCM1 de 5 à 6% pour chacune des périodes automnales futures (tableaux XXIII, XXXV et XXXVI). Donc, pour la région de Montréal, en générale, FH RAIN subira un accroissement ce qui entraînera une diminution du potentiel de durcissement (tableaux XLV à XLVII).

4.5.1.2 Les indicateurs agroclimatiques hivernaux

W-THAW

Pour la région de Montréal cet indice varie grandement selon les scénarios issus de deux modèles climatiques. Ainsi, il augmentera de 50% (CGCM1), de 5% (HadCM3 A2) et de 0% (HadCM3 B2) en 2010-2039 et de 200% (CGCM1), de 5% (HadCM3 A2) et de 6% (HadCM3 B2) en 2040-2069 par rapport à la période 1961-1990. Ces changements seront engendrer par le climat hivernal plus doux prévu par tous les deux modèles pour le futur (tableaux XXIII et XXXVI). Alors, cela révèle une perte probable de robustesse des espèces dans la région de Montréal dans le futur.

W-COLD

Pour la région des Laurentides une tendance à l'augmentation de cet indice est prévue, ce qui entraînera une exposition plus longue des gazons au froid. Ainsi, la projection future du modèle canadien CGCM1 indique que vers la deuxième période future (2040-2069), l'exposition des espèces gazonnantes au froid accroîtra d'environ 100% par rapport à la période courante tandis que selon le modèle HadCM3 (A2 et B2) elle augmentera de 4% à 14% pour la période à courte terme (2010-2039) et de 17% et de 6% pour la période à long terme (2040-2069). L'indice W-COLD changera sous le climat futur suite à une diminution probable de nombre de jours avec un couvert de neige accompagnée, probablement, d'une diminution de la période froide qui se produit entre la première et la dernière occurrence de la température minimale de - 15 °C.

W-RAIN

Pour la région de Montréal, les changements de cet indicateur sont assez prononcés. Ainsi, par rapport à la période de contrôle (1961-1990) les modèles climatiques prédisent pour les périodes du futur proche et du futur lointain des hausses de 33% et plus que 500% (CGCM1) de 14% et 4% (HadCM3 A2) et de 8% et 2% (HadCM3 B2), respectivement. Ceci indique également une augmentation du nombre de jours de pluie pendant la période froide. Notons que les résultats varient grandement d'un modèle climatique à l'autre. Ainsi, le modèle CGCM1 projette des conditions climatiques propices à l'englacement des

espèces gazonnantes durant l'hiver plus fréquemment que HadCM3 (tableaux XLV à XLVII).

Tableau XLIV. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Montréal selon les données observées

Caractéristiques	1961-1990 Min.	1961-1990 Max.	1961-1990 Moy.
FH COLD*	21,60	228,0	89,76
FH RAIN*	1,46	5,70	2,89
W THAW*	0,01	0,38	0,19
W COLD	-19,0	0,0	-1,59
W RAIN	0,05	1,82	0,75

Tableau XLV. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Montréal selon les projections de CGCM1

Caractéristique s	1961-1990 Min	1961-1990 Max	1961-1990 Moy	2010-2039 Min	2010-2039 Max	2010-2039 Moy	Δ^2 (%)	2040-2069 Min	2040-2069 Max	2040-2069 Moy	Δ^3 (%)
FH COLD¹	70,77	357,84	182,36	61,92	313,21	177,51	-2,7	11,71	343,56	159,23	-12,7
FH RAIN¹	1,83	3,67	2,59	1,51	4,09	2,81	8,5	1,96	5,90	3,18	22,8
W THAW¹	0,03	0,58	0,02	0,00	0,22	0,03	50,0	0,00	0,23	0,06	200,0
W COLD	-12,00	0,00	-5,00	-40,00	0,00	-8,03	60,6	-46,00	,00	-9,66	93,2
W RAIN	0,03	0,64	0,24	0,00	1,09	0,32	33,3	0,00	17,11	1,53	537,5

Tableau XLVI. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Montréal selon les données de HadCM3, scénario A2

Caractéristique s	1961-1990 Min.	1961-1990 Max.	1961-1990 Moy.	2010-2039 Min.	2010-2039 Max.	2010-2039 Moy.	Δ^2 (%)	2040-2069 Min.	2040-2069 Max.	2040-2069 Moy.	Δ^3 (%)
FH COLD¹	3,78	161,62	71,32	4,62	134,42	55,77	-21,8	2,97	166,81	70,50	-1,1
FH RAIN¹	0,31	6,53	3,17	0,45	7,21	3,20	0,9	1,71	6,66	3,23	1,9
W THAW¹	0,02	0,59	0,19	0,01	0,56	0,20	5,3	0,04	0,49	0,20	5,3
W COLD	-37,0	0,0	-8,07	-26,0	0,0	-8,4	4,1	-33	0,0	-9,4	16,5
W RAIN	0,22	1,0	0,57	0,2	1,28	0,65	14,0	0,11	1,1	0,59	3,5

Tableau XLVII. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Montréal selon les données de HadCM3, scénario B2

Caractéristique s	1961-1990 Min.	1961-1990 Max.	1961-1990 Moy.	2010-2039 Min.	2010-2039 Max.	2010-2039 Moy.	Δ^2 (%)	2040-2069 Min.	2040-2069 Max.	2040-2069 Moy.	Δ^3 (%)
FH COLD¹	0,50	166,25	58,91	1,93	131,75	55,19	-6,3	3,17	143,98	52,30	-11,2
FH RAIN¹	0,26	11,45	3,25	,90	10,32	3,68	13,2	,08	10,27	3,68	13,2
W THAW¹	0,02	0,51	0,18	0,01	0,58	0,18	0,0	0,01	0,56	0,19	5,6
W COLD	-30,0	0,0	-8,1	-53,0	0,0	-9,20	13,6	-38,0	0,0	-8,57	5,8
W RAIN	0,38	1,22	0,65	0,2	1,29	0,70	7,7	0,2	1,52	0,66	1,5

Note :

¹ Source : Singh et al. (2006)

² La différence en pourcentages entre les valeurs moyennes de la période 2010-2039 et celles de la période 1961-1990

³ La différence en pourcentages entre les valeurs moyennes de la période 2040-2069 et celles de la période 1961-1990

4.5.2 LA RÉGION DES CANTONS DE L'EST

4.5.2.1 Les indicateurs agroclimatiques automnaux

FH-COLD

Pour la région des Cantons de l'Est, l'indice FH-COLD augmentera ce qui provoquera, donc, une augmentation du potentiel de durcissement de 27 % et 38% (CGCM1) et de 20% et 4% (HadCM3 B2) pour les périodes 2010-2039 et 2040-2069 respectivement, par rapport à la période 1961-1990. Toutefois, la projection future de HadCm3 A2 indique une augmentation de l'indice de 7% pour la période 2010-2039 et une diminution de 3% pour la période 2040-2069. Notons qu'en générale les projections futures des deux MCGAO prévoient pour la région du Sherbrooke une augmentation assez importante de ce paramètre. Nous constatons que pour la région de Sherbrooke les tendances futures de cet indice sont bien différentes de celles de la région de Montréal. L'analyse comparative des variables climatiques futures des deux régions montre qu'il n'y pas des discordances importantes entre les tendances futures des celles-ci. Cela nous dirige vers l'hypothèse que les modèles climatiques prévoient une longueur différente de la période de durcissement automnal pour lesdites régions ce qui entraîne des valeurs divergentes pour l'indicateur FH-COLD (tableaux XLIX à LI).

FH-RAIN

Cet indice aura une tendance variable selon les scénarios climatiques futurs. Ainsi, par rapport à la période de contrôle (1961-1990), il augmentera de 13% (2010-2039) et 38% (2040-2069) selon la projection CGCM1 tandis que selon les scénarios HadCM3 A2 et B2 il diminuera de 19 et 7 % (2010-2039) et de 8 et 10% (2040-2069) respectivement. Cela s'explique par le fait que le modèle canadien CGCM1 prévoit pour la région des Cantons de l'Est des automnes plus humides que le modèle HadCM3. En effet, les précipitations augmenteront par rapport à la période automnale de contrôle (1961-1990) de 12,6% (2010-2039) et de 20,6% (2040-2069) selon le modèle CGCM1. Les projections HadCM3 A2 et B2 montrent pour la période 2010-2039 une légère augmentation de la précipitation moyenne automnale de 1,8% (B2) ou même une baisse de 6 % (A2) et pour la période 2040-2069 une augmentation de 1,2 % (A2) ou une abaissement de la hauteur des

précipitations de 3 % (B2) par rapport à la période automnale de contrôle (1961-1990). L'évolution future de l'indice FH-RAIN, pour la région des Cantons de l'Est, semble être, donc, incertaine (tableaux XLIX à LI).

4.5.2.2 Les indicateurs agroclimatiques hivernaux

W-THAW

Tous les scénarios des deux modèles climatiques indiquent une augmentation dans le futur de cet indice. En effet, le W-THAW augmentera pendant la période 2010-2039 de 67% (CGCM1), de 48% (HadCM3 A2) et de 17% (HadCM3 B2) et durant la période 2040-2069 de 189% (CGCM1), de 76% (HadCM3 A2) et de 57% (HadCM3 B2) par rapport à la période 1961-1990. Étant donné que cet indicateur reflète l'accumulation de températures >0 °C durant la saison froide, alors l'augmentation de celui-ci montre que sous le climat futur les plantes gazonnantes, dans la région des Cantons de l'Est, perdront probablement une partie de robustesse.

W-COLD

Pour la région des Cantons de l'Est cet indice, selon tous les scénarios futurs, s'amplifiera de manière graduelle. Ainsi, la projection future de CGCM1 indique que vers la deuxième période future (2040-2069), l'exposition des espèces gazonnantes au froid accroîtra de plus de 3 fois tandis que celle du HadCM3 montre une augmentation de 83% (A2) et de 23% (B2) par rapport à la période courante (1961-1990). La diminution de cet indice sera causée, probablement, par l'augmentation de la température moyenne hivernale dans ladite région qui provoquera une réduction de nombre de jours avec une couche nivale. Cette situation résultera en une exposition plus longue des plantes de gazon au froid.

W-RAIN

Les projections futures nous indiquent généralement une augmentation de nombre moyen de jours de pluie pendant la période froide, par rapport à la période courante (1961-1990). Ainsi le modèle CGCM1 prédit une augmentation de 89% (2010-2039) et de 136% (2040-2069) tandis que la projection HadCM3 A2 de 15% (2010-2039) et 24% (2040-2069).

Quant à la projection HadCM3 B2, elle prévoit d'abord une légère réduction des cas de pluies hivernales de 3% (2010-2039) et ensuite une augmentation de 10% (2040-2069).

Tableau XLVIII. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Sherbrooke selon les données observées

Caractéristiques	1961-1990 Min	1961-1990 Max	1961-1990 Moy
FH COLD ¹	1,10	182,00	71,01
FH RAIN ¹	1,14	5,30	3,06
W THAW ¹	0,00	0,73	0,28
W COLD	-58,90	0,00	-3,83
W RAIN	0,01	1,86	0,67

Tableau XLIX. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Sherbrooke selon les projections de CGCM1

Caractéristiques	1961-1990 Min	1961-1990 Max	1961-1990 Moy	2010-2039 Min	2010-2039 Max	2010-2039 Moy	Δ^2 (%)	2040-2069 Min	2040-2069 Max	2040-2069 Moy	Δ^3 (%)
FH COLD ¹	0,15	154,97	48,68	0,00	194,30	61,97	27,3	6,26	147,65	67,32	38,3
FH RAIN ¹	0,00	5,34	2,16	0,00	4,35	2,45	13,4	0,00	4,94	2,98	38,0
W THAW ¹	0,00	0,24	0,09	0,00	0,33	0,15	66,7	0,05	0,89	0,26	188,9
W COLD	-14,00	0,00	-3,63	-45,00	0,00	-10,53	190,1	-37,00	0,00	-12,10	233,3
W RAIN	0,08	1,31	0,36	0,21	1,25	0,68	88,9	0,26	1,82	0,85	136,1

Tableau L. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Sherbrooke selon les données de HadCM3, scénario A2

Caractéristiques	1961-1990 Min.	1961-1990 Max.	1961-1990 Moy.	2010-2039 Min.	2010-2039 Max.	2010-2039 Moy.	Δ^2 (%)	2040-2069 Min.	2040-2069 Max.	2040-2069 Moy.	Δ^3 (%)
FH COLD ¹	3,02	220,24	75,24	4,66	170,82	80,13	6,5	1,16	203,09	72,99	-3,0
FH RAIN ¹	0,49	6,80	3,15	,55	4,23	2,54	-19,4	,63	4,60	2,93	-7,0
W THAW ¹	0,03	0,60	0,21	0,04	0,62	0,31	47,6	0,09	0,84	0,37	76,2
W COLD	-23,00	0,00	-4,87	-26,00	0,00	-8,83	81,3	-38,00	0,00	-8,90	82,8
W RAIN	0,16	0,93	0,55	0,21	1,23	0,63	14,5	0,23	1,73	0,68	23,6

Tableau LI. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Sherbrooke selon les données de HadCM3, scénario B2

Caractéristiques	1961-1990 Min.	1961-1990 Max.	1961-1990 Moy.	2010-2039 Min.	2010-2039 Max.	2010-2039 Moy.	Δ^2 (%)	2040-2069 Min.	2040-2069 Max.	2040-2069 Moy.	Δ^3 (%)
FH COLD ¹	5,72	152,23	73,74	12,22	192,66	88,27	19,7	2,28	181,13	76,88	4,3
FH RAIN ¹	0,41	6,72	2,94	0,05	4,20	2,73	-7,1	0,69	4,58	2,65	-9,9
W THAW ¹	0,08	0,67	0,23	0,04	0,97	0,27	17,4	0,03	1,03	0,36	56,5
W COLD	-31,00	0,00	-7,9	-39,00	0,00	-8,37	5,9	-45,00	0,00	-9,70	22,8
W RAIN	0,12	1,06	0,59	0,09	1,33	0,57	-3,4	0,25	1,30	0,65	10,2

Note :

¹ Source : Singh et al. (2006)

² La différence en pourcentages entre les valeurs moyennes de la période 2010-2039 et celles de la période 1961-1990

³ La différence en pourcentages entre les valeurs moyennes de la période 2040-2069 et celles de la période 1961-1990

Ainsi, pour la région des Cantons de l'Est, le modèle CGCM1 projette des conditions climatiques hivernales moins propice à la survie des espèces gazonnantes que HadCM3. Les conditions climatiques futures probables provoqueront l'englacement des espèces gazonnantes durant l'hiver et, donc, des dommages aux gazons (tableaux XLIX à LI).

4.5.3 LA RÉGION DE LA VILLE DE QUÉBEC

4.5.3.1 Les indicateurs agroclimatiques automnaux

FH-COLD

Pour la région de la ville de Québec, l'indicateur FH-COLD augmentera, ce qui se traduira par une augmentation du potentiel de durcissement de 5 % (2010-2039) et 8% (2040-2069) selon le scénario CGCM1 et de 22% (2010-2039) et 11% (2040-2069) selon celui de HadCM3 B2 par rapport à la période 1961-1990. Seul le scénario HadCM3 A2 prévoit une légère diminution de cette caractéristique de 2,7 % (2010-2039) et de 3,5 % (2040-2069). Nous remarquons donc que les tendances futures de cet indice pour la région de la ville de Québec de même que celles de la région de Sherbrooke sont bien différentes des tendances futures de FH-COLD pour la région de Montréal. Cela pourrait s'expliquer aussi par le fait que les modèles climatiques prévoient une longueur différente de la période de durcissement automnal pour lesdites régions ce qui entraîne des valeurs divergentes pour ce paramètre (tableaux LIII à LV).

FH-RAIN

Cet indicateur, dans la région de la ville de Québec, aura une tendance générale à la hausse. Ainsi, il augmentera de 8% (2010-2039) et 16% (2040-2069) selon la projection du modèle CGCM1 ou de 7% (2010-2039) et 1% (2040-2069) selon la projection A2 du modèle HadCM3, par rapport à la période de contrôle. Quant à la projection future HadCM3 B2, elle prévoit aussi une augmentation de 6,3% pour la période du futur proche (2010-2039) mais elle prévoit par contre une diminution de 1,4% pour le futur lointain (2040-2069) par rapport à la période de contrôle (1961-1990). Ainsi, l'évolution future de l'indice FH-RAIN, pour cette région, semble être à la hausse, ce qui influencerait négativement le processus d'endurcissement automnal (tableaux LIII à LV).

4.5.3.2 Les indicateurs agroclimatiques hivernaux

W-THAW

Pour la région de la ville de Québec, tous les scénarios futurs des deux modèles climatiques indiquent une augmentation de cet indicateur par rapport à la période 1961-1990. Ces augmentations sont estimées à 100% (2010-2039) et 300% (2040-2069) pour CGCM1, à 14% (2010-2039) et 29% (2040-2069) pour HadCM3 A2 et à 43% (2010-2039) et 57% (2040-2069) pour HadCM3 B2, durant les deux périodes futures, respectivement. Reflétant l'accumulation de températures $>0^{\circ}\text{C}$ durant la saison froide, cet indicateur montre une perte probable de robustesse des espèces sous un climat hivernal futur plus chaud que le actuel.

Le modèle canadien CGCM1 prévoit une augmentation plus importante de cet indicateur que le modèle britannique HadCM3 car il prédit aussi un accroissement plus grand de la température moyenne hivernale que ce dernier. Effectivement, CGCM1 projette pour les périodes hivernales futures une augmentation de la température moyenne mensuelle de $2,1^{\circ}\text{C}$ (2010-2039) et de $3,3^{\circ}\text{C}$ (2040-2069) tandis que HadCM3 A2 prévoit une augmentation de $0,7^{\circ}\text{C}$ (2010-2039) et de $2,2^{\circ}\text{C}$ (2040-2069) et HadCM3 B2 prévoit une hausse de $0,9^{\circ}\text{C}$ (2010-2039) et de $2,0^{\circ}\text{C}$ (2040-2069) par rapport à la période de contrôle (1961-1990) (tableaux XXXI, XLI et XLII).

W-COLD

Ce paramètre aura une tendance future variable selon chacun des scénarios climatiques. Ainsi, par rapport à la période de contrôle (1961-1990), il diminuera de 6% (2010-2039) et 20% (2040-2069) selon le scénario CGCM1 et augmentera de 76% (2010-2039) et 18% (2040-2069) selon celui de HadCM3 B2. Quant au scénario HadCM3 B2, W-COLD d'abord réduira de 21% (2010-2039) et ensuite agrandira de 57% (2040-2069).

L'ampleur et la tendance différentes de cet indice par rapport aux celles des régions précédentes pourraient s'expliquer par le fait que la région de Québec est située plus au nord que les régions des Laurentides et des Cantons de l'Est. Cela permettra donc une stabilité plus grande à la couche nivale, grâce à la température moyenne plus basse, dans

les périodes futures. Toutefois, l'évolution future de l'indice W-COLD, pour la région de la ville de Québec reste, donc, incertaine.

W-RAIN

Les projections futures nous indiquent une augmentation des jours de pluie pendant la période froide, par rapport à la période froide courante (1961-1990): de 68 % (2010-2039) et de 164% (2040-2069) selon CGCM1, de 23% (2010-2039) et de 28% (2040-2069) d'après HadCM3 A2 et de 11% (2010-2039) et de 8% (2040-2069) suivant HadCM3 B2. Notons que les résultats varient beaucoup d'un modèle climatique à l'autre. Ainsi, pour la région de la ville de Québec, de même que pour celle des Cantons de l'Est, le modèle CGCM1 projette plus de pluies pendant l'hiver que HadCM3. Cela pourrait s'expliquer aussi par le fait que CGCM1 prévoit une augmentation plus importante de la température moyenne hivernale que HadCM3 qui favorisera l'occurrence des pluies pendant la saison froide.

De cette façon, les conditions climatiques futures causeraient l'englacement des espèces gazonnantes durant l'hiver et, donc, des dommages aux gazons (tableaux LIII à LV).

Tableau LII. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Québec selon les données observées

Caractéristiques	1961-1990 Min.	1961-1990 Max.	1961-1990 Moy.
FH COLD¹	20,55	189,60	94,51
FH RAIN¹	2,06	8,03	4,00
W THAW¹	0,00	0,38	0,08
W COLD	-5,00	0,00	-0,90
W RAIN	0,02	1,48	0,68

Tableau LIII. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Québec selon les projections de CGCM1

Caractéristiques	1961-1990 Min	1961-1990 Max	1961-1990 Moy	2010-2039 Min	2010-2039 Max	2010-2039 Moy	Δ^2 (%)	2040-2069 Min	2040-2069 Max	2040-2069 Moy	Δ^3 (%)
FH COLD¹	7,00	274,30	117,09	5,78	264,64	122,94	5.0	29,79	243,52	126,32	7.9
FH RAIN¹	0,00	4,88	2,72	0,11	9,02	2,93	7.7	1,88	4,51	3,15	15.8
W THAW¹	0,00	0,04	0,01	0,00	0,09	0,02	100.0	0,00	0,21	0,04	300.0
W COLD	-16,76	0,00	-2,03	-15,00	0,00	-1,90	-6.4	-8,00	0,00	-1,63	-19.7
W RAIN	0,00	0,73	0,28	0,00	1,34	0,47	67.9	0,24	1,51	0,74	164.3

Tableau LIV. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Québec selon les données de HadCM3, scénario A2

Caractéristiques	1961-1990 Min.	1961-1990 Max.	1961-1990 Moy.	2010-2039 Min.	2010-2039 Max.	2010-2039 Moy.	Δ^2 (%)	2040-2069 Min.	2040-2069 Max.	2040-2069 Moy.	Δ^3 (%)
FH COLD¹	12,13	213,24	104,66	30,24	217,73	101,81	-2.7	17,40	221,82	100,99	-3.5
FH RAIN¹	0,63	7,19	3,37	1,29	5,49	3,60	6.8	0,99	5,56	3,41	1.2
W THAW¹	0,01	0,22	0,07	0,01	0,28	0,08	14.3	0,01	0,45	0,09	28.6
W COLD	-9,00	0,00	-1,23	-9,00	0,00	-0,97	-21.1	-20,00	0,00	-1,93	56.9
W RAIN	0,11	1,17	0,53	0,03	1,92	0,65	22.6	0,18	1,49	0,68	28.3

Tableau LV. Le régime des indicateurs agroclimatiques à Québec selon les données de HadCM3, scénario B2

Caractéristiques	1961-1990 Min.	1961-1990 Max.	1961-1990 Moy.	2010-2039 Min.	2010-2039 Max.	2010-2039 Moy.	Δ^2 (%)	2040-2069 Min.	2040-2069 Max.	2040-2069 Moy.	Δ^3 (%)
FH COLD¹	5,81	240,60	91,53	32,09	228,26	111,69	22.0	48,59	207,71	101,20	10.6
FH RAIN¹	1,02	6,50	3,50	2,25	7,14	3,72	6.3	1,56	7,02	3,45	-1.4
W THAW¹	0,01	0,27	0,07	0,01	0,37	0,10	42.9	0,01	0,60	0,11	57.1
W COLD	-16,00	0,00	-1,93	-16,00	0,00	-3,40	76.2	-13,00	0,00	-2,27	17.6
W RAIN	0,09	1,24	0,61	0,08	1,34	0,68	11.5	0,30	1,19	0,66	8.2

Note :

¹ Source : Singh et al. (2006)

² La différence en pourcentages entre les valeurs moyennes de la période 2010-2039 et celles de la période 1961-1990

³ La différence en pourcentages entre les valeurs moyennes de la période 2040-2069 et celles de la période 1961-1990

4.5.4 VUE D'ENSEMBLE DE LA RÉGION D'ÉTUDE

Ainsi, les résultats montrent que selon les projections climatiques futures les conditions de durcissement automnal des espèces gazonnantes seront moins propice dans la région de Montréal et, généralement, moins dommageables dans les régions des Cantons de l'Est et de la ville de Québec que dans la période de contrôle. En ce qui concerne les indicateurs agroclimatiques hivernaux, il semble que les conditions climatiques de la période froide pourraient rendre plus difficile la survie hivernale des plantes dans toutes les trois régions d'étude. Pourtant, l'évolution future de l'indice W-COLD, pour la région de Québec reste incertaine.

En résumé, le changement du climat hivernal sera l'un des facteurs principaux qui contribuera à la détérioration du gazon des terrains de golf. Donc, il est important de sélectionner des espèces gazonnantes plus résistantes à une longue exposition aux basses températures (à cause des valeurs plus basse d'indice W-COLD) et à l'englacement (suite à

l'augmentation du paramètre W-RAIN). Il semble que les valeurs des indicateurs agroclimatiques calculées à partir des sorties de HadCM3 pour la période de contrôle sont plus proches des résultats obtenus à partir des données climatiques observées que celles calculées en utilisant les données climatiques sortant de CGCM1 (tableaux XLIV, XLVIII et LII).

4.6 LES INDICATEURS CLIMATIQUES, L'ÉTAT DU GAZON ET LA QUALITÉ DU JEU DES GOLFEURS

4.6.1 LA REGION DE LAURENTIDES (Y COMPRIS MONTREAL)

Sous le climat futur plus chaud, l'indicateur $N_j \text{ tmax} \geq 30^\circ\text{C}$ révèle que le nombre de jours avec des températures torrides pour la région de Montréal et les Laurentides augmentera graduellement pendant la saison de golf. Par rapport à la période de contrôle (1961-1990), celui-ci augmentera de 12 jours (CGCM1), de 5 jours (HadCM3 A2) et de 7 jours (HadCM3 B2), durant la période 2010-2039 et de 25 jours (CGCM1), de 16 jours (HadCM3 A2) et de 12 jours (HadCM3 B2), pendant la période 2040-2069. Les projections futures montrent, donc, que la chaleur intense pourrait avoir un impact négatif sur la pratique du sport.

Le paramètre **Canicule** montre que le nombre de cas de 3 jours chauds consécutifs avec la température maximale $\geq 30^\circ\text{C}$ augmentera lui aussi dans la région des Laurentides. En effet, il augmentera de zéro cas (1961-1990) à 0,5 cas (2010-2039) et à presque 1 cas (2040-2069) selon le modèle CGCM1 et de moins d'un cas (1961-1990) à 0,8 cas (2010-2039) et à 3,4 cas (2040-2069) conformément le scénario HadCM3 A2. Le scénario B2 de HadCM3 indique lui aussi que l'occurrence des cas avec des canicules augmentera de 0,6 cas (2010-2039) et de 1,5 cas (2040-2069) par rapport à la période de contrôle (1961-1990).

Tous les deux modèles indiquent des valeurs plus importantes dans le futur de l'indice $N_j \text{ tmin} \geq 27^\circ\text{C}$ qui exprime le nombre de jours de l'occurrence d'une température minimale de 27°C . Une augmentation plus importante par rapport à la période de contrôle (1961-1990) est prévue par le scénario CGCM1: d'environ 5 jours (2010-2039) et d'environ 14

jours (2040-2069). Il est probable, donc, que les conditions climatiques futures faciliteront le développement des certaines maladies de gazon.

Selon tous les scénarios climatiques, les deux indicateurs suivants la **Pluviosité (précipitation $\geq 0,5\text{mm}$)** et le **Nj prcp $\geq 0,1\text{mm}$** désignant le nombre de jours pluvieux durant la saison de golf, selon tous les scénarios connaîtront généralement une légère diminution. Par exemple, par rapport à la période de référence, le paramètre *précipitation $\geq 0,5\text{mm}$* diminuera de 1,4 jours (2010-2039) et de 3,1 jours (2040-2069) selon le scénario CGCM1; d'autre part, l'indice augmentera légèrement de 1,2 jours (2010-2039) et ensuite diminuera de 0,2 jours (2040-2069), selon le scénario HadCM3 A2; et réduira de 2,3 jours (2010-2039) et de 0,3 jours (2040-2069), selon le scénario HadCM3 B2. Cette situation pourrait avoir un impact positif sur l'achalandage au 21^e siècle dans la région de Montréal.

Dans la région des Laurentides, l'indice **Nj tmin $< -15^{\circ}\text{C}$ et CdNj = 0,0m**, qui cumule les jours lors de l'occurrence simultanée d'une température minimale de -15°C et d'un couvert de neige de 0,0 cm, subira une augmentation de 0,2 jours en 2010-2039 (CGCM1 et HadCM3 B2) et de 0,5 et 0,3 jours en 2040-2069 (CGCM1 et HadCM3 B2 respectivement) par rapport à la période de contrôle (1961-1990). Par contre, celui-ci connaîtra une légère diminution de 0,4 jours (2010-2039) et de 0,1 jours (2040-2069) par rapport à la période de contrôle (1961-1990) d'après le scénario HadCM3 A2. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que la projection HadCM3 A2 prévoit pour la région du Montréal une hausse moins importante de la température moyenne pendant l'hiver que les autres deux scénarios. En effet, celle-ci prédit une augmentation de la température moyenne pendant les mois d'hiver de $0,2^{\circ}\text{C}$ (2010-2039) et de $0,7^{\circ}\text{C}$ (2040-2069) tandis que la projection CGCM1 de $1,6^{\circ}\text{C}$ (2010-2039) et de $3,9^{\circ}\text{C}$ (2040-2069) et la projection HadCM3 B2 de $0,6^{\circ}\text{C}$ (2010-2039) et de $1,1^{\circ}\text{C}$ (2040-2069) par rapport à la période de référence (1961-1990) (tableaux XXIII et XXXV). Nous constatons, donc, qu'au fond l'exposition des plantes de gazon au froid serait plus prononcée dans le futur (tableau LVII à LIX).

Tableau LVI. Les valeurs des indicateurs climatiques qui pourraient affecter la qualité du gazon et les conditions de jeu des golfeurs à Montréal selon les données observées

Caractéristiques	1961-1990 Min.	1961-1990 Max.	1961-1990 Moy.
Nj tmax >=30°C	2,0	20,0	9,52
Canicule	0	8,0	1,93
Nj tmin >=27°C	0	0	0,00
Pluviosité (prcp >=0.5mm)	1,0	22,0	7,72
Nj prcp >=0,1mm	44,0	88,0	69,17
Nj tmin <-15°C et CdN = 0,0m	0,00	4,00	0,14

Tableau LVII. Les valeurs des indicateurs climatiques susceptibles d'affecter la qualité du gazon et les conditions de jeu des golfeurs à Montréal selon les projections de CGCM1

Caractéristiques	1961-1990	1961-1990	1961-1990	2010-2039	2010-2039	2010-2039	Δ^1 (jrs)	2040-2069	2040-2069	2040-2069	Δ^2 (jrs)
	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.		Min.	Max.	Moy.	
Nj tmax >=30°C	12,00	34,00	23,03	9,00	65,00	34,83	11,8	11,00	69,00	48,07	25,04
Canicule	0	0	0,00	0	3	0,47	0,47	0	6	0,86	0,86
Nj tmin >=27°C	0,0	15,0	3,57	0,0	30,0	9,40	5,83	0,0	38,0	17,90	14,33
Pluviosité (prcp >=0.5mm)	1,0	40,0	10,03	0,0	27,0	8,67	-1,36	0,0	27,0	6,97	-3,06
Nj prcp >=0,1mm	23,00	71,00	44,67	11,00	76,00	39,93	-4,74	2,00	58,00	34,11	-10,6
Nj tmin <-15°C et CdN = 0,0m	0,00	0,00	0,00	0,00	2,00	0,17	0,17	0,00	2,00	0,54	0,54

Tableau LVIII. Les valeurs des indicateurs climatiques susceptibles d'affecter la qualité du gazon et les conditions de jeu des golfeurs à Montréal selon les données de HadCM3, scénario A2

Caractéristiques	1961-1990	1961-1990	1961-1990	2010-2039	2010-2039	2010-2039	Δ^1 (jrs)	2040-2069	2040-2069	2040-2069	Δ^2 (jrs)
	Min.	Max.	Moy.	Min.	Max.	Moy.		Min.	Max.	Moy.	
Nj tmax >=30°C	2,0	21,0	10,7	8,0	31,0	15,83	5,13	14,0	55,0	26,8	16,1
Canicule	0,0	3,0	0,37	0,0	5,0	0,83	0,46	0,0	21,0	3,4	3,03
Nj tmin >=27°C	0,0	1,0	0,07	0,0	1,0	0,27	0,2	0,0	2,0	0,67	0,6
Pluviosité (prcp >=0.5mm)	5,0	18,0	9,97	3,0	21,0	11,17	1,2	2,0	20,0	9,8	-0,17
Nj prcp >=0.1mm	31,00	59,00	45,53	33,00	63,00	47,10	1,57	23,0	58,0	42,8	-2,73
N j tmin <-15 et CdN = 0.0	0,0	6,0	1,43	0,0	3,0	1,07	-0,36	0,0	4,0	1,33	-0,1

Tableau LIX. Les valeurs des indicateurs climatiques susceptibles d'affecter la qualité du gazon et les conditions de jeu des golfeurs à Montréal selon les données de HadCM3, scénario B2

CARACTERISTIQUES	1961-1990 MIN	1961-1990 MAX	1961-1990 MOY	2010-2039 MIN	2010-2039 MAX	2010-2039 MOY	Δ^1 (JRS)	2040-2069 MIN	2040-2069 MAX	2040-2069 MOY	Δ^2 (JRS)
Nj tmax $\geq 30^\circ\text{C}$	1,0	21,0	10,03	10,0	26,0	16,6	6,57	11,0	41,00	22,03	12,0
Canicule	0	4,0	0,3	0	7,0	0,93	0,63	0	6	1,77	1,47
Nj tmin $\geq 27^\circ\text{C}$	0	2,0	0,13	0	1,0	0,07	-0,06	0	2	0,20	0,07
Pluviosité (precp $\geq 0.5\text{mm}$)	3,0	21,0	11,0	4,0	22,0	8,7	-2,3	2,0	29,0	10,73	-0,27
Nj precp $\geq 0.1\text{mm}$	33,0	78,0	49,2	31	58	44,4	-4,8	30,0	67,0	46,13	-3,07
Nj tmin $< 15^\circ\text{C}$ et CdN = 0.0m	0	6,0	1,4	0,0	6,0	1,57	0,17	5,0	1,27	1,59	0,19

Note :

¹ La différence en pourcentages entre les valeurs moyennes de la période 2010-2039 et celles de la période 1961-1990

² La différence en pourcentages entre les valeurs moyennes de la période 2040-2069 et celles de la période 1961-1990

4.6.2 LA REGION DES CANTONS DE L'EST

L'indice Nj tmax $\geq 30^\circ\text{C}$ révèle que, pour la région des Cantons de l'Est, le nombre de jours chauds augmentera graduellement entre 1961-1990 et 2040-2069 d'environ 22 jours selon le scénario HadCM3 A2, d'environ 16 jours d'après le scénario HadCM3 B2 et de 24 jours suivant le scénario CGCM1. Il est possible de déduire, donc, que la chaleur intense pourrait avoir un impact néfaste sur la pratique du sport dans cette région.

La caractéristique **Canicule** montre que le nombre de cas de 3 jours chauds consécutifs avec la température maximale de $\geq 30^\circ\text{C}$ augmentera légèrement dans la région des Cantons de l'Est. La hausse du nombre de canicules passera de moins d'un cas en 1961-1990 à près d'un cas par saison en 2040-2069, selon les scénarios HadCM3 A2 et B2 sauf que la projection A2 indique une diminution importante des cas de canicule (de 92%) pour la période 2010-2039 par rapport à la période de contrôle (1961-1990). Le modèle CGCM1 montre aussi une augmentation de cas de canicule dans le futur mais d'une ampleur peu significative.

Les modèles climatiques indiquent tous les deux que sous le climat futur l'indicateur **Nj tmin $\geq 27^{\circ}\text{C}$** aura des valeurs plus importantes que dans la période actuelle. Une augmentation plus importante par rapport à la période de contrôle (1961-1990) d'environ 3 jours pour le futur proche (2010-2039) et d'environ 9 jours pour le futur lointain (2040-2069) est prévue par le scénario de CGCM1. Le modèle britannique HadCM3 (SRES A2 et B2) prédit lui aussi une augmentation graduelle de cet indice : d'environ 2 jours pour la période 2010-2039 et de 4 à 6 jours pour la période 2040-2069. Il est probable, donc, que les conditions climatiques futures faciliteront le développement des certains maladies de gazon dans la région des Cantons de l'Est.

Les indices de la **Pluviosité (précipitation $\geq 0,5\text{mm}$)** et du **Nj prcp $\geq 0,1\text{mm}$** comme pour la région précédente désignent, en générale, une diminution du nombre de jours pluvieux durant la saison de golf. Par exemple, par rapport à la période de référence (1961-1990), le paramètre *Nj prcp $\geq 0,1\text{mm}$* diminuera de 0,7 jours (2010-2039) et de 1,8 jours (2040-2069) selon le scénario CGCM1; de 4,3 jours (2010-2039) et de 7,1 jours (2040-2069) selon le scénario HadCM3 A2; de 3,3 jours (2010-2039) et de 2,0 jours (2040-2069) selon le scénario HadCM3 B2. De ce faite, dans la région des Cantons de l'Est, la fréquence moins grande des précipitations faciliterait l'achalandage dans le futur.

Dans la région des Cantons de l'Est, l'indice **Nj tmin $< -15^{\circ}\text{C}$ et CdNj = 0,0m**, accusera une augmentation par rapport à la période de contrôle de 214% (2010-2039) et de 228% (2040-2069) selon le scénario CGCM1 et de 89% (2010-2039) et de 16 (2040-2069) selon la projection HadCM3 A2. Toutefois, il connaîtra une diminution d'environ 50% pour chacune des deux périodes futures d'après le scénario HadCM3 B2. Pour expliquer cela nous supposons que la projection HadCM3 B2 prévoit une évolution plus stable dans le futur (2010-2039 et 2040-2069) de la couche nivale pour la région de Sherbrooke car l'étude comparative des paramètres climatiques simulés pour la période hivernale par les deux scénarios climatiques de HadCM3 ne montre pas des différences importantes entre ceux-ci. Nous constatons, donc, que l'absence plus fréquente de la neige dans le futur augmentera la probabilité d'exposition directe des plantes de gazon aux températures froides qui pourraient endommager le gazon (tableaux LXI à LXIII).

Tableau LX. Les valeurs des indicateurs climatiques susceptibles d'affecter la qualité du gazon et les conditions du jeu des golfeurs à Sherbrooke selon les données observées

CARACTÉRISTIQUES	1961-1990 MIN.	1961-1990 MAX.	1961-1990 MOY.
Nj tmin <-15°C et CdN = 0,0m	9,0	34,0	17,70
Nj tmax >=30°C	0,00	13,00	5,00
Canicule	0	0	0,00
Nj tmin >=27°C	0	4	1,00
Pluviosité (prcp >=0,5mm)	9,0	34,0	17,70
Nj prcp >=0,1mm	1,00	91,00	66,90

Tableau LXI. Les valeurs des indicateurs climatiques susceptibles d'affecter la qualité du gazon et les conditions du jeu des golfeurs à Sherbrooke selon les projections de CGCM1

CARACTÉRISTIQUES	1961-1990 MIN.	1961-1990 MAX	1961-1990 MOY	2010-2039 MIN.	2010-2039 MAX	2010-2039 MOY	Δ^1 (JRS)	2040-2069 MIN.	2040-2069 MAX	2040-2069 MOY	Δ^2 (JRS)
Nj tmax >=30°C	0,00	29,00	14,80	13,00	49,00	27,10	12,3	17,00	60,00	39,04	24,24
Canicule	0	0	0,00	0	1	0,07	0,07	0	1	0,07	0,07
Nj tmin >=27°C	0	9	1,50	0	20	5,23	3,73	2	27	10,97	9,47
Pluviosité (prcp >=0,5mm)	7,0	39,0	16,80	6,0	37,0	18,70	1,9	9,0	33,0	18,86	2,06
Nj prcp >=0,1mm	0,00	78,00	58,27	38,00	75,00	57,60	-0,67	36,00	75,00	56,52	-1,75
Nj tmin <-15°C et CdN = 0.0m	0,00	2,00	0,21	0,00	4,00	0,87	0,66	0,00	4,00	0,90	0,69

Tableau LXII. Les valeurs des indicateurs climatiques susceptibles d'affecter la qualité du gazon et les conditions du jeu des golfeurs à Sherbrooke selon les données de HadCM3, scénario A2

CARACTÉRISTIQUES	1961-1990 MIN.	1961-1990 MAX	1961-1990 MOY	2010-2039 MIN.	2010-2039 MAX	2010-2039 MOY	Δ^1 (JRS)	2040-2069 MIN.	2040-2069 MAX	2040-2069 MOY	Δ^2 (JRS)
Nj tmax >=30°C	0,00	17,00	5,90	3,00	26,00	13,60	7,7	9,00	65,00	27,30	21,4
Canicule	0	2	0,40	0	1	0,03	-0,37	0	8	0,90	0,5
Nj tmin >=27°C	0	1	0,07	0	5	1,60	1,53	0	27	6,00	5,93
Pluviosité (prcp >=0,5mm)	5,0	31,0	19,37	5,0	36,0	16,87	-2,5	4,0	26,0	14,73	-4,64
Nj prcp >=0,1mm	43,00	75,00	62,07	36,00	78,00	57,73	-4,34	37,00	74,00	54,93	-7,14
Nj tmin <-15°C et CdN = 0.0m	0,00	3,00	0,37	0,00	8,00	0,70	0,33	0,00	3,00	0,80	0,43

Tableau LXIII. Les valeurs des indicateurs climatiques susceptibles d'affecter la qualité du gazon et les conditions du jeu des golfeurs à Sherbrooke selon les données de HadCM3, scénario B2

CARACTERISTIQUES	1961-90 MIN	1961-1990 MAX	1961-90 MOY	2010-39 MIN	2010-39_M AX	2010-39 MOY	Δ^1 (JRS)	2040-69 MIN	2040-69 MAX	2040-69 MOY	Δ^2 (JRS)
Nj tmax $\geq 30^\circ\text{C}$	1,00	17,00	6,12	6,00	25,00	13,10	6,98	7,00	41,00	22,93	16,81
Canicule	0	1	0,10	0	3	0,23	0,13	0	4	0,77	0,67
Nj tmin $\geq 27^\circ\text{C}$	0	3	0,37	0	11	1,67	1,3	0	15	3,90	3,53
Pluviosité (prcp $\geq 0.5\text{mm}$)	7,0	36,0	17,13	6,0	25,0	15,03	-2,1	9,0	31,0	17,37	0,24
Nj prcp $\geq 0.1\text{mm}$	39,00	78,00	60,33	37,00	77,00	57,03	-3,3	41,00	82,00	58,37	-1,96
Nj tmin $< 15^\circ\text{C}$ et CdN = 0.0m	0,00	7,00	1,20	0,00	4,00	0,60	-0,6	0,00	3,00	0,50	-0,7

Note :

¹ La différence en pourcentages entre les valeurs moyennes de la période 2010-2039 et celles de la période 1961-1990

² La différence en pourcentages entre les valeurs moyennes de la période 2040-2069 et celles de la période 1961-1990

4.6.3 LA REGION DE LA VILLE DE QUEBEC

L'indice Nj tmax $\geq 30^\circ\text{C}$ révèle que le nombre de jours chauds pour la région de la ville de Québec, ainsi que pour les deux régions précédents, augmentera considérablement pendant la saison de golf pour les deux périodes futures par rapport à la période de référence. Ainsi, ce paramètre augmenterait de 20 jours (1961-1990) à 30 jours (2010-2039) et à 41 jours (2040-2069), selon le scénario CGCM1 ; de 9 jours (HadCm3 A2 et B2) à environ 20 jours (HadCM3 A2 et B2) et à 35 et à 30 jours (HadCM3 A2 et B2 respectivement) Les projections futures montrent, donc, que la chaleur intense pourrait modérer la pratique du sport dans ladite région.

L'évolution de l'indicateur **Canicule** reste incertaine pour les périodes à venir, car le modèle CGCM1 montre l'absence de celui-ci dans le futur tandis que les scénarios de HadCM3 indiquent un léger accroissement de la fréquence des périodes très chaudes au Québec. Ainsi, l'occurrence des canicules augmentera de 0,2 cas en moyen par saison en 2010-2039 (HadCM3 A2 et B2) et de 0,6 et 0,3 cas en 2040-2069 (HadCM3 A2 et B2 respectivement) par rapport à la période 1961-1990.

Les projections futures des deux modèles climatiques indiquent des valeurs assez importantes de l'indice $Nj\ tmin \geq 27^{\circ}C$ pour toutes les deux périodes futures (2010-2039 et 2040-2069) par rapport à la période de contrôle (1961-1990). Par exemple, pour la période du futur lointain (2040-2069) la projection du modèle CGCM1 prévoit une augmentation moyenne annuelle de 7 jours tandis que celles du HadCM3 (A2 et B2) de 9 et 5 jours respectivement. Il est probable, donc, que les conditions climatiques futures faciliteront dans la région de la ville de Québec le développement des certains maladies de gazon.

Tableau LXIV. Les valeurs des indicateurs climatiques susceptibles d'affecter la qualité du gazon et les conditions du jeu des golfeurs à Québec selon les données observées

Caractéristiques	1961-1990 Min.	1961-1990 Max.	1961-1990 Moy.
$Nj\ tmin < -15^{\circ}C$ et $CdN = 0,0m$	0,00	3,00	0,28
$Nj\ tmax \geq 30^{\circ}C$	1,00	15,00	5,52
Canicule	0	0	0,00
$Nj\ tmin \geq 27^{\circ}C$	0	7	0,90
Pluviosité ($prcp \geq 0,5mm$)	3,0	22,0	14,62
$Nj\ prcp \geq 0,1mm$	41,00	70,00	58,90

Pour la région de la ville de Québec, les indicateurs de la **Pluviosité (précipitation $\geq 0,5mm$)** et du **$Nj\ prcp \geq 0,1mm$** suggèrent, de même que pour les deux régions précédentes, une diminution du nombre de jours humides durant la saison de golf ce qui favorisera, donc, l'achalandage des clubs de golf pendant les périodes à venir. Par exemple, le paramètre $Nj\ prcp \geq 0,1mm$ en le rapportant à la période de référence (1961-1990), diminuera ses valeurs moyennes annuelles de 2,5 jours (2010-2039) et de 3,3 jours (2040-2069) selon le scénario CGCM1; de 5,9 jours (2010-2039) et de 8,8 jours (2040-2069) selon le scénario HadCM3 A2; de 3,9 jours (2010-2039) et de 5,7 jours (2040-2069) selon le scénario HadCM3 B2.

Dans la région de la ville de Québec, l'indicateur $Nj\ tmin < -15^{\circ}C$ et $CdNj = 0,0m$, ne connaîtra pas des changements importants dans le futur. Cela pourrait s'expliquer par le fait que les températures moyennes mensuelles hivernales de ladite région plus bas que celles des deux régions géographiques précédentes, déterminées par la position plus au

nord de la région de Québec, assurera la permanence de la couche nivale dans l'espace et dans le temps (tableaux LXV à LXVII).

Tableau LXV. Les valeurs des indicateurs climatiques susceptibles d'affecter la qualité du gazon et les conditions du jeu des golfeurs à Québec selon les projections de CGCM1

Caractéristiques	1961-1990 Min.	1961-1990 Max.	1961-1990 Moy.	2010-2039 Min.	2010-2039 Max.	2010-2039 Moy.	Δ^1 (jrs)	2040-2069 Min.	2040-2069 Max.	2040-2069 Moy.	Δ^2 (jrs)
Nj tmax $\geq 30^\circ\text{C}$	0,00	35,00	19,67	20,00	43,00	29,60	9,9	21,00	58,00	41,03	21,4
Canicule	0	2	0,07	0	0	0,00	-0,07	0	0	0,00	-0,07
Nj tmin $\geq 27^\circ\text{C}$	0,0	11,0	1,97	0,0	15,0	4,07	2,1	0,0	22,0	9,21	7,2
Pluviosité (prcp $\geq 0,5\text{mm}$)	3,0	36,0	14,07	4,0	27,0	11,60	-2,5	2,0	32,0	12,03	-2,0
Nj prcp $\geq 0,1\text{mm}$	0,00	81,00	49,03	29,00	73,00	46,57	-2,5	32,00	71,00	45,77	-3,3
Nj tmin $< -15^\circ\text{C}$ et CdN = 0,0m	0,00	1,00	0,07	0,00	0,00	0,00	-0,07	0,00	0,00	0,00	-0,07

Tableau LXVI. Les valeurs des indicateurs climatiques susceptibles d'affecter la qualité du gazon et les conditions du jeu des golfeurs à Québec selon les données de HadCM3, scénario A2

Caractéristiques	1961-1990 Min.	1961-1990 Max.	1961-1990 Moy.	2010-2039 Min.	2010-2039 Max.	2010-2039 Moy.	Δ^1 (jrs)	2040-2069 Min.	2040-2069 Max.	2040-2069 Moy.	Δ^2 (jrs)
Nj tmax $\geq 30^\circ\text{C}$	2,00	21,00	9,20	4,00	35,00	19,07	9,9	19,00	61,00	35,03	25,8
Canicule	0	2	0,07	0	3	0,23	0,2	0	5	0,70	0,6
Nj tmin $\geq 27^\circ\text{C}$	0	3	0,50	0	8	2,80	2,3	0	38	9,93	9,4
Pluviosité (prcp $\geq 0,5\text{mm}$)	2,0	24,0	13,77	6,0	21,0	11,37	-2,4	2,0	22,0	9,97	-3,8
Nj prcp $\geq 0,1\text{mm}$	31,00	74,00	53,77	34,00	62,00	47,87	-5,9	23,00	56,00	44,93	-8,8
Nj tmin $< -15^\circ\text{C}$ et CdN = 0,0m	0,00	2,00	0,13	0,00	2,00	0,13	0,0	0,00	2,00	0,20	0,1

Tableau LXVII. Les valeurs des indicateurs climatiques susceptibles d'affecter la qualité du gazon et les conditions du jeu des golfeurs à Québec selon les données de HadCM3, scénario B2

Caractéristiques	1961-1990 Min	1961-1990 Max	1961-1990 Moy	2010-2039 Min	2010-2039 Max	2010-2039 Moy	Δ^1 (jrs)	2040-2069 Min	2040-2069 Max	2040-2069 Moy	Δ^2 (jrs)
Nj tmax $\geq 30^\circ\text{C}$	1,00	20,00	9,33	11,00	28,00	19,57	10,2	14,00	42,00	29,70	20,4
Canicule	0	0	0,00	0	3	0,23	0,2	0	2	0,30	0,3
Nj tmin $\geq 27^\circ\text{C}$	0	3	0,73	0	12	2,70	2,0	0	15	5,97	5,2
Pluviosité (prcp $\geq 0,5\text{mm}$)	5,0	27,0	12,60	2,0	27,0	11,60	-1,0	4,0	24,0	11,33	-1,3
Nj prcp $\geq 0,1\text{mm}$	37,00	67,00	52,30	34,00	71,00	48,37	-3,9	34,00	63,00	46,60	-5,7
Nj tmin $< -15^\circ\text{C}$ et CdN = 0,0m	0,00	3,00	0,30	0,00	3,00	0,30	0,0	0,00	3,00	0,37	0,1

Note :

¹ La différence en pourcentages entre les valeurs moyennes de la période 2010-2039 et celles de la période 1961-1990

² La différence en pourcentages entre les valeurs moyennes de la période 2040-2069 et celles de la période 1961-1990

4.6.4 VUE D'ENSEMBLE DE LA RÉGION D'ÉTUDE

Une analyse d'ensemble de la région d'étude révèle que les projections futures des deux modèles climatiques indiquent une augmentation, dans toutes les sous régions, du nombre des jours chauds (température maximale $\geq 30^{\circ}\text{C}$) ainsi qu'une amplification des périodes caniculaires dans les sous régions des Laurentides et des Cantons de l'Est. Cela pourrait engendrer une diminution d'achalandage des clubs de golf. Ensuite, le pronostic de l'occurrence des températures minimales de $\geq 27^{\circ}\text{C}$ plus fréquentes nous amène à penser que dans le sud du Québec les changements climatiques imposeront une propagation plus accrue de certaines maladies de gazon. Par conséquent, pour éviter que le gazon soit attaqué par celles-ci, il faudra que les gestionnaires des terrains de golf d'aujourd'hui trouvent des solutions adéquates. Par ailleurs, il semble que la pluviosité moins importante, durant les périodes à venir aura un impact positif sur la pratique du sport. Finalement, le paramètre hors saison de golf montrant l'occurrence simultanée de la température minimale de -15°C et de l'absence de la couche nivale, nous indique que les conditions hivernales seront moins favorables pour les gazons des terrains de golf dans le futur dans deux sous régions : les Laurentides et les Cantons de l'Est. Cela s'explique par le fait que la position plus nordique de la région de la ville de Québec, assurera une stabilité plus grande de la couche nivale dans l'espace et dans le temps tout en confirmant d'ailleurs les résultats de l'analyse d'indicateur agroclimatiques hivernal W-COLD. En comparant les valeurs des indicateurs climatiques susceptibles d'affecter la qualité du gazon obtenues à partir des données simulées de la période 1961-1990 avec celles établis à partir des données observées pour la même période (tableaux LVI, LX et LXIV) nous constatons qu'il y en a une haute ressemblance.

4.7 LA DURÉE DE LA SAISON DE GOLF

4.7.1 LA REGION DE LAURENTIDES (Y COMPRIS MONTREAL)

La durée de la saison de golf, pour la région de Montréal, connaîtra un allongement dans le futur, gagnant des jours golfables au début et à la fin de la saison. Ainsi, la saison de golf débutera 2 (CGCM1 et HadCM3) jours plus tôt et finira 4 (CGCM1) à 8 (HadCM3 A2) jours plus tard pour la période 2010-2039, tandis qu'elle débutera 7 (CGCM1) à 5

(HadCM3 A2) jours plus tôt et terminera 10 (CGCM1) à 12 (HadCM3 A2) jour plus tard pour la période 2040-2069 par rapport à la période de contrôle. Suite à l'analyse des résultats, nous avons remarqué que la durée de la saison de golf dans la région de Montréal augmenterait vers la deuxième période future (2040-2069) de 8 à 12 jours selon les projections futurs de HadCM3 et de 17 jours selon celle de CGCM1 (tableaux LXVIII à LXXI).

Tableau LXVIII. Le début, la fin et la durée de la saison de golf à Montréal selon les données observées

Caractéristiques	1961-1990 Min.	1961-1990 Max.	1961-1990 Moy.
Début saison	3 avr	22 mai	25 avr
Fin saison	7 oct	23 nov	28 oct
Durée saison	144	208	186

Tableau LXIX. Le début, la fin et la durée de la saison de golf à Montréal selon les sortis de CGCM1

Caractéristiques	1961-1990 Min	1961-1990 Max	1961-1990 Moy	2010-2039 Min	2010-2039 Max	2010-2039 Moy	2040-2069 Min	2040-2069 Max	2040-2069 Moy
Début saison	20 avr	29 mai	7mai	26 avr	22 mai	5 mai	17 avr	13 mai	30 avr
Fin saison	14 oct	29 nov	29 oct	14 oct	17 nov	2 nov	19 oct	22 nov	8 nov
Durée saison	142,00	205,00	174,80	162,00	218,00	180,90	169,00	217,00	191,73

Tableau LXX. Le début la fin et la duré de la saison de golf à Montréal selon les sortis de HadCM3, scénario A2

Caractéristiques	1961-1990 Min.	1961-1990 Max.	1961-1990 Moy.	2010-2039 Min.	2010-2039 Max.	2010-2039 Moy.	2040-2069 Min.	2040-2069 Max.	2040-2069 Moy.
Début saison	23 mar	30 avr	15avr	28 mar	19 avr	13avr	2 avr	21 avr	10 avr
Fin saison	17 oct	11 nov	31oct	12 oct	24 nov	8 nov	21 oct	30 nov	8 nov
Durée saison	177	231	200	182	241	209	193	242	212

Tableau LXXI. Le début, la fin et la durée de la saison de golf à Montréal selon les sortis de HadCM3, scénario B2

Caractéristiques	1961-1990 Min	1961-1990 Max	1961-1990 Moy	2010-2039 Min	2010-2039 Max	2010-2039 Moy	2040-2069 Min	2040-2069 Max	2040-2069 Moy
Début saison	23 mar	28avr	14 avr	1avr	27avr	12 avr	26 mar	17avr	12avr
Fin saison	18oct	24 nov	02 nov	11oct	29nov	05 nov	24oct	25nov	9 nov
Durée saison	179	241	203	182	234	207	193	228	211

4.7.2 LA REGION DES CANTONS DE L'EST

La durée de la saison de golf, pour la région des Cantons de l'Est, de même que pour la région des Laurentides, accusera un certain allongement durant le futur. Ainsi, la saison de golf débutera 5 (CGCM1) à 2 (HadCM3 B2) jours plus tôt et finira 5 (CGCM1) à 6 (HadCM3 B2) ou à 15 (HadCM3 A2) jours plus tard pour la période 2010-2039, tandis qu'elle débutera 10 (CGCM1) à 4 (HadCM3 B2) jours plus tôt et terminera 11 (CGCM1) à 21 (HadCM3 A2) jour plus tard pour la période 2040-2069 par rapport à la période de contrôle (1961-1990). Nous avons constaté que la durée de la saison de golf, dans la région des Cantons de l'Est, augmentera vers la deuxième moitié du 21^e siècle de 18 jours selon les projections futures de HadCM3 et de 21 jours selon celle de CGCM1 (tableaux LXXII à LXXV).

Tableau LXXII. Le début, la fin et la durée de la saison de golf à Sherbrooke selon les données observées

Caractéristiques	1961-1990 Min.	1961-1990 Max.	1961-1990 Moy.
Début saison	18 avr	21 mai	1 mai
Fin saison	27 sep	12 nov	21 oct
Durée saison	147	197	174

Tableau LXXIII. Le début, la fin et la durée de la saison de golf à Sherbrooke selon les sortis de CGCM1

Caractéristiques	1961-1990 Min	1961-1990M ax	1961-1990 Moy	2010-2039 Min	2010-2039M ax	2010-2039 Moy	2040-2069 Min	2040-2069 Max	2040-2069 Moy
Début saison	28avr	31 mai	17 mai	29 avr	29 mai	12 mai	19avr	24 mai	07 mai
Fin saison	01 oct	19 nov	24 oct	05 oct	17 nov	29 oct	14 oct	21 nov	04 nov
Durée saison	132	209	159	140	198	170,36	156	204	180,66

Tableau LXXIV. Le début, la fin et la durée de la saison de golf à Sherbrooke selon les sortis de HadCM3, scénario A2

Caractéristiques	1961-1990 Min.	1961-1990 Max.	1961-1990 Moy.	2010-2039 Min.	2010-2039 Max.	2010-2039 Moy.	2040-2069 Min.	2040-2069 Max.	2040-2069 Moy.
Début saison	27mar	13 mai	16avr	28 mar	3 mai	17 avr	4avr	4mai	16 avr
Fin saison	7oct	17 nov	16 oct	9 oct	18 nov	1 nov	16 oct	24 nov	6 nov
Durée saison	171	208	186	173	219	198	181	253	204

Tableau LXXV. Le début, la fin et la durée de la saison de golf à Sherbrooke selon les sorties de HadCM3, scénario B2

Caractéristiques	1961-1990 Min	1961-1990 Max	1961-1990 Moy	2010-2039 Min	2010-2039 Max	2010-2039 Moy	2040-2069 Min	2040-2069 Max	2040-2069 Moy
Début saison	6 avr	15 mai	20 avr	1 avr	5 mai	18 avr	27 mar	2 mai	16 avr
Fin saison	27sep	20 nov	23 oct	8 oct	22 nov	29 oct	10 oct	25 nov	5 nov
Durée saison	162,0	213,0	185	173,0	224,0	194	171,0	234,0	203

4.7.3 LA RÉGION DE LA VILLE DE QUÉBEC

La durée de la saison de golf, pour la région de la ville de Québec, à l'instar des deux régions précédentes, connaîtra un allongement durant le 21^e siècle. Ainsi, la saison de golf débutera 4 (CGCM1) à 2 (HadCM3 A2) ou à 6 (HadCM3 B2) jours plus tôt et finira 5 (CGCM1) à 6 (HadCM3 A2) ou à 2 (HadCM3 B2) jours plus tard pour la période 2010-2039, tandis qu'elle débutera 10 (CGCM1) à 6 (HadCM3 A2) ou à 10 (HadCM3 B2) jours plus tôt et terminera 10 (CGCM1) à 16 (HadCM3 A2) ou à 8 (HadCM3 B2) jours plus tard pour la période 2040-2069 par rapport à la période de contrôle (1961-1990). Nous avons établi que la durée de la saison de golf dans cette région augmentera vers la deuxième moitié du 21^e siècle de 18 à 20 jours selon les projections futures de HadCM3 et d'environ 20 jours selon celle de CGCM1 (tableaux LXXVI à LXXIX).

4.7.4 VUE D'ENSEMBLE DE LA RÉGION D'ÉTUDE

Les projections futures des deux modèles climatiques pointent vers un allongement important de la saison de golf, surtout dans deux sous régions : les Cantons de l'Est et la ville de Québec où celle-ci accroîtra d'environ trois semaines. Tandis que le modèle CGCM1 prévoit un allongement significatif de la durée de la saison de golf au début ainsi qu'à la fin de la saison, l'autre modèle HadCM3 prédit un accroissement plus important de celle-ci en automne.

Tableau LXXVI. Le début, la fin et la durée de la saison de golf à Québec selon les données observées

Caractéristiques	1961-1990 Min.	1961-1990 Max.	1961-1990 Moy.
Début saison	16 avr	18 mai	03 mai
Fin saison	27 sep	12 nov	21 oct
Durée saison	145,00	191,00	171,37

Tableau LXXVII. Le début, la fin et la durée de la saison de golf à Québec selon les sortis de CGCM1

Caractéristiques	1961-1990 Min	1961-1990 Max	1961-1990 Moy	2010-2039 Min	2010-2039 Max	2010-2039 Moy	2040-2069 Min	2040-2069 Max	2040-2069 Moy
Début saison	06 mai	07 juin	23 mai	07 mai	06 juin	19 mai	1 mai	24 mai	13 mai
Fin saison	30 sep	11 nov	20 oct	1 oct.	02 nov	21 oct	10 oct	15 nov	30 oct
Durée saison	122,00	182,00	150,66	132,00	177,00	155,43	150,00	190,00	170,03

Tableau LXXVIII. Le début, la fin et la durée de la saison de golf à Québec selon les sortis de HadCM3, scénario A2

Caractéristiques	1961-1990 Min.	1961-1990 Max.	1961-1990 Moy.	2010-2039 Min.	2010-2039 Max.	2010-2039 Moy.	2040-2069 Min.	2040-2069 Max.	2040-2069 Moy.
Début saison	19 avr	12 mai	27 avr	29 mar	7 mai	25 avr	17 mar	1 mai	21 avr
Fin saison	27 sep	11 nov	23 oct	06 oct	20 nov	01 nov	06 oct.	22 nov	07 nov
Durée saison	146,00	208,00	178,57	163,00	221,00	189,73	161,00	237,00	199,50

L'allongement de la saison de golf pourrait avoir des impacts positifs sur l'achalandage dans la région d'étude ce qui entraînera une augmentation des potentiels économiques des clubs de golf.

Si nous comparons la durée de la saison de golf pour la période 1961-1990 calculée à partir de données observées avec celle calculée à partir de données issues de HadCM3 et de CGCM1, nous constatons que ce dernier fournit pour la région à l'étude des valeurs climatiques plus réelles que le modèle HadCM3 (tableaux LXVIII, LXXII et LXXVI).

Tableau LXXIX. Le début la fin et la durée de la saison de golf à Québec selon les sortis de HadCM3, scénario B2

Caractéristiques	1961-1990 Min	1961-1990 Max	1961-1990 Moy	2010-2039 Min	2010-2039 Max	2010-2039 Moy	2040-2069 Min	2040-2069 Max	2040-2069 Moy
Début saison	01 avr	14 mai	29 avr	01 avr	11 mai	23 avr	27 mar	01 mai	19 avr
Fin saison	07 oct.	24 nov	25 oct	08 oct	14 nov	27 oct	06 oct.	23 nov	02 nov
Durée saison	159,00	217,00	179,30	154,00	219,00	187,00	163,00	220,00	196,90

5 CONCLUSIONS

La présente étude visait à identifier les impacts potentiels d'un changement climatique, durant le 21^e siècle, sur le bilan hydrique des terrains de golf au sud du Québec, sur les conditions physiques du gazon des terrains de golf, sur les conditions atmosphériques liées à la pratique de golf ainsi que sur la durée de la période golfable.

Les résultats de la recherche confirment l'hypothèse de départ qui supposait que le réchauffement climatique entraînerait des modifications des conditions hydriques du gazon des terrains de golf ; la dégradation de l'état physique du gazon des terrains de golf et la modification de la durée de la saison de golf. De plus, l'étude met en relief le fait que certaines conditions climatiques futures pourraient aussi avoir une influence défavorable sur la pratique de ce sport.

Par la suite sont présenté les principaux points de repère de la présente recherche.

- Selon les projections futures du modèle climatique CGCM1 les températures moyennes augmenteront dans le sud du Québec d'environ 1,5 °C en 2010-2039 et de 2,5-3,0 °C en 2040-2069, par rapport à la période 1961-1990. Les taux des précipitations resteront relativement stables dans la région des Laurentides et s'élèveront d'environ 10% en 2010-2039 et de 20% en 2040-2069 dans les régions des Cantons de l'Est et du Québec, par rapport à la période 1961-1990;
- Les scénarios climatiques futurs du modèle climatique HadCM3 A2 et B2 prévoient une augmentation des températures moyennes dans le sud du Québec d'environ 0,8-1,4 °C en 2010-2039 et de 1,5-2,8 °C en 2040- 2069, par rapport à la période 1961-1990. Les précipitations augmenteraient dans la région des Laurentides d'environ 2 à 3% en 2010-2039 et d'environ 1% en 2040-2069 et diminueront de 1 à 3,6% dans les régions des Cantons de l'Est et du Québec, par rapport à la période 1961-1990;

- La fluctuation des taux mensuels d'irrigation de la période 1961-1990, dans la région du sud du Québec, a été déterminée à la fois par les variations temporelles des précipitations et de l'évapotranspiration potentielle;
- L'évapotranspiration a une faible variation interannuelle, par conséquent celle-ci aurait un impact moins prononcé que les précipitations sur les taux mensuels d'irrigation;
- Quant aux précipitations, les fluctuations quantitatives temporelles de celles-ci déterminent principalement la fréquence et les taux d'arrosage sur les terrains de golf dans la région à l'étude;
- Le modèle de culture EPIC simule adéquatement les taux mensuels d'irrigation. Pourtant le calcul de certaines variables notamment la fréquence d'irrigation est moins concluante;
- Dans une perspective de changements climatiques futurs, les besoins potentiels en irrigation des espèces gazonnantes des terrains de golf augmenteraient dans toutes les régions du sud du Québec, notamment dans les régions des Laurentides et du Québec;
- Dans les régions des Laurentides et des Cantons de l'Est, les besoins en irrigation accroîtraient, spécifiquement, pendant le début et la mi-été tandis que pour la région de la ville de Québec ils augmenteraient pendant la mi-été et la fin de l'été;
- Les projections climatiques pour les deux périodes futures indiquent que les taux d'irrigation auraient une tendance à la hausse et que celle-ci sera plus évidente pendant la première période future 2010-2039 comparée à la période 2040 – 2069;
- Les indicateurs agroclimatiques montrent la dégradation des conditions climatiques hivernales pour les plantes gazonnantes ce qui déterminerait la perte de robustesse

et l'englacement des celles-ci durant l'hiver dans toutes les trois régions du sud du Québec ;

- Quant aux conditions climatiques automnales, les paramètres agroclimatiques présentent des conditions climatiques moins propices pour le processus d'endurcissement des plantes gazonnantes dans la région de Montréal et des conditions moins dommageables dans les régions des Cantons de l'Est et de la ville de Québec que dans la période de contrôle.
- Les indicateurs climatiques mettent en relief que dans un climat futur plus chaud il y aurait une augmentation des jours avec des températures maximales de $\geq 30^{\circ}\text{C}$ à l'ensemble de la région à l'étude ce qui pourrait diminuer l'achalandage des clubs de golf.
- En condition du climat futur l'occurrence plus accentuée des températures minimales de $> 27^{\circ}\text{C}$ augmenterait, la probabilité de manifestation de certaines maladies de gazon dans toutes les trois régions.
- D'après les deux modèles climatiques utilisés, la pluviosité serait moins fréquente dans le futur au sud du Québec, ce qui aurait un impact favorable sur la clientèle des clubs de golf, car le nombre réduit des jours pluvieux pourrait augmenter le nombre de ceux propices à la pratique du sport.
- La durée de la saison de golf augmenterait d'environ trois semaines, dans le sud du Québec, d'ici la deuxième moitié du présent siècle et, par conséquent, ceci pourrait avoir des répercussions favorables sur les perspectives économiques de l'industrie de golf dans cette région du Canada. Toutefois, cela aura un impact minimal sur l'achalandage, car selon les gestionnaires des terrains de golf, la plupart de l'achalandage se produit pendant la période de juillet à septembre (avec un maximum pendant les vacances de juillet).

En s'appuyant sur les résultats de cette étude, nous proposons les recommandations suivantes à l'attention des gestionnaires des terrains de golf du sud du Québec, afin d'atténuer les impacts défavorables d'un possible changement climatique sur l'industrie de golf de cette région.

- Les gestionnaires des gazons de golf de la région du sud du Québec devraient trouver des moyens pour éliminer le déficit hydrique prévu, suite à un climat futur plus chaud que le présent.
- Suite à la multiplication des attaques de certaines maladies de gazon, les responsables des gazons devraient trouver des espèces gazonnantes plus résistantes à celles-ci.
- Dans le même ordre d'idées, les surintendants de terrains de golf devraient choisir les cultivars mieux adaptés aux conditions climatiques hivernales plus dures dans le futur.
- Les intendants des gazons des terrains de golf doivent chercher à remplacer également les espèces et les cultivars moins résistants aux sécheresses par des espèces plus robustes. Par exemple, de substituer le pâturin annuel par l'agrostide traçante.
- Par rapport à l'augmentation des jours chauds, il est probablement nécessaire de construire des zones d'agrément spéciales (p. ex. des parcs, des piscines) afin d'atténuer l'impact de ceux-là sur la pratique du sport.

Pour une analyse plus approfondie, il serait important d'utiliser les prévisions des modèles climatiques régionaux qui possèdent une résolution spatiale plus fine. Cela permettrait de coupler les modèles de culture directement aux ceux climatiques et, par conséquent, de diminuerait les incertitudes. Il serait important également de comparer le modèle de culture EPIC avec d'autres modèles comme par exemple le modèle de culture DSSAT.

BIBLIOGRAPHIE

- Adejuwon, J.O. 2004. Assessing the suitability of the EPIC crop model for use in the study of impacts of climate variability and climate change in West Africa. AIACC Working Paper No. 5. Valable au site: [<http://www.aiaccproject.org/>] (consulté le 2006-01-09).
- Baier W. et Robertson G.W. 1965. Estimation of latent evaporation from simple weather Observations. *Can. J. Plant Sci.* **45**: 276-284.
- Baillargeon, G. 1989. *Probabilités, statistiques et techniques de régression*. Les Éditions SMG, Trois-Rivières, 631 p.
- Barry, R.G. et Carleton, A.M. 2001. *Synoptic and Dynamic Climatology*. Routledge, New York, 620p.
- Beard, J.B. 1964a. The effects of ice, snow, and water covers on Kentucky bluegrass, annual bluegrass, and creeping bentgrass . *Crop sci.*, **4**: 638-640.
- Beard, J.B. 1965. Effects of ice cover in the field on two perennial grasses. *Crop sci.*, **5**: 139-140.
- Beard, J.B. et Daniel, W.H. 1965. Effect of temperature and cutting on the growth of creeping bentgrass (*Agrostis palustris* Huds.) roots. *Agron. J.*, **57**: 249-250.
- Beard, J.B. 1969. Effect of temperature stress on *Poa annua*. *California Turfgrass Culture*, **19** (1): 1-2.
- Beard, J.B. 1973. *Turfgrass: Science and Culture*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J. 658p.

- Beard, J.B. 1982. *Turf management for golf courses*. Burgess Publishing Company. USA. 642p.
- Beard, J.B., et Sifers, S.I. 1997. Bentgrass for putting greens. *Golf Cours Manag.* **65**: 54-60.
- Bélangier, G., Rochette, P., Castonguay, Y., Bootsma, A., Mongrain, D. et Ryan, D.A. 2002. Climate change and winter survival of perennial forage crops in Eastern Canada. *Agron. J.* **94**: 1120-1130.
- Bennett, O.L. et Doss, B.D. 1960. Effect of soil moisture level on root distribution of cool-season forage species. *Agron. J.* **52**: 204-207.
- Boer, G.J., Flato, G.M., Reader, M.C. et Ramsden, D., 2000a. A transient climate change simulation with historical and projected greenhouse gas and aerosol forcing: experimental design and comparison with the instrumental record for the 20th century. *Climate Dynamics*, **16**: 405-425.
- Boer, G.J., Flato, G.M. et Ramsden, D., 2000b. A transient climate change simulation with historical and projected greenhouse gas and aerosol forcing: projected climate for the 21st century. *Climate Dynamics*: **16**, 427-450.
- Bootsma, A., Anderson, D. et Gameda, S. 2004. *Impacts potentiels du changement climatique sur les indicateurs agroclimatiques dans les régions du sud de l'Ontario et du Québec*. Bulletin technique. Centre de recherches de l'Est sur les céréales et oléagineux. Agriculture et Agroalimentaire Canada. Ottawa.
- Boville, B.A., Kiehl, J.T., Rasch, P.J. et Bryan, F.O. 2001. Improvements to the NCAR CSM-1 for transient climate simulations. *J. of Climate*, **14**: 164-179
- Brassard, J.P. 2003. *Évaluation des impacts de la hausse de la concentration atmosphérique du CO₂ et des changements climatiques sur la production agricole du Québec*. Université de Montréal. Mémoire de maîtrise. 193 p.

- Brede, A.D., et. Duich. J.M 1984. Establishment characteristics of Kentucky bluegrass-perennial ryegrass turf mixtures as affected by seeding rate and ratio. *Agronomy Journal*, **76**:875–879.
- Brede, A.D., et. Duich, J.M 1986. Plant interaction among *Poa annua*, *Poa pratensis*, and *Lolium perenne* turfgrasses. *Agronomy Journal*, **78**:179–184.
- Brown, R.A., Rosenberg, Norman J. 1997. Sensitivity of crop yield and water use to change in a range of climatic factors and CO₂ concentrations: a simulation study applying EPIC to the central USA. *Agricultural and Forest Meteorology* **83**:171-203
- Brian, I., Bravdo, B., Bushkin-Harav, I., et Rawitz, E. 1981. Water consumption and growth rate of 11 turfgrasses as affected by mowing height, irrigation frequency and soil moisture. *Agron. J.*, **52** : 2004-2007.
- Cann, D.B., Lajoie, P. et Stobbe, P.C. 1948. *Études des sols des Comités de Shefford, Brome et Missiquoi dans la province de Québec*. Ottawa. Carte des sols des Îles de Montréal-Jesus-Bizard. 1952. Ottawa.
- Carrow, R.N. 1996. Summer decline of bentgrass greens. *Golf Course Manager*, **65**: 51-56
- Dessai, S. et Hulme, M. 2001. Climatic implications of revised IPCC scenarios, the Kyoto Protocol and quantifications of uncertainties. *Integrated Assessment*, **2**: 1959-1970.
- Desjardins, Y. et Dionne, J. 1997. Protection hivernale des verts de golf de pâturin annuel (*Poa annua* L.). Université Laval, Québec, Canada. *Rapport de Recherche de la FCRG (En ligne)*. Valable au site : <http://www.rcga.org/french/GreenSection/PDF/> (consulté le 2006-01-09).
- Dionne, J., Castonguay, Y., et Rochette, P. 2000. Tolérance du pâturin annuel (*Poa annua* L.) à des températures sous le point de congélation et aux protections

impermeables. *Rapport de Recherche de la FCRG (En ligne)*. Valable au site : [<http://www.rcga.org/french/GreenSection/PDF/>] (consulté le 2006-01-09).

- Dionne, J. 2001. Protection hivernale et tolérance au froid du pâturin annuel (*Poa annua* var. reptans). Université Laval, Québec. Thèse de Doctorat.
- Dionne, J., Castonguay, Y., Nadeau, P. et Desjardins, Y. 2001. Freezing Tolerance and Carbohydrate Changes during Cold Acclimation of Green-Type Annual Bluegrass (*Poa annua* L.) Ecotypes. *Crop Sci.* **41**: 443-451.
- Dionne, J., Castonguay, Y., Nadeau, P. et Desjardins, Y. 2001. Amino acid and protein changes during cold acclimation of green-type annual bluegrass (*Poa annua* L.) ecotypes. *Crop. Sci.* **41**: 1862-1870.
- Dionne, J., Castonguay, Y., et Rochette, P. 2004. Tolérance du pâturin annuel (*Poa annua* L.) à des températures sous le point de congélation et à des conditions d'anoxie. *Rapport de Recherche de la FCRG (En ligne)*. Valable au site : [<http://www.rcga.org/french/GreenSection/PDF/>] (consulté le 2006-01-09).
- Easterling, W.E, Chen, X, Hay, Brandle, Jr. et Zhang, H. 1996. Improving the validation of model simulated crop yield response to climate change: An Application to EPIC crop model". *Climate Research.* **6**, 263 – 273.
- Easterling ,W.E. , Hays, C.J. McKenney Easterling, M. et Brandle J.R. 1997. Modelling the effect of shelterbelts on maize productivity under climate change: An application of the EPIC model. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **61**: 163-176
- Easterling, W.E., Chetri, N. et Niu, X. 2003. Improving the realism of modeling agronomic adaptation to climate change: Simulating technological substitution. *Climatic Change* **60**: 149-173.

Environnement Canada. 1999. Canadian daily climate data temperature and precipitation. [CD-ROM database]. Environ. Can. Meteorol. Climate Products and Publ. Div., Downsview, ON. Canada.

ENVIRONNEMENT CANADA [<http://www.ec.gc.ca/climate/home-f.html>], (2006-02-19)

Flato, G.M., Boer, G.J., Lee, W.G., McFarlane, N.A., Ramsden, D., Reader, M.C., et Weaver, A.J., 2000. The canadian centre for climate modeling and analysis global coupled model and its climate. *Climate Dynamics*, **16**: 451-467.

Gagnon, S. 2004. Impacts potentiels d'une hausse des concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre sur le comportement hydrologique de trois bassins versants du Québec. *Mémoire de maîtrise*. Département de géographie. Faculté des arts et des sciences.

Gassman, P.W., Williams, J.R., Benson, V.W., Izaurrealde, R.C., Hauck, L.M., Jones, C.A., Atwood, J.D., Kiniry, J.R., et Flowers, J.D. 2005. Historical Development and Applications of the EPIC and APEX Models. *Working Paper 05-WP 397*

Gordon, Ch., Cooper, C., Senior, C.A., Banks, H., Gregory, J.M., Johns, T.C., Mitchell, J., Wood, R.A. 2000. The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley centre coupled model without flux adjustments *climate dynamics* **16**: 147-168

Huang, B. et Xu, Q. 2002. *Cooler soil protects creeping bentgrass*. USGA. (En ligne) Valable au site: [<http://www.gcsaa.org/gcm/2002/oct02/PDFs/10Cooler.pdf>] (consulté le 2006-01-20).

[IPCC] Intergovernmental panel on climate change. 1992. Climate change 1992: The supplementary report to the IPCC. Scientific assessment. Cambridge University Press. 116 p.

- [IPCC] Intergovernmental panel on climate Change. 2001. *Climate Change 2001: the scientific basis*. Working Group I. Valable au site: [http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/wg1/](consulté le 2006-01-20).
- Jordan, J.E., White, R.H., Vietor, D.M., Hale, T.C., Thomas, J.C. et Engelke, M.C. 2003. Effect of irrigation frequency on turf quality, shoot density, and root length density of five Bentgrass cultivars. *Crop Sci.*, **43**: 282-287.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Leetmaa, W., Reynolds, R., Jenne, R. et Joseph, D., 1996. *The NCER/NCAR 40-year reanalysis project*. Bulletin of the American Meteorological Society, **77**: 437 – 471.
- Kramer, P.J. 1983. Water stress research: progress and problems. Current topics in plant biochemistry and physiology. Univ. Missouri-Columbia, **2** : 129-144.
- Kuroyanagi, T., et Paulsen, G.M. 1988. Mitigation of high-temperature injury by roots and shoots during reproductive growth of wheat. *Plant Cell Environ.*, **11**: 517-523.
- Kuzyakov, Y. et al. 2001. Carbon partitioning and below ground translocation by *Lolium perenne*. *Soil Biol. Biochem.*, **33** : 61-74.
- Lajoie, P. et Baril, R. 1956. Les sols de ville de Montréal, de l'île Jésus et de l'île Bizard dans la province de Québec. Ministère de l'Agriculture de Québec. Ottawa.
- Lambert, S.J. et Boer, G.J. 2000. CMIP1 evaluation and intercomparison of coupled climate models. *Clim. Dyn.*, **17**: 83-106.

- Lamothe, A.M. et Périard, G. 1988. *Répercussion d'un changement climatique sur l'industrie du golf au Québec*. Rapport préparé pour Environnement Canada, 81p.
- Lamothe, A.M. et Périard, G. 1988. *Répercussion d'un changement climatique sur l'industrie du ski alpin au Québec*. Environnement Canada. SCC 8803. 185p.
- Lucas, L.T. 1995. Bentgrass summer decline. North Carolina turfgrass summary. 32-33.
- Lush, W.M. 1988. Biology of *Poa annua* in a temperate zone golf putting green (*Agrostis stolonifera/Poa annua*) I. The above-ground population. *Journal of Applied Ecology* **25**: 977-988.
- Madison, J.H. 1962. Mowing of turfgrass. II. Responses of three species of grass. *Agron. J.* **54**: 250-252.
- Madison, Jr. and Hagan, R.M. 1962. Extraction of soil moisture by 'Merion' bluegrass (*Poa pratensis* L. 'Merion') turf, as affected by irrigation frequency, mowing height and over cultural operations. *Agron. J.*, **54**: 157-160.
- Mather, J.R. 1974. *Climatology: Fundamentals and Applications*. MCGAOraw-Hill, Inc. 412 p.
- Mathieu, C. et Pieltain, F. 1998. *Analyse physique des sols. Méthodes choisies*. Lavoisier TEC et DOC. 262 p.
- McFarlane, N.A., Boer, G.J. Blanchet, J.-P. and Lazare, M. 1992: The canadian climate centre second-generation general circulation model and its equilibrium climate. *J. Climate*, **5**:1013-1044.
- Mearns, L.O., Easterling, W., Hays, C. et Marx, D. 2001. Comparison of agricultural impacts of climate change from high and low resolution climate change

scenarios: Part I. The uncertainty due to spatial scale. *Climatic Change* **51**: 131-172.

Mulvihill, D.A., et al., 2001. *Golf course development in residential communities*. Washington, D. C: ULI-the Urban Land Institute.

Negri D.N., Gollehon, N.R. et Aillery M.P. 2005. The effects of climatic variability on US irrigation adoption. *Climate Change*, **69** (2-3): 299-323.

Pope, V.D., Gallani, M.L., Rowntree, P.R. et Stratton, R.A. 2000. AMIP integration with HadCM2b et HadCM3. The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model - HadAM3. Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Meteorological Office, London Rd., Bracknell, Berks, UK
Valable au : [<http://www.metoffice.com/research/hadleycentre/models/pope00/index.html>] (vérifié le 15 janvier 2006).

Raymond, R., et all. 1976. *Pédologie du Comté de Portneuf*. Agriculture Québec. Bulletin technique, 18.

Reinstein, R.A. 2004. A Possible Way Forward on Climate Change. *Mitigation and adaptation strategies for global change*, **9** (3): 245-309.

Rosenberg, N.J., McKenney, M.S., Easterling, W.E. et Lemon, K.M. 1992. Validation of EPIC model simulations of crop responses to current climate and CO₂ conditions: comparisons with census, expert judgment and experimental plot data. *Agricultural and Forest Meteorology*, **59**: 35-51.

Rochette, P. and Dubé, P.-A. 1993a. Zonage de risque agroclimatique durant la saison froide au Québec méridional: I. Froid hivernal. *Climatol. Bull.* **27**: 45-62.

- Rochette, P. et Dubé, P.-A. 1993b. Zonage de risque agroclimatique durant la saison froide au Québec méridional: II. Endurcissement. *Climatol. Bull.* **27**: 96-116.
- Roloff, G., De Jong, R. et Nolin, M.C. 1998a. "Crop yield, soil temperature and sensitivity of EPIC under central-eastern canadian conditions." *Can. J. Plant Sci.* **78**(3): 431-39.
- Roloff, G., de Jong, R. et Nolin, M.C. 1998b. "EPIC estimates of soil water, nitrogen and carbon under semiarid temperate conditions." *Can. J. Plant Sci.* **78**(3): 551-62.
- Ruddiman, W. F. 2003. The antropogenic greenhouse era began thousands of years ago. *Climatic Change*, **61**: 261-293.
- Salaiz, T.A., Horst, G.L. et Shearman, R. C. 1995. Mowing height and vertical mowing frequency effects on putting green quality. *Crop Sci.*, **35**: 1422-1425.
- Saxton, K.E., Rawls, W.J., Romberger, J.S. et Papendick, R.I. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* **50** (4): 1031-1036.
- Scott, D., Wall, G. et McBoyle, G. 2005. Climate change and tourism and recreation in North America: Exploring regional risks and opportunities. In: *Tourism, Recreation and Climate Change*. London: Channelview Press. 115-129.
- Singh, B., El Maayar, M., André, P., Thouez, J.-P., Bryant, C. et Provançal, D. 1996. Influence d'un changement climatique dû à une hausse de gaz à effet de serre sur l'agriculture au Québec. *Atmosphère-Océan*, **34**: 379-399.
- Singh, B., El Maayar, M., André, P., Bryant, C. et Thouez, J.-P. 1998a. Impacts of a GHG-induced climate change on crop yields: effects of acceleration in maturation, moisture stress and optimal temperature. *Climatic Change*, **38**: 51-86.

- Singh, B., Boivin, J., Kirkpatrick, G. et Hum, B. 1995 Automatic irrigation scheduling system (AISSUM): Principles and applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1: 43-56
- Singh, B., Bryant, C., Thouez, J.-P., André, P., Savoie, M., Tapes, V., Granjon, D., Pécheux, I. et Davey, N. 2006. Impact des changements climatiques sur le ski et le golf au Québec. Rapport final du projet: A696.
- Tompkins, D.K., Ross, J.B., et Moroz D.L. 1997. Physiologie des dommages causés par le froid : hydratation des couronnes du pâturin annuel (*Poa annua* L.). *Rapport de Recherche de la FCRG* (En ligne). Valable au : [[http://www.rcga.org/french/ Green Section/PDF/](http://www.rcga.org/french/GreenSection/PDF/)] (vérifié le 09 janvier 2006).
- Tompkins, D.K., Ross, J.B., et Moroz D.L. 2000. Contrôle des dommages hivernaux causés par la glace sur le pâturin annuel et l'agrostide stolonifère. *Rapport de Recherche de la FCRG* (En ligne). Valable au : [[http://www.rcga.org/french/ Green Section/PDF/](http://www.rcga.org/french/GreenSection/PDF/)](vérifié le 09 janvier 2006).
- Tompkins, D.K., Ross, J.B., et Moroz D.L. 2000. Dehardening of annual bluegrass and creeping bentgrass during late winter and early spring. *Agron. J.*, 92: 5-9.
- Tompkins, D.K., Ross, J.B., et Moroz D.L. 2004. Effects of ice cover on Annual Bluegrass and Creeping bentgrass putting greens. *Crop. Sci.*, 44: 2175-2179.
- Wang, Z. et Huang, B. 2004. Physiological recovery of Kentucky Bluegrass from simultaneous drought and heat stress. *Crop Science*, 44: 1729- 1736.
- Vargas, J.M. et Turgeon, A.J. 2004. *Poa annua: Physiology, Culture, and Control of Annual Bluegrass*. John Wiley et Sons, Inc. 165 p.

- Warwick, S.I. 1979. The biology of Canadian weeds. 37. *Poa annua* L. Can. Jour. Pl. Sci. 59: 1053-1066. [Reprinted 1984. Pages 55- 68. In The biology of Canadian weeds, contributions 33-61. Edited by G.A. Mulligan. Agriculture Canada Publication 1765. 415 pp.]
- Webster, M., Forest, C., Reilly, J., Babiker, M., Kicklighter, D., Mayer, M., Prinn, R., Sarofim, M., Sokolov, A., Stone, P. et Wang, C. 2003. Uncertainty analysis of climate change and policy response. *Climatic Cange*, 61: 295-320.
- Wilby, R.L. and Dawson, Ch. W. R.L., Dawson, C.W. et Barrow, E.M. 2002. SDSM – a decision support tool for the assessment of regional climate impacts. *Enviromental Modelling et Software*, 17: 147-159.
- Wilby, R.L. et Dawson, C.W. 2004. Statistical Downscaling Model SDSM Version 3.1. User Manual. (En ligne). Valable au : [<http://www-staff.lboro.ac.uk/~cocwd/SDSM/ManualSDSM.pdf>](vérifié le 09 janvier 2006).

ANNEXE A. VALIDATION DU MODELE EPIC

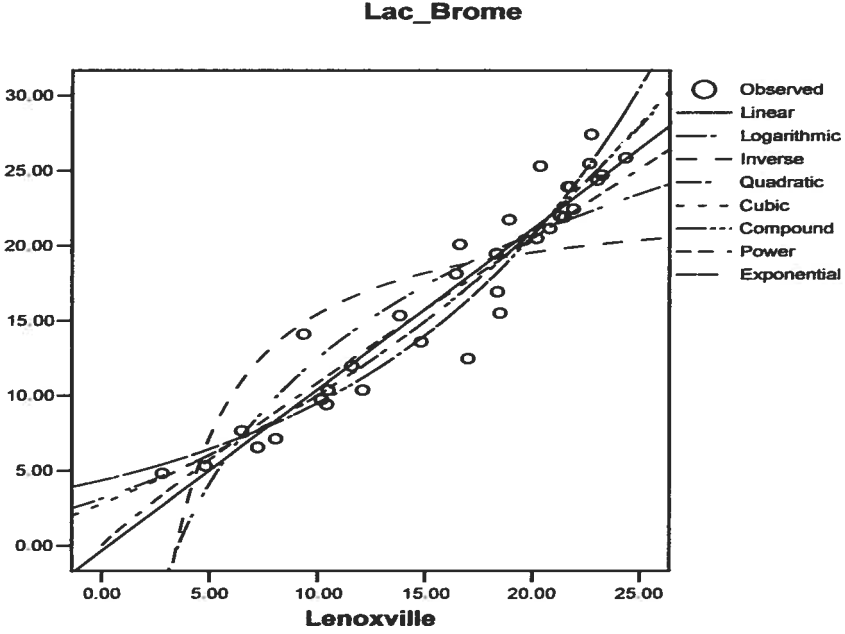


Figure A1. Radiation solaire: résultats des régressions Lennoxville – indépendante et Lac Brome - dépendant

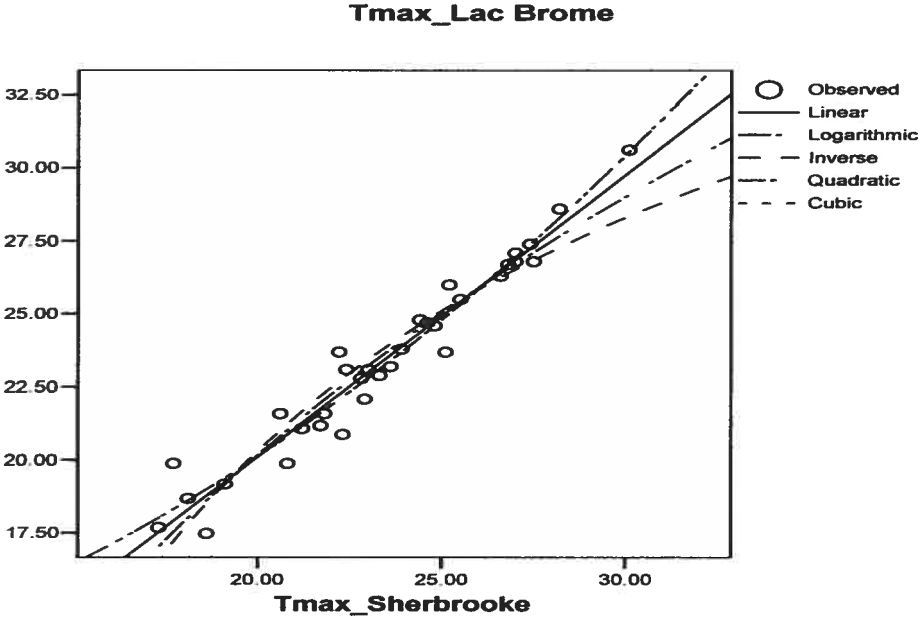


Figure A2. Température maximale: résultats des régressions Sherbrooke - indépendant et Lac Brome - dépendant

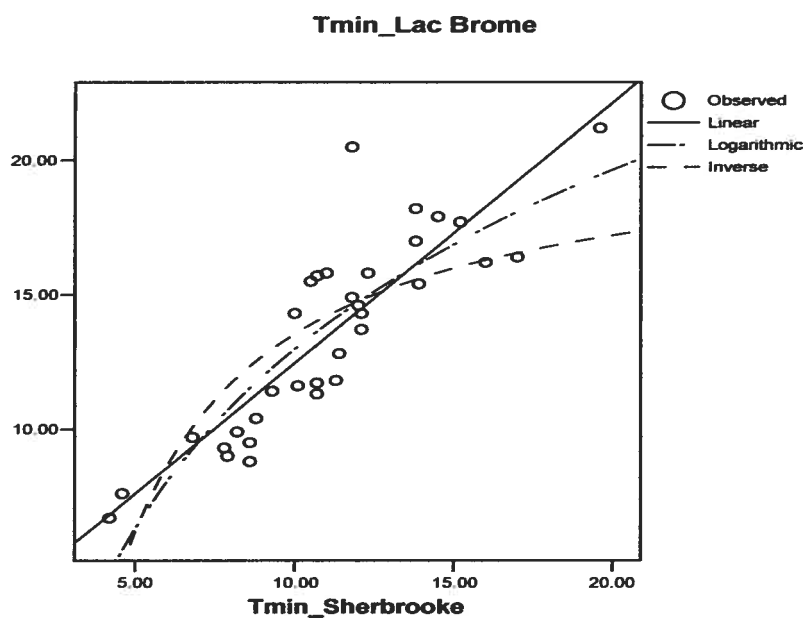


Figure A3. Température minimale: résultats des régressions Sherbrooke - indépendant et Lac Brome - dépendant

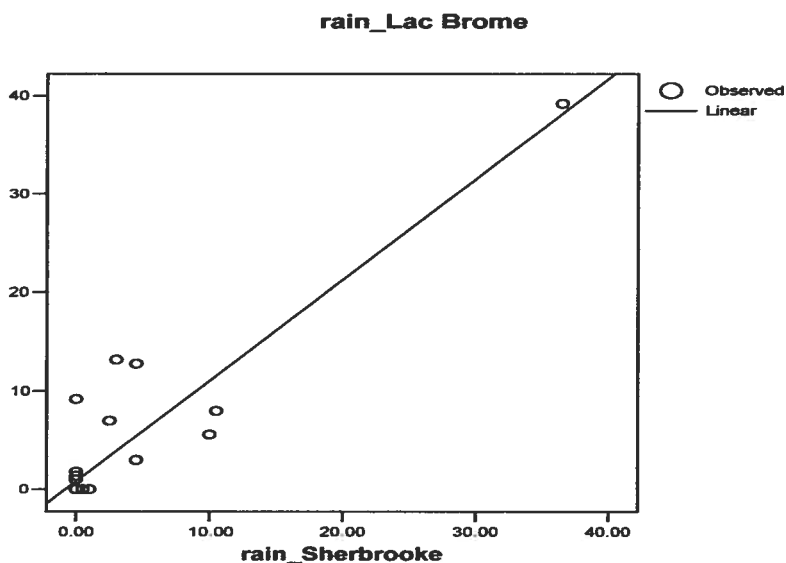


Figure A 4. Les précipitations: résultats de la régression linéaire Sherbrooke - indépendant et Lac Brome - dépendant

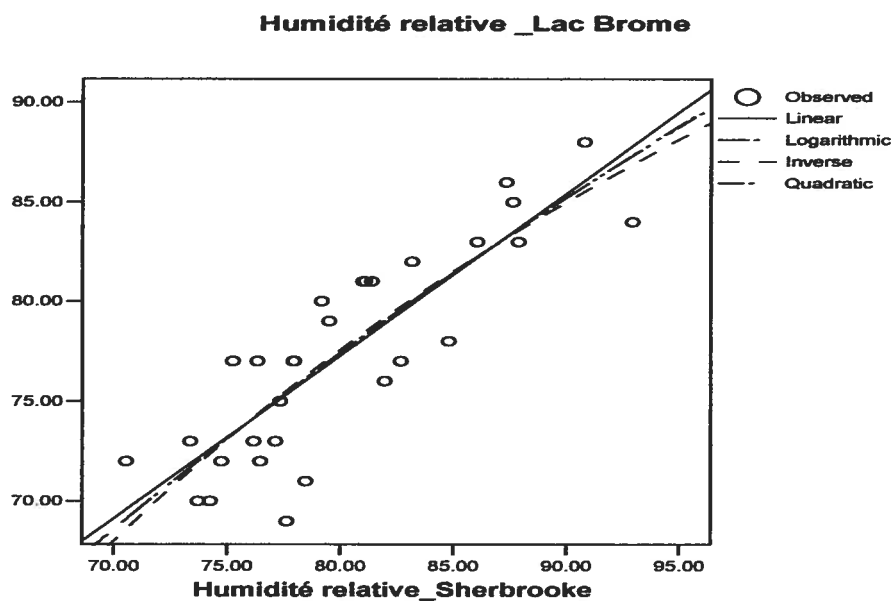


Figure A5. Humidité relative: résultats des régressions Sherbrooke – indépendant et Lac Brome - dépendant

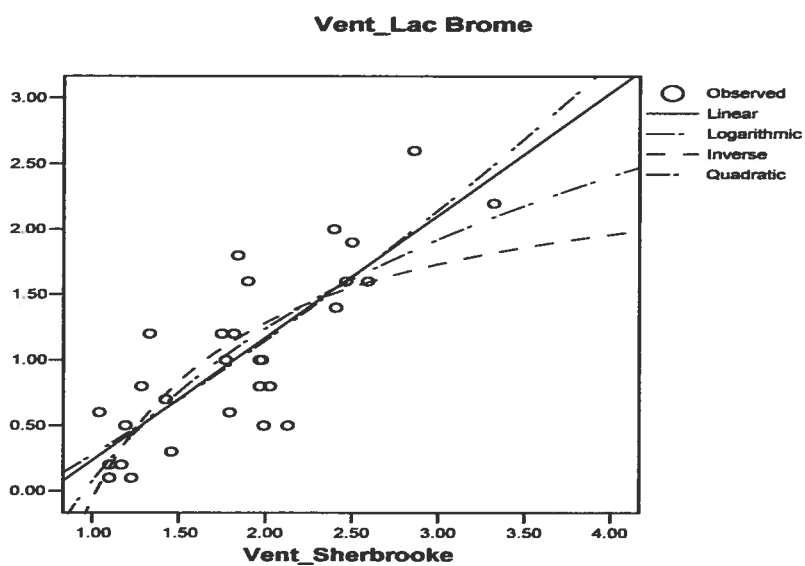
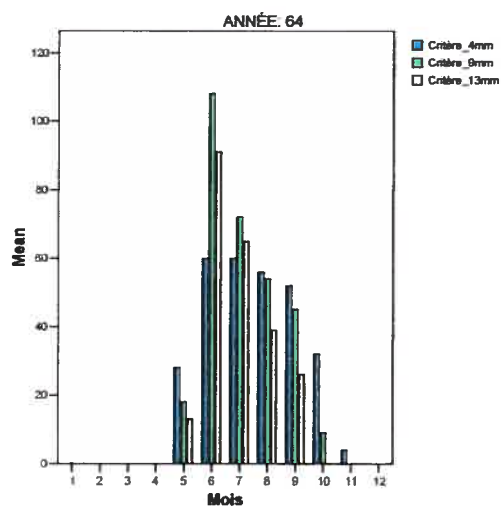
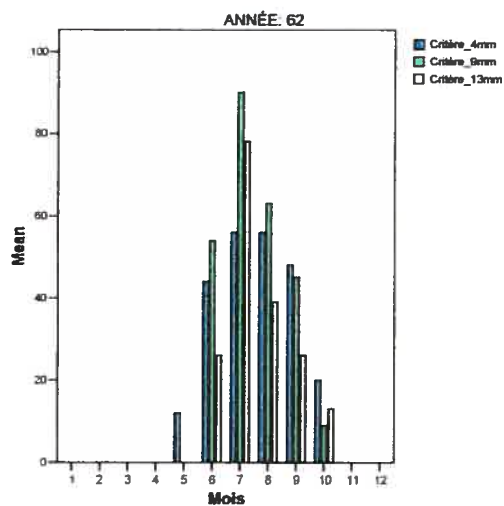
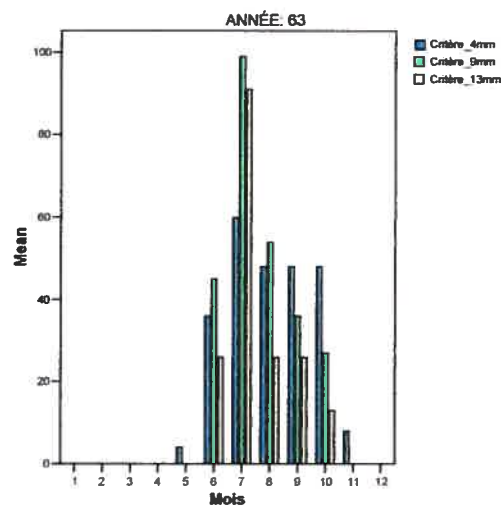
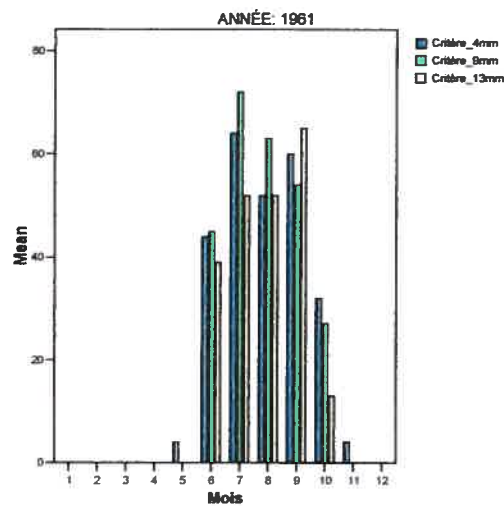


Figure A6. Vitesse du vent: résultats des régressions Sherbrooke – indépendant et Lac Brome - dépendant

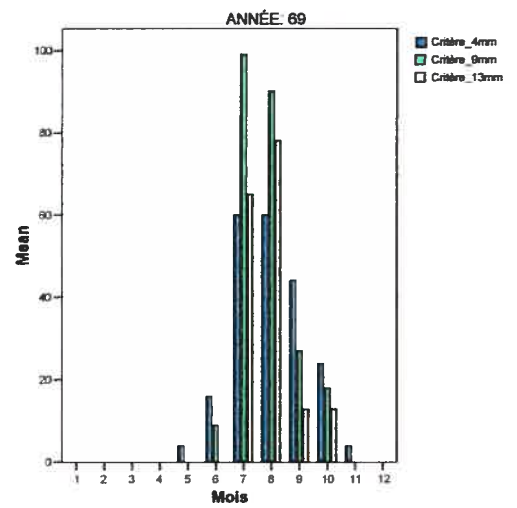
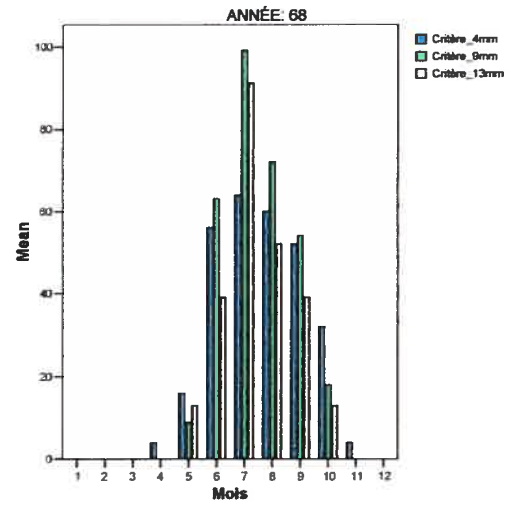
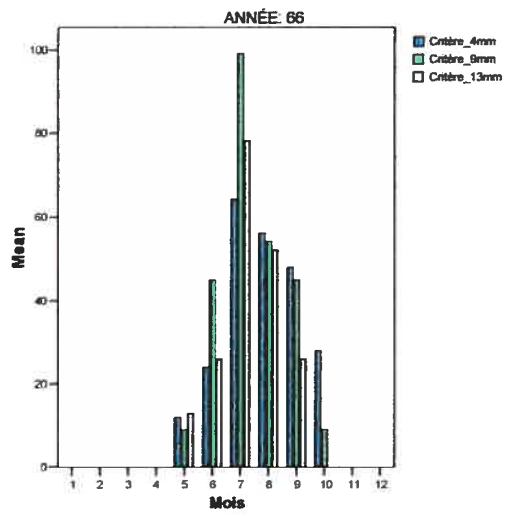
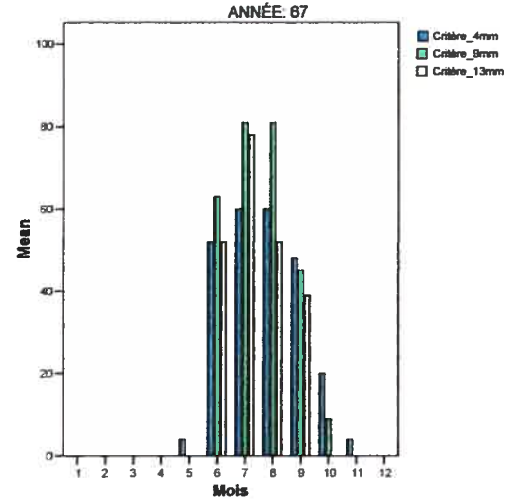
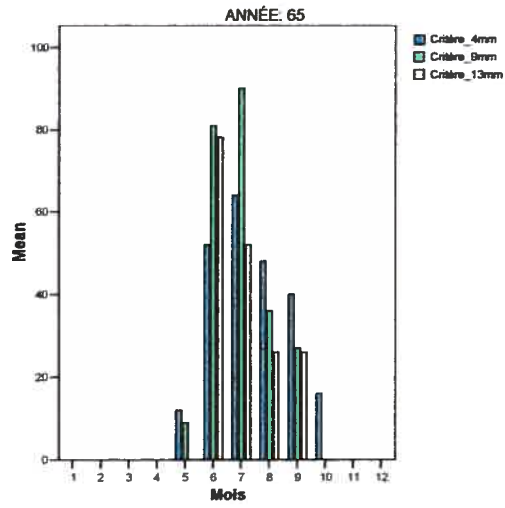
Tableau AI Les valeurs d'indice d'humidité du sol au Lac Brome (*en centibar*) à quatre profondeurs (0, 15, 30 et 50cm), établi par la station Davis pendant la période 21 juillet – 24 août 2004

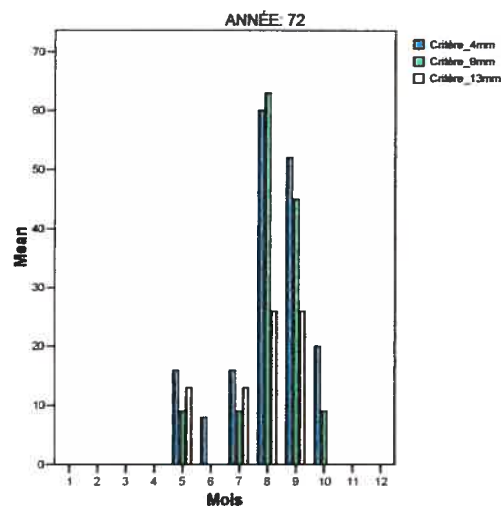
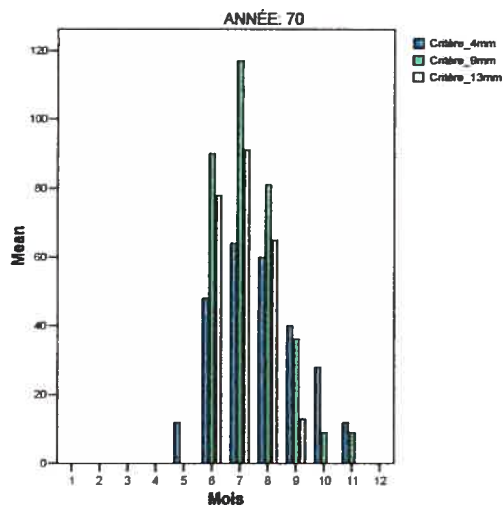
Mois	Jour	L'indice d'humidité à profondeur de			
		0 cm	15 cm	30 cm	50 cm
7	21	5,8	0,6	0	0
7	22	7,9	3,2	0	0
7	23	3	0,3	0	0
7	24	2,8	0,4	0	0
7	25	3	0	0	0
7	26	4	0	0	0
7	27	5	0	0	0
7	28	5	0	0	0
7	29	6,2	0,8	0	0
7	30	9	4,2	0	0
7	31	4,3	1,8	0	0
8	1	3,5	0,3	0	0
8	2	3,1	0	0	0
8	3	3,5	0	0	0
8	4	3,4	0	0	0
8	5	5,7	0,8	0	0
8	6	7,4	2,3	0	0
8	7	7,7	3,3	0	0
8	8	3,9	2,6	0	0
8	9	3,6	2,4	0	0
8	10	3,7	1,6	0,2	0
8	11	3,1	2,6	0	0
8	12	3,4	0,5	0	0
8	13	4	0,4	0	0
8	14	3,3	4,1	0	0
8	15	2,6	2,8	0	0
8	16	2,5	0,9	0	0
8	17	2,7	0,1	0,4	0
8	18	3	0,05	0	0
8	19	3	0,5	0	0
8	20	2,9	1,8	0	0
8	21	3	0,3	0,2	0
8	22	2,8	0,8	0,2	0
8	23	3	0,6	0,75	0
8	24	3	0,2	0,8	0

ANNEXE B: SIMULATIONS DE L'IRRIGATION POUR LES ESPÈCES DE GRAMINÉES DE LA SAISON FROIDE DANS LA RÉGION DE MONTRÉAL POUR LA PÉRIODE 1961-1990 (DONNÉES OBSERVÉES DE LA STATION MONTRÉAL DORVAL)

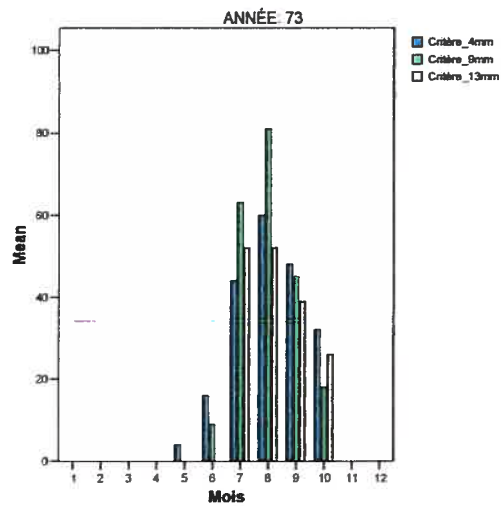
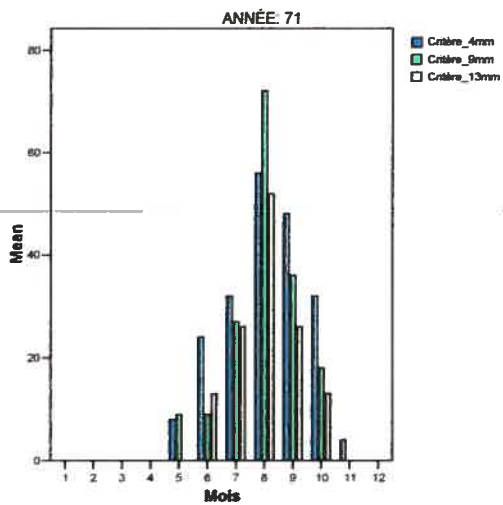


ANNEXE B suite

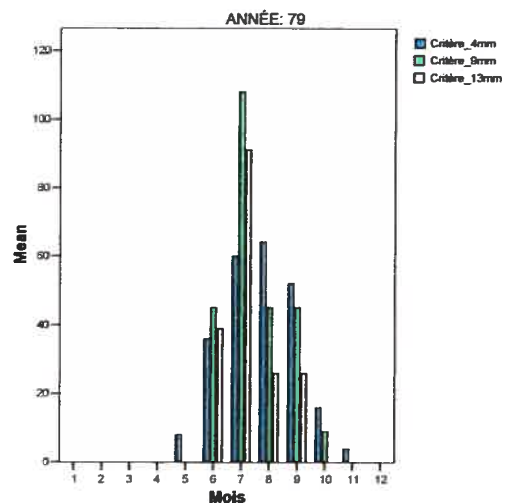
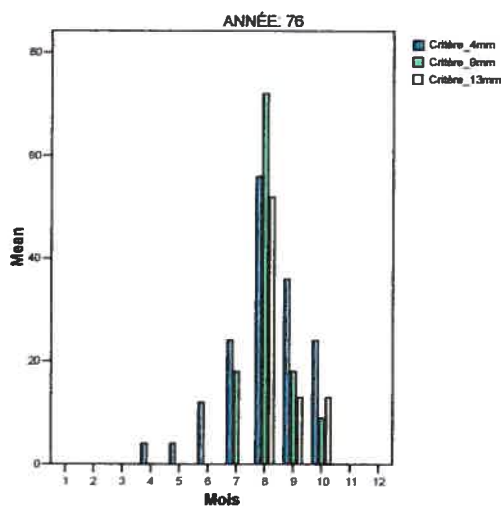
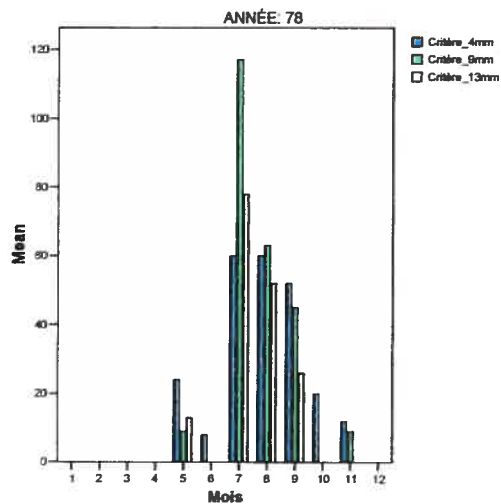
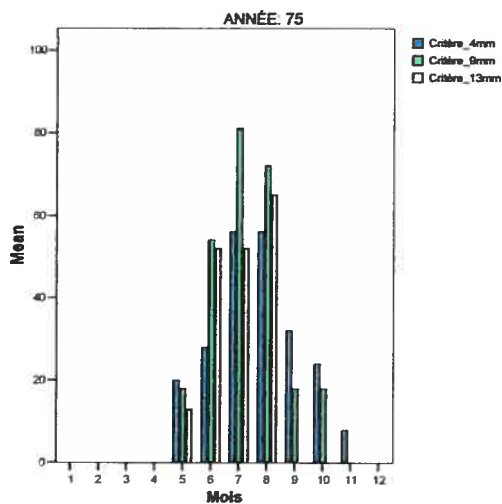
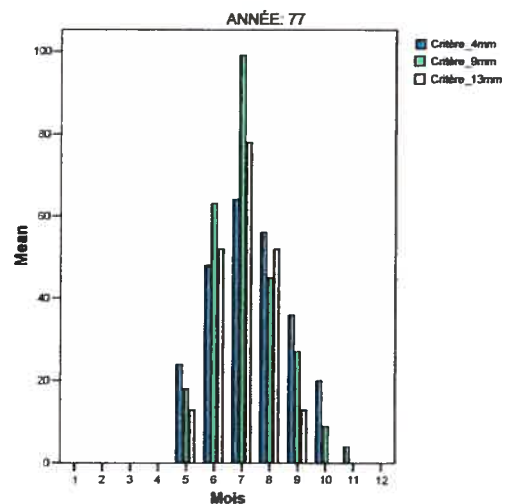
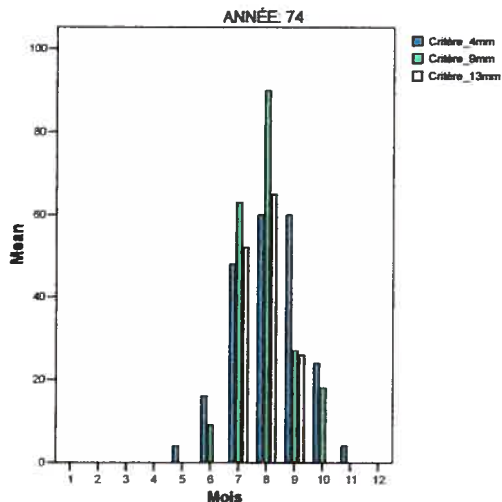




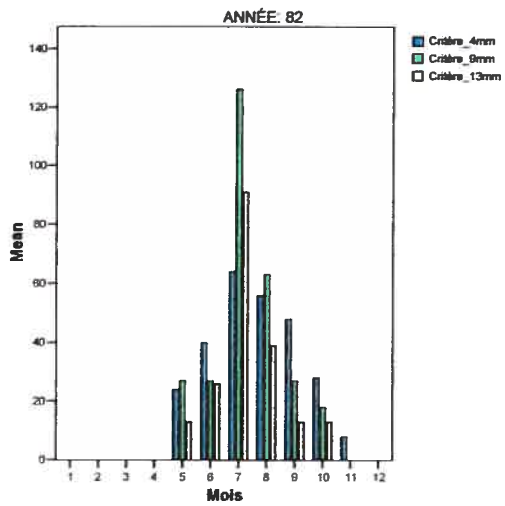
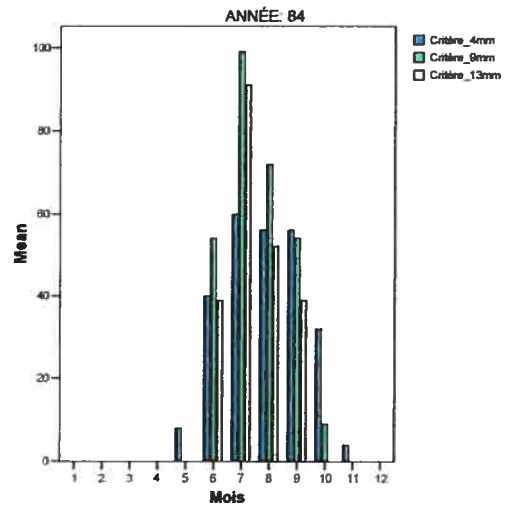
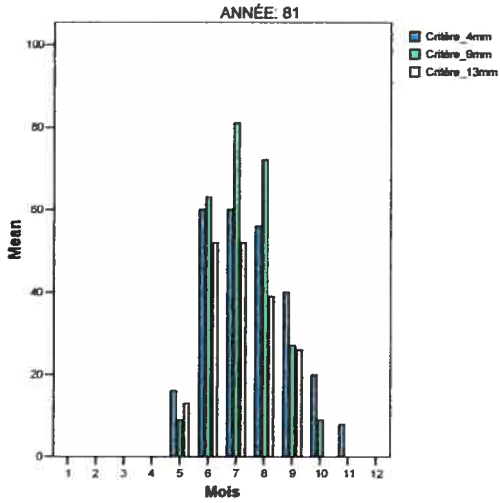
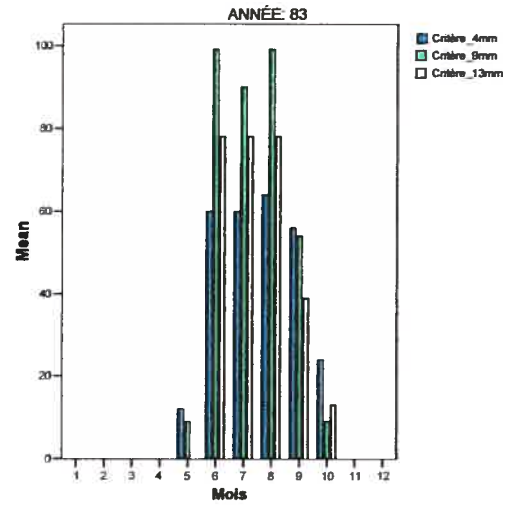
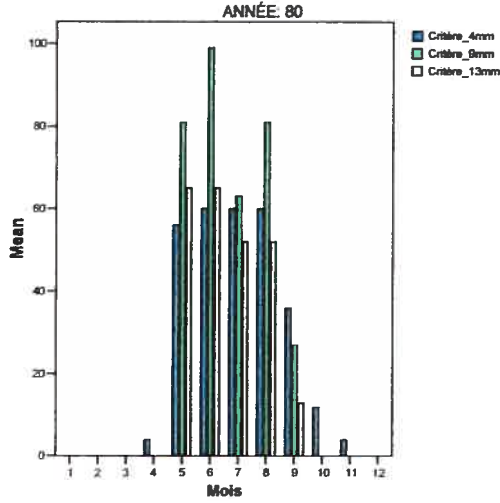
ANNEXE B suite

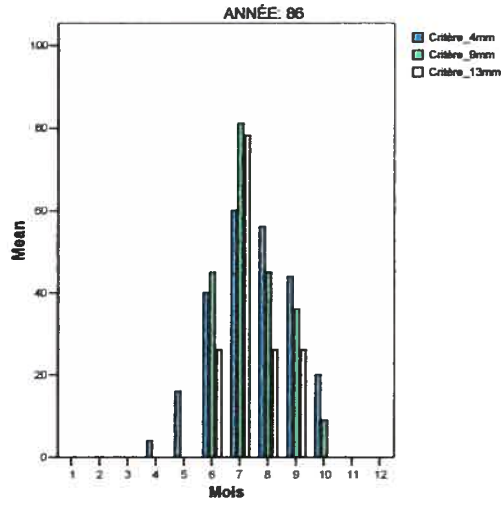
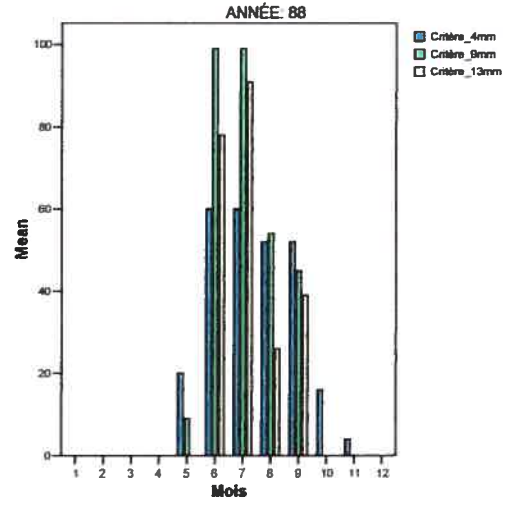
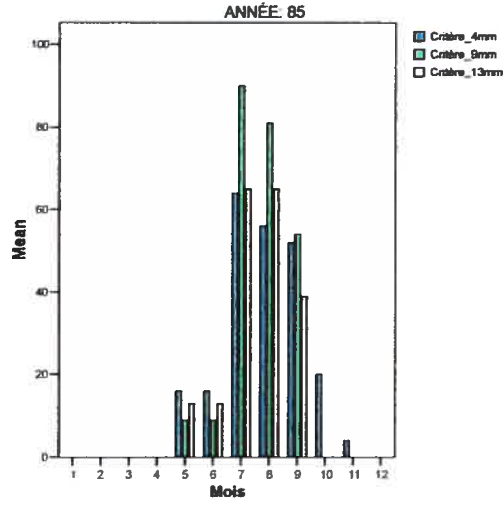


ANNEXE B suite

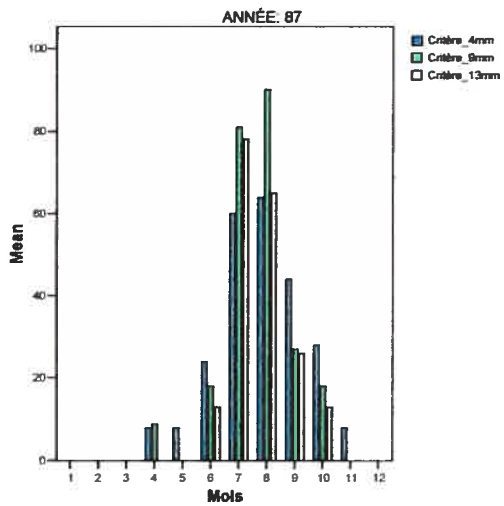
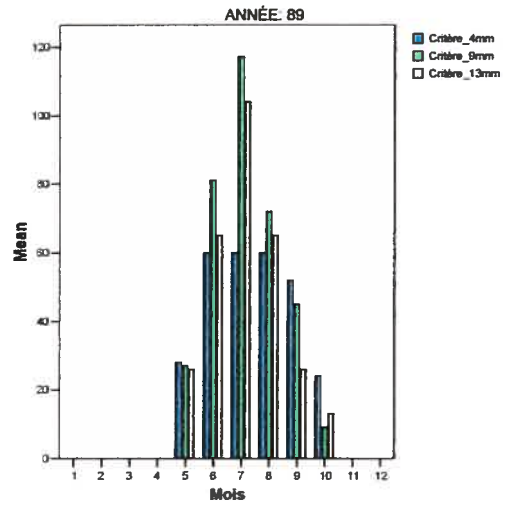


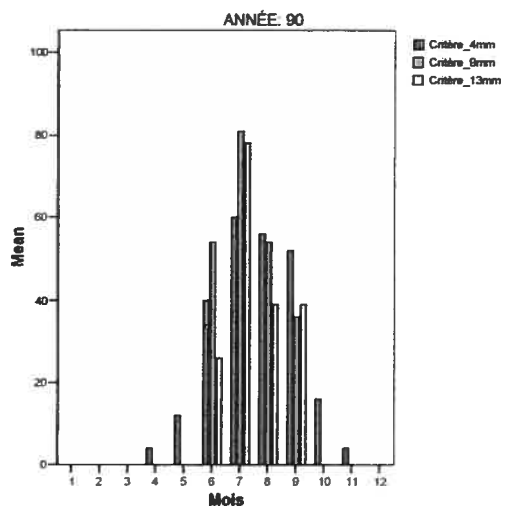
ANNEXE B suite





ANNEXE B suite





ANNEXE C : RÉSULTATS DES RÉGRESSIONS POUR LA RÉGION DE MONTRÉAL

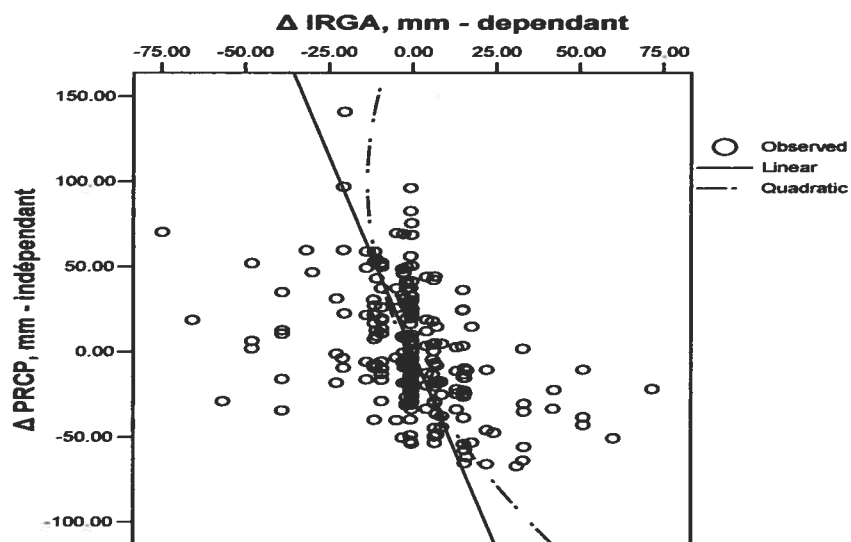


Figure C 1. Régressions du ΔIRGA (critère de 9mm) et du ΔPRCP , région de Montréal, 1961-1990

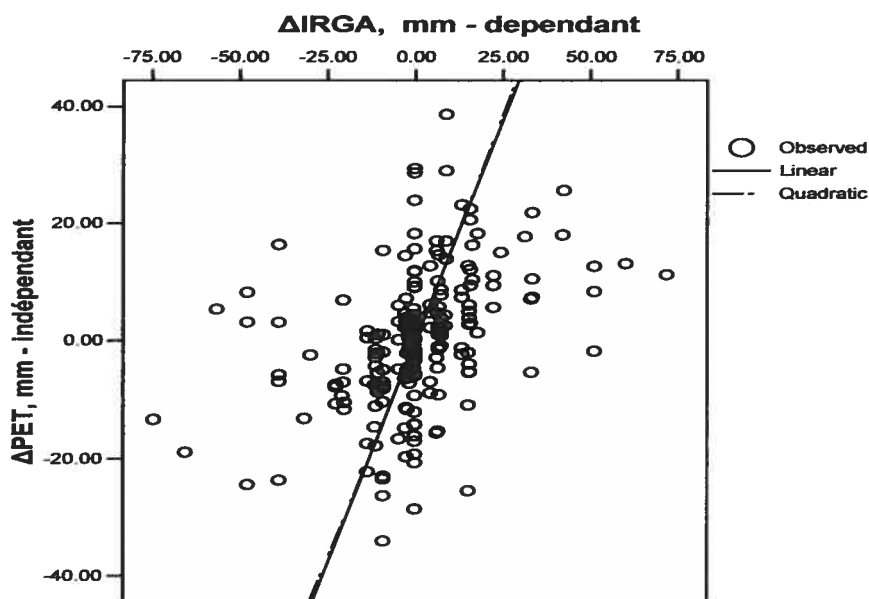
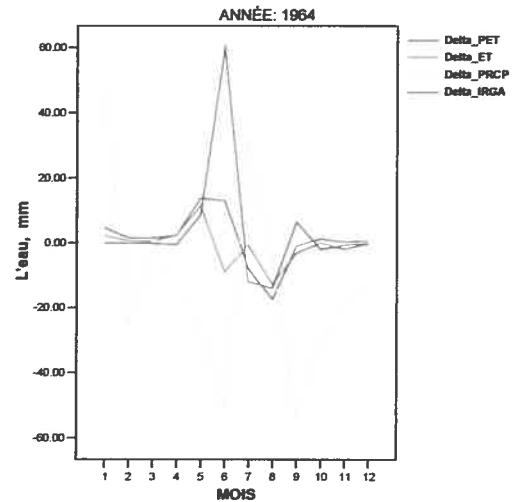
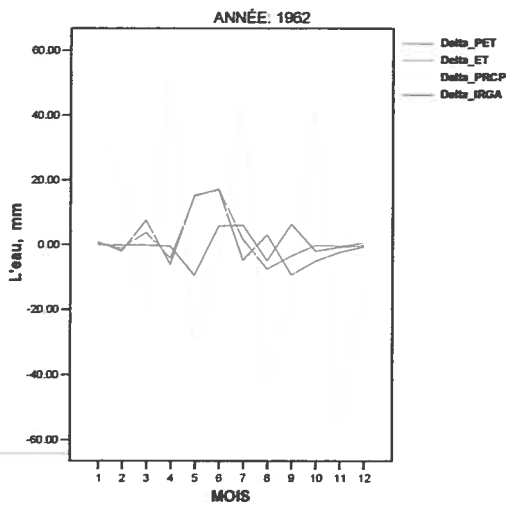
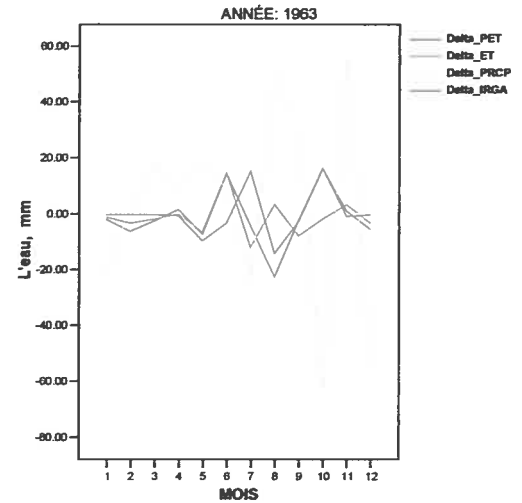
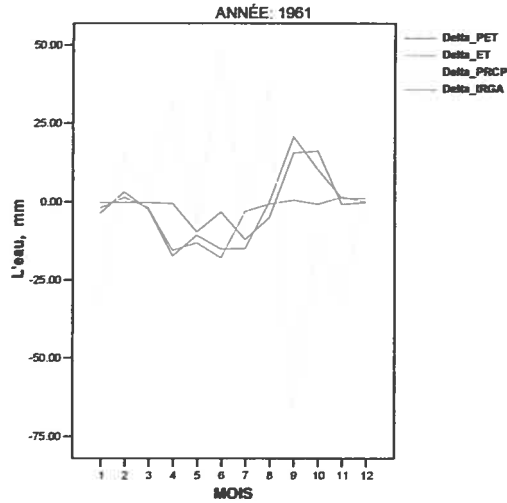
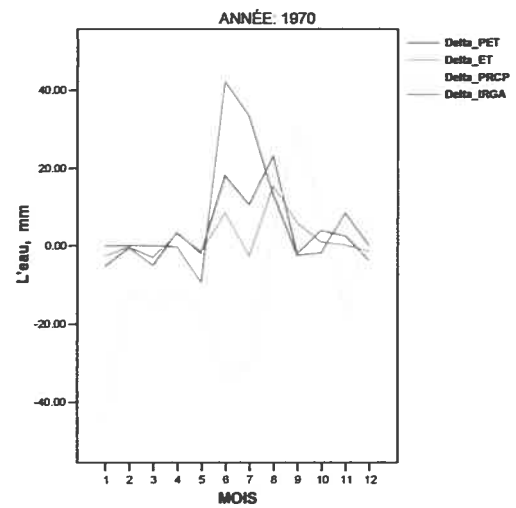
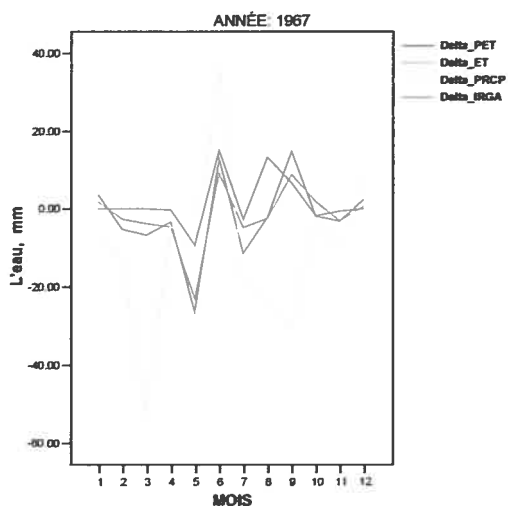
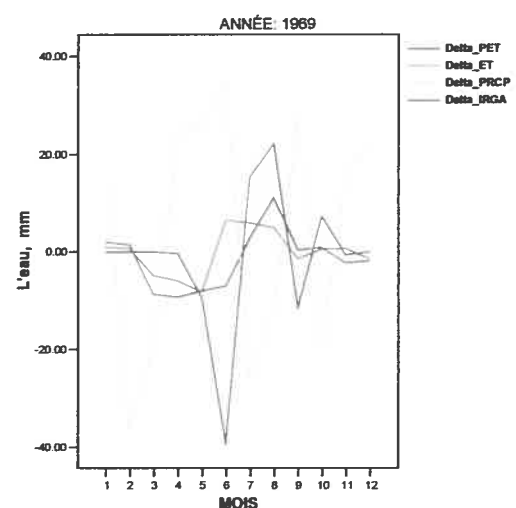
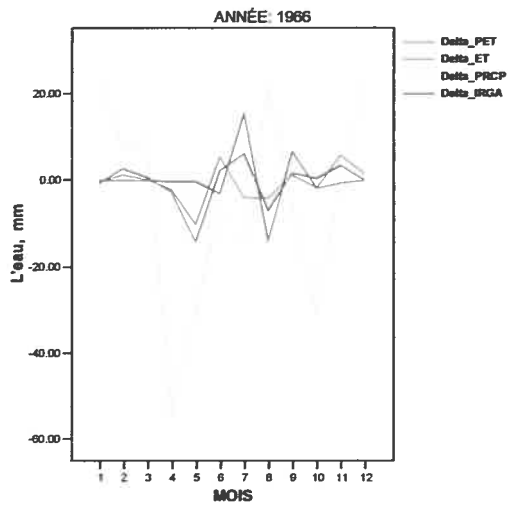
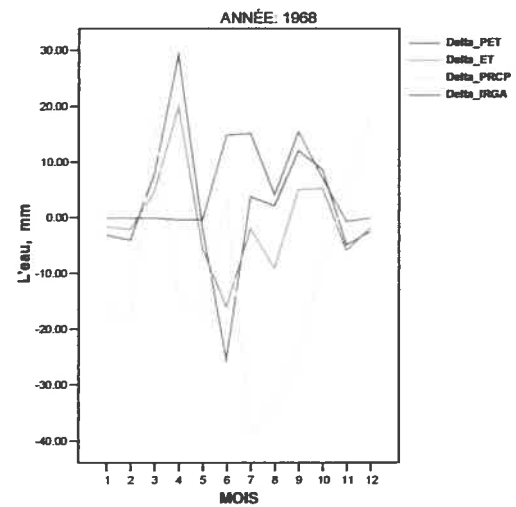
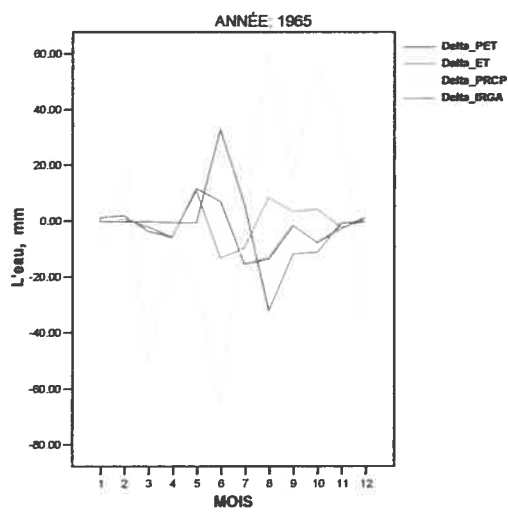


Figure C 2. Régressions du ΔIRGA (critère de 9mm) et du ΔPET région de Montréal, 1961-1990

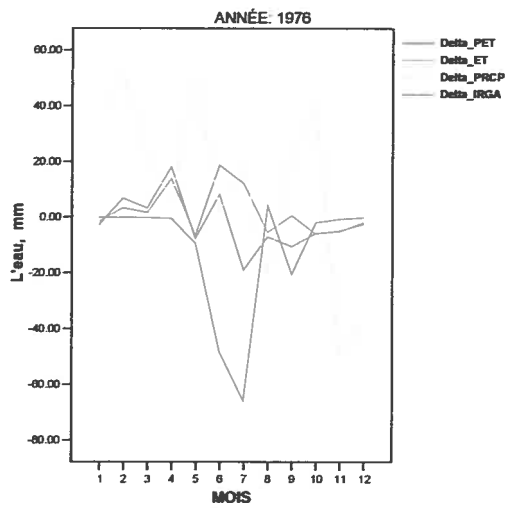
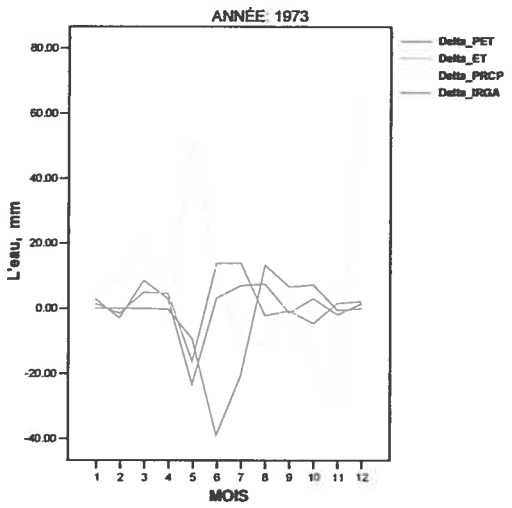
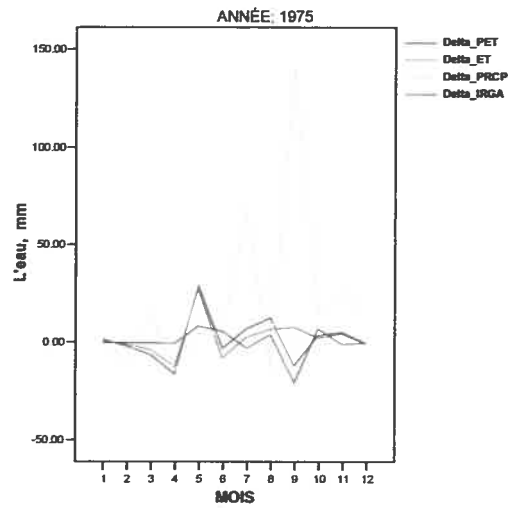
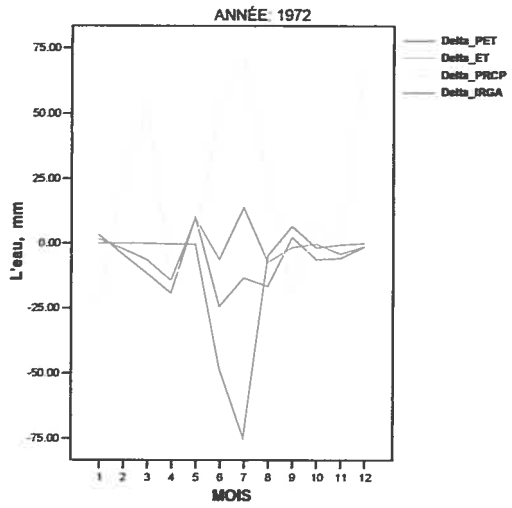
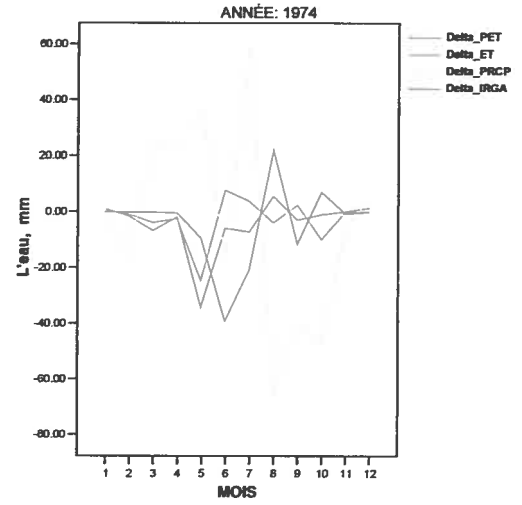
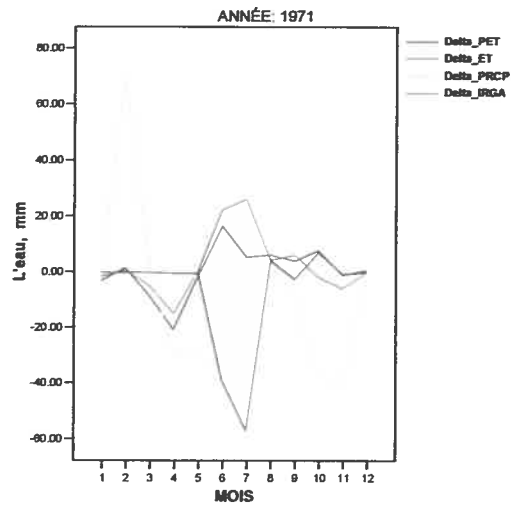
ANNEXE D : LES ECARTS MENSUELS (LE RAPPORT ENTRE LES SOMMES MENSUELLES ET LES VALEURS MOYENS MENSUELLES) DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (PET), DE L'EVAPOTRANSPIRATION (ET), DES PRECIPITATIONS (PRCP) ET DE L'IRRIGATION (IRGA)(CRITERE DE 9MM) DANS LA REGION DE MONTRÉAL, PERIODE 1961-1990



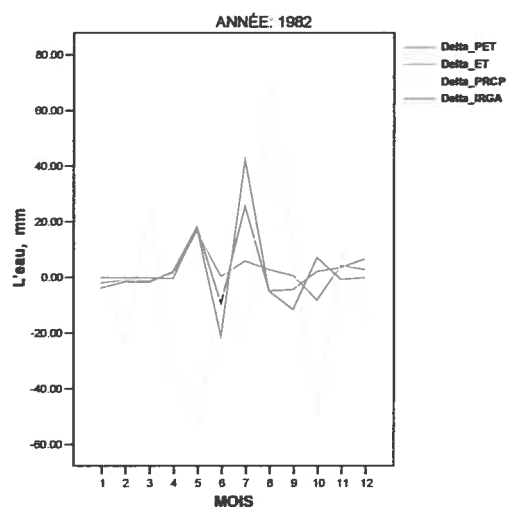
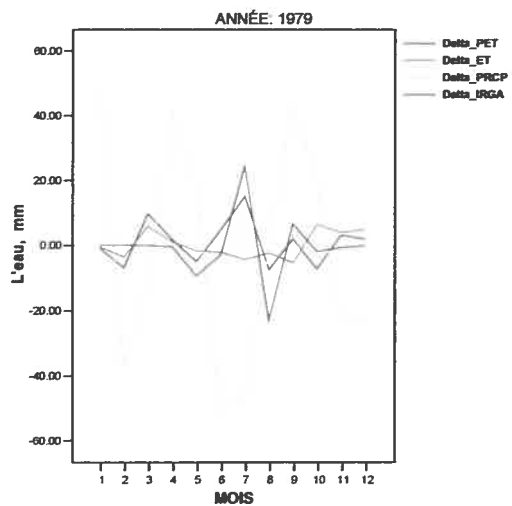
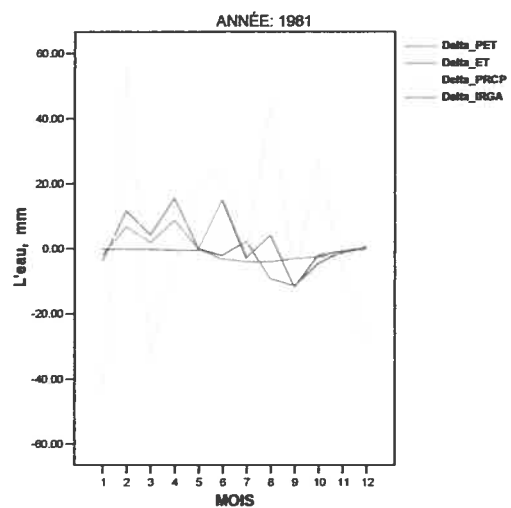
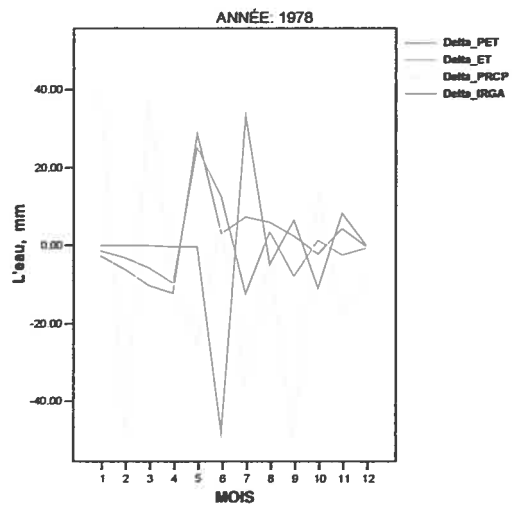
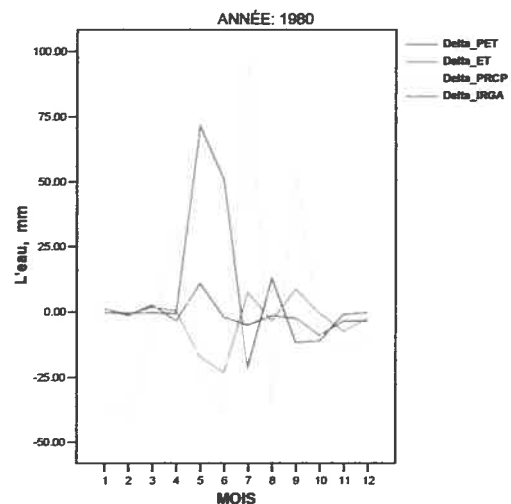
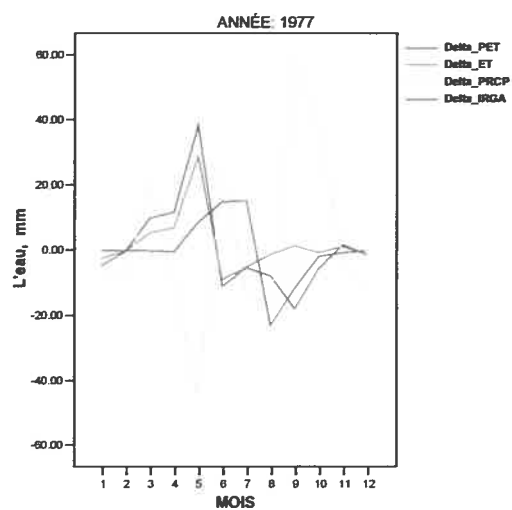
ANNEXE D, suite



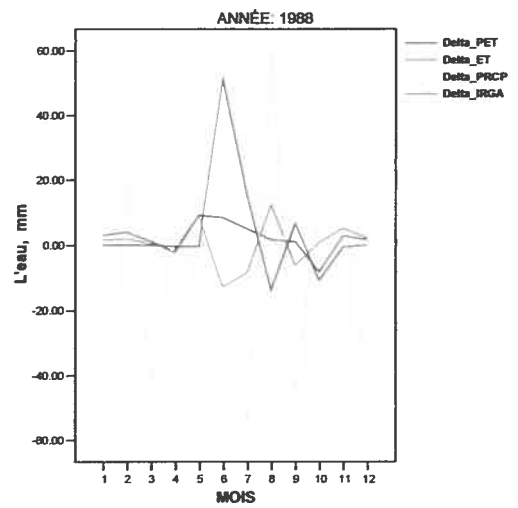
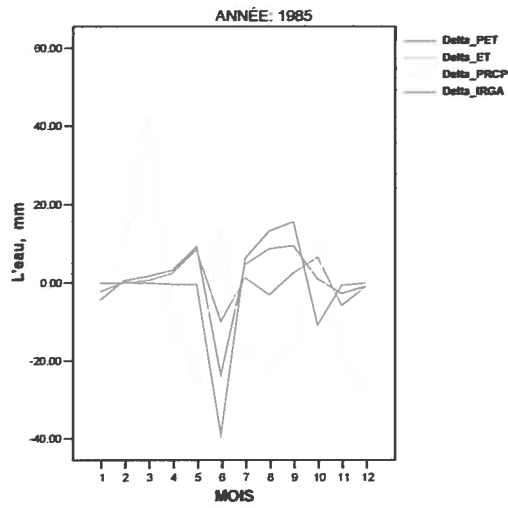
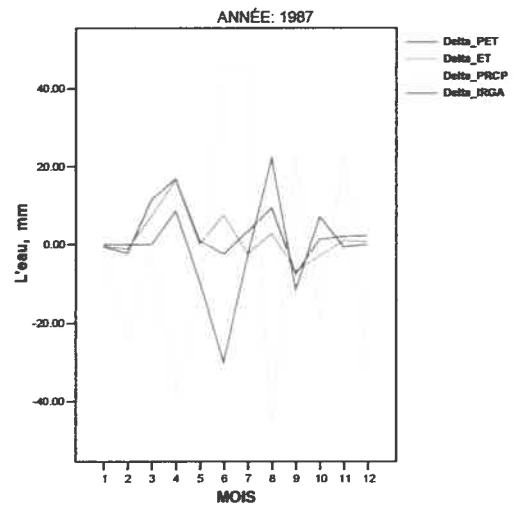
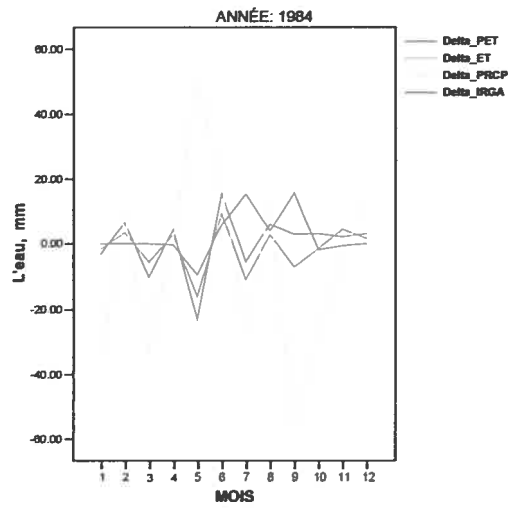
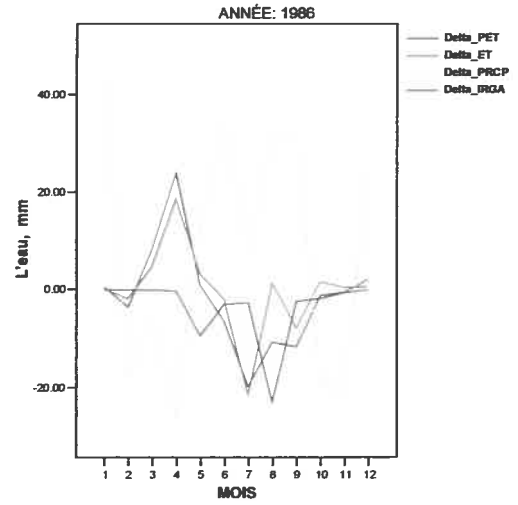
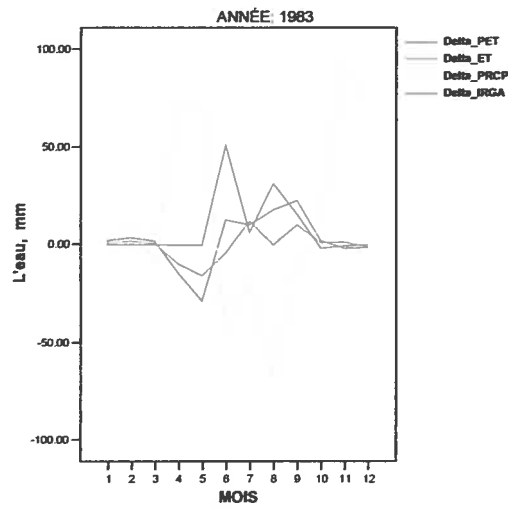
ANNEXE D, suite



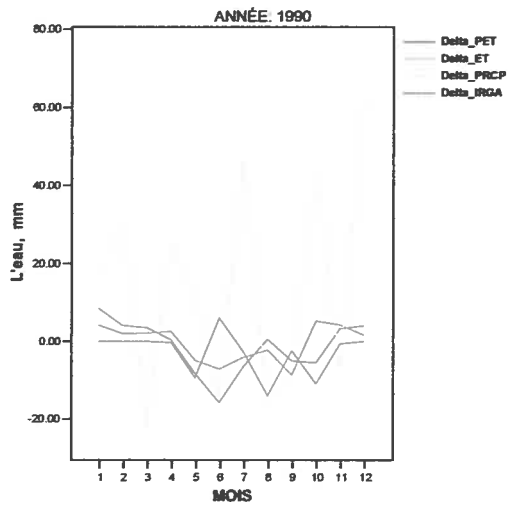
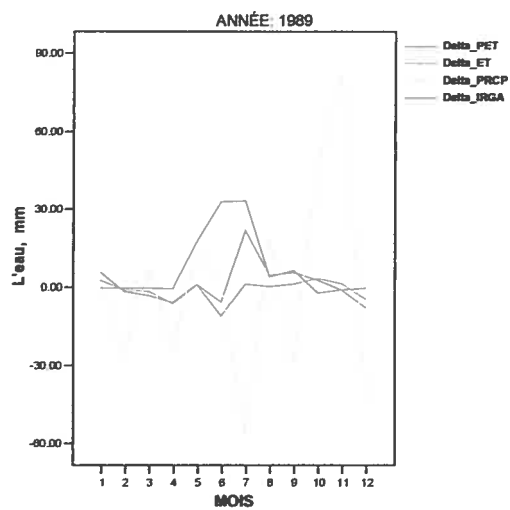
ANNEXE D, suite



ANNEXE D, suite

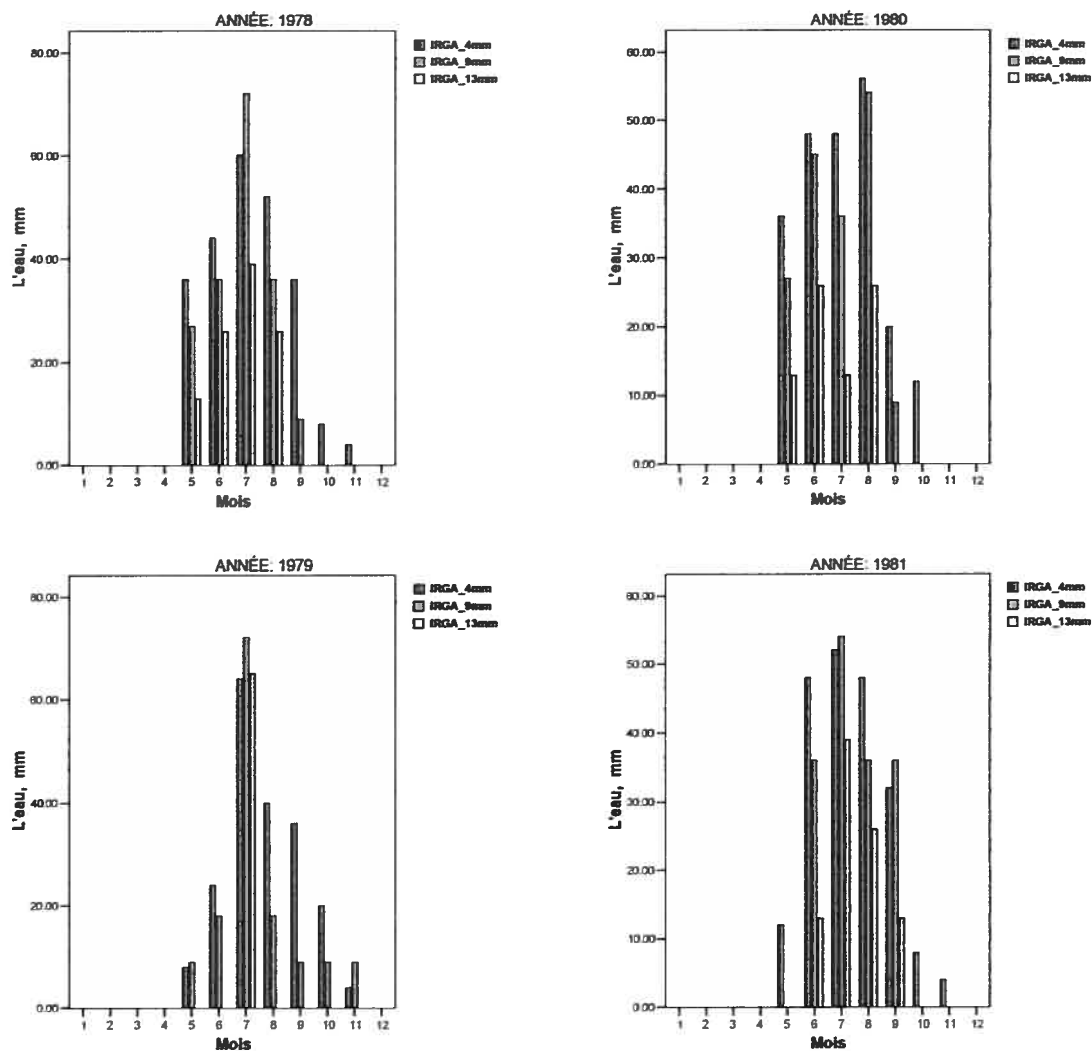


ANNEXE D, suite

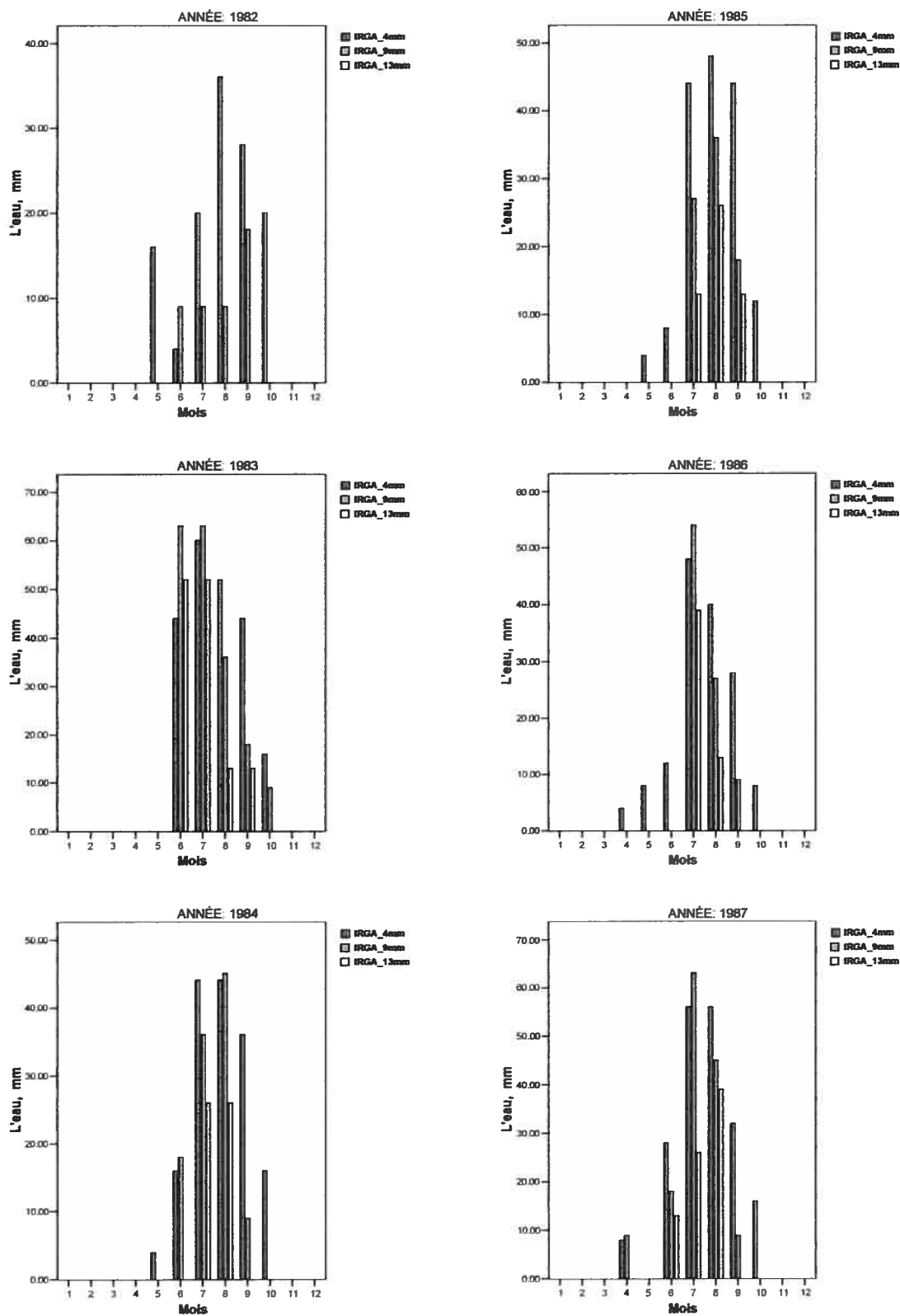


ANNEXE E : SIMULATIONS ANNUELLES D'IRRIGATION POUR LES ESPÈCES DE GAZON DANS LA RÉGION DES CANTONES DE L'EST (LES CRITÈRES DE 4, 9 ET 13MM), PÉRIODE 1978-1990

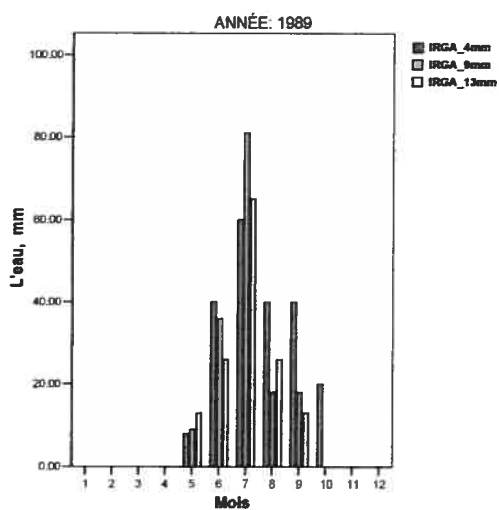
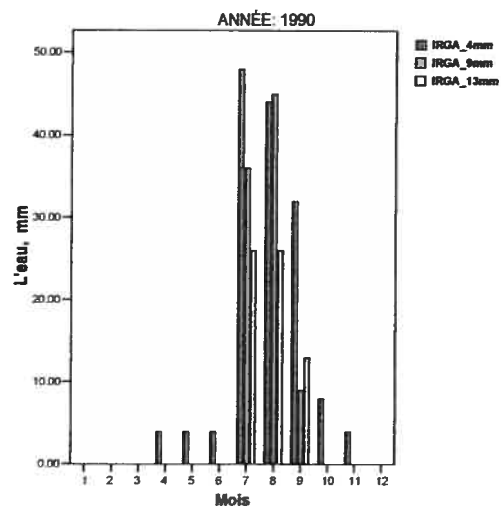
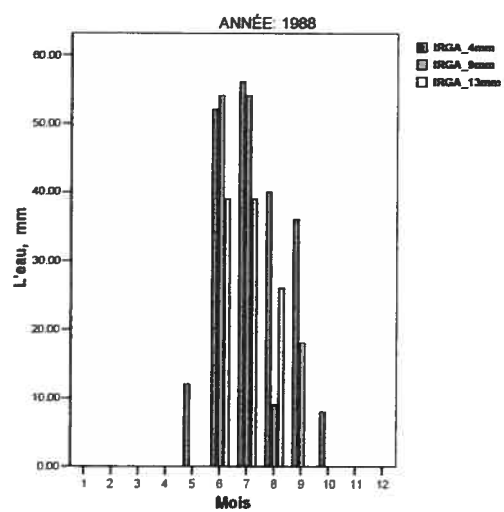
(DONNÉES OBSERVÉES)



ANNEXE E , suite



ANNEXE E, suite



ANNEXE F : RESULTATS DES REGRESSIONS POUR LA REGION DES CANTONS DE L'EST

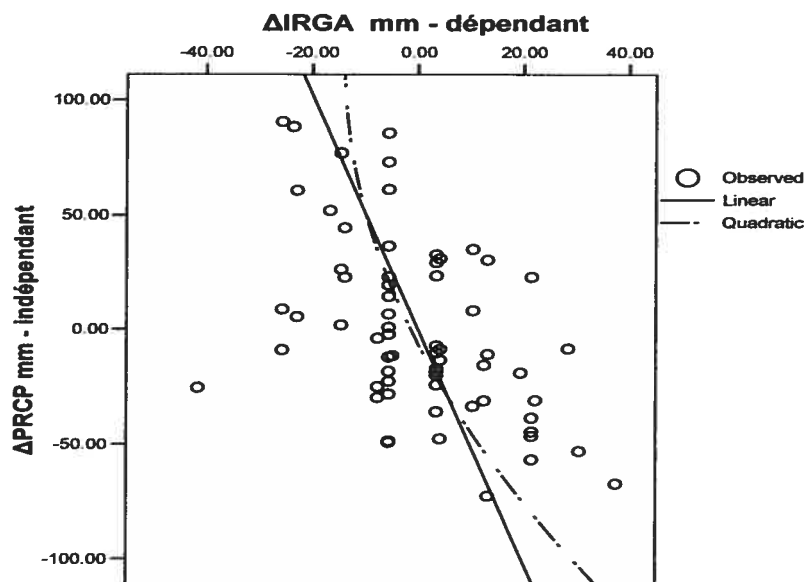


Figure F.1. Régressions du ΔIRGA (*critère de 9mm*) et du ΔPRCP , région des Cantons de l'Est, 1978-1990

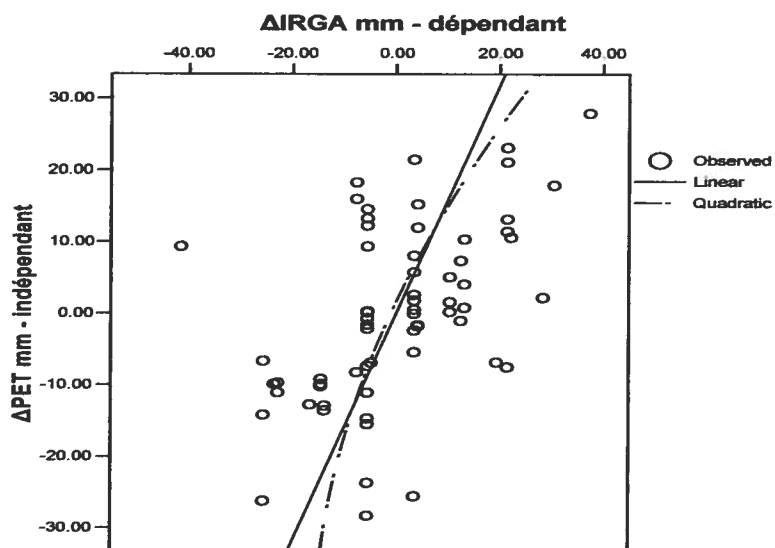
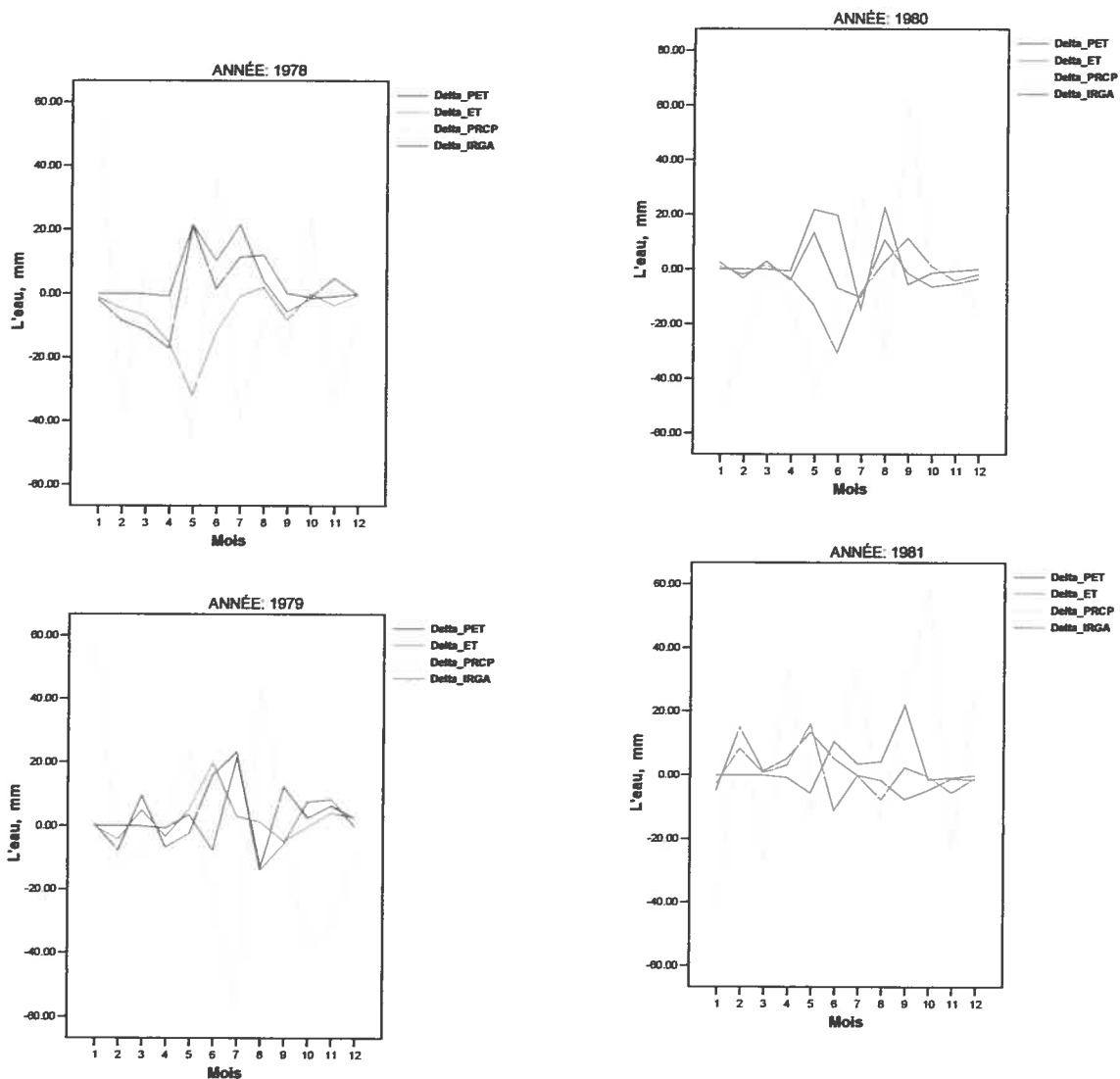
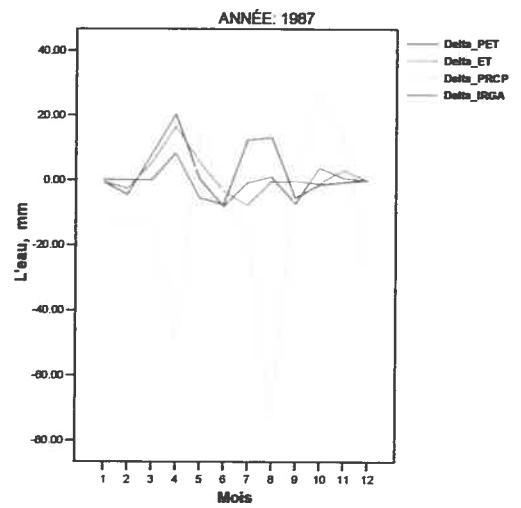
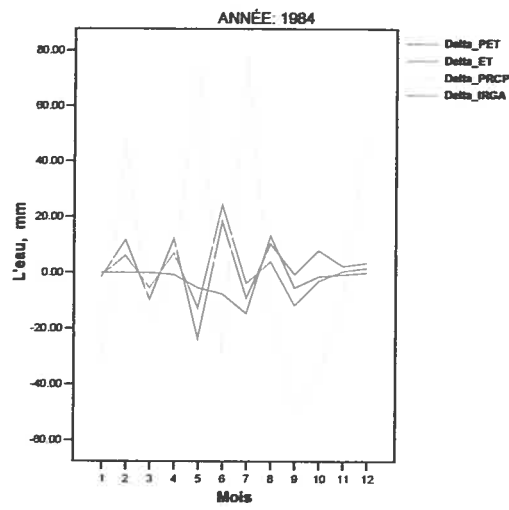
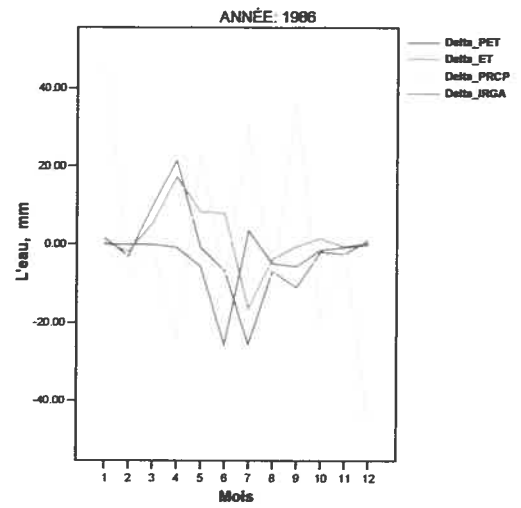
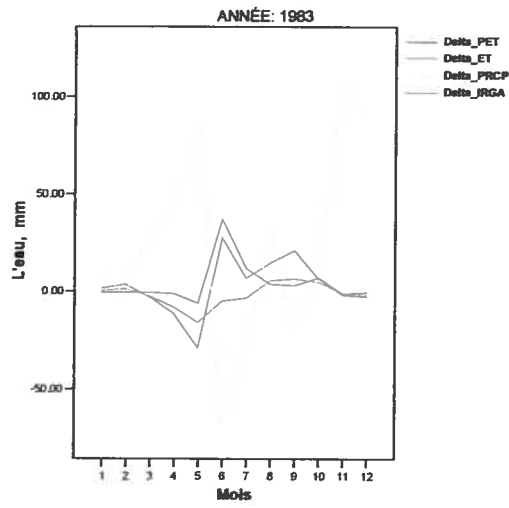
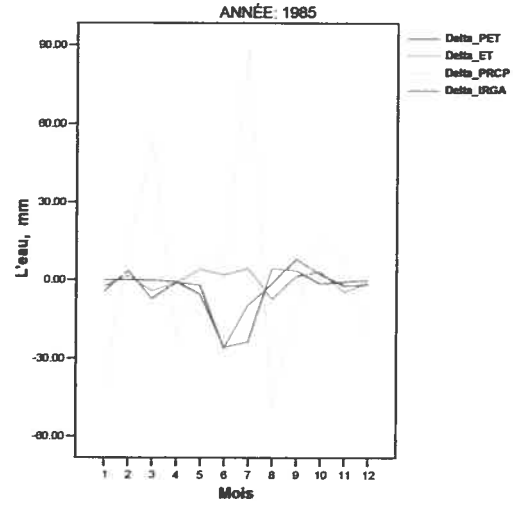
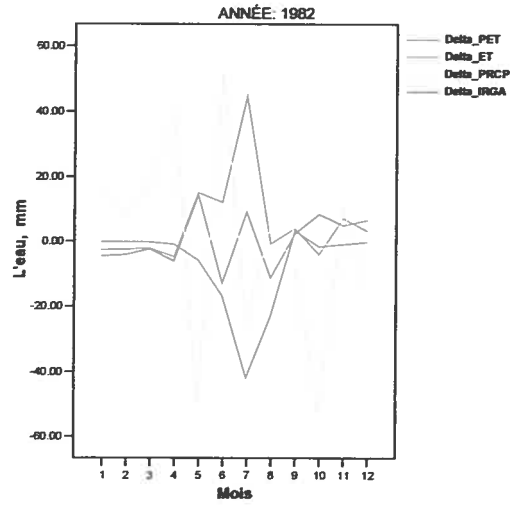


Figure F.2. Régressions du ΔIRGA (*critère de 9mm*) et du ΔPET , région des Cantons de l'Est, 1978-1990

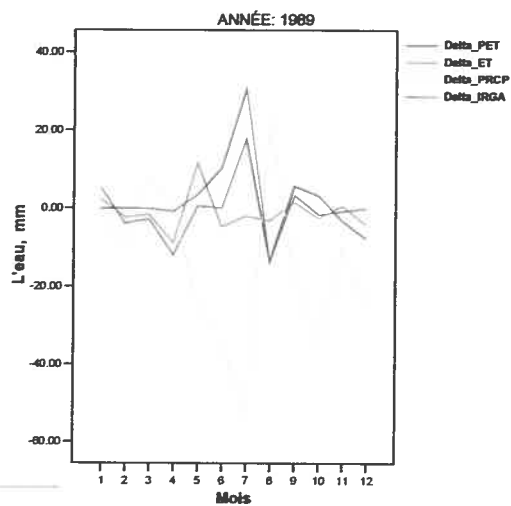
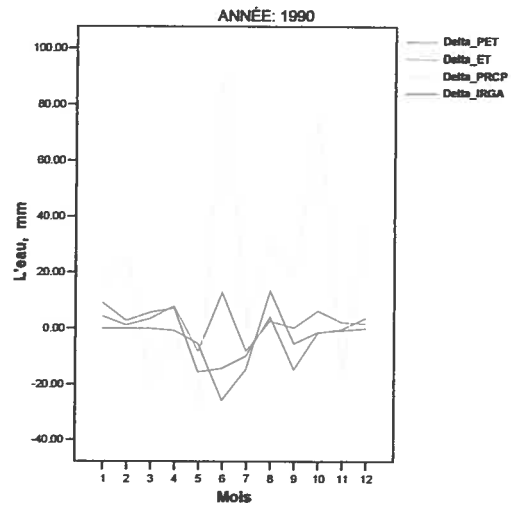
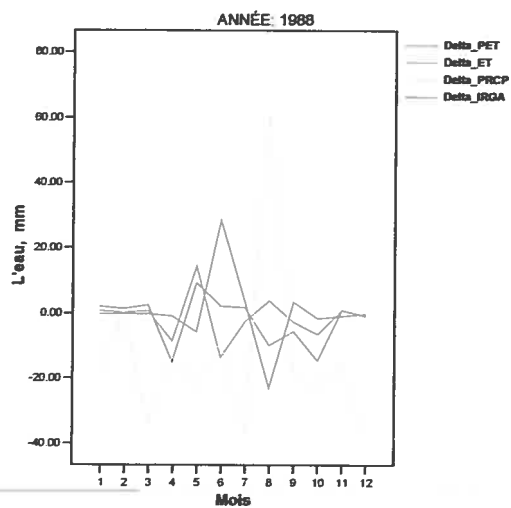
ANNEXE G : LES ECARTS MENSUELS (LE RAPPORT ENTRE LES SOMMES MENSUELLES ET LES VALEURS MOYENS MENSUELLES) DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (PET), DE L'EVAPOTRANSPIRATION (ET), DES PRECIPITATIONS (PRCP) ET DE L'IRRIGATION (IRGA) (CRITERE DE 9MM) DANS LA REGION DES CANTONS DE L'EST, PERIODE 1978-1990



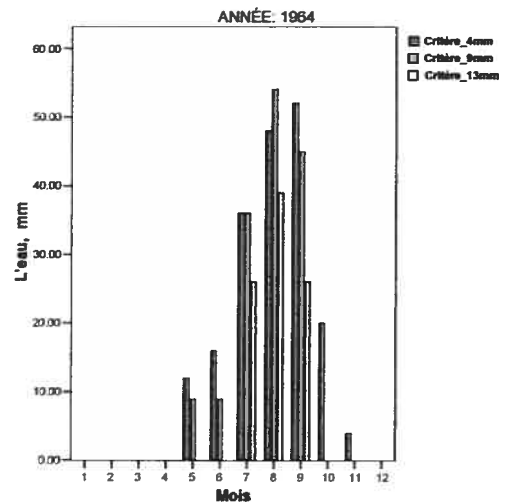
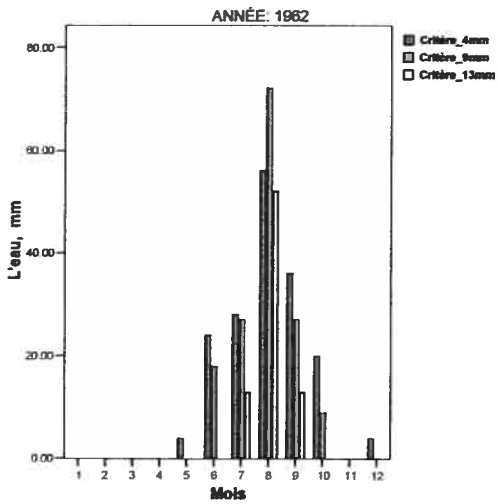
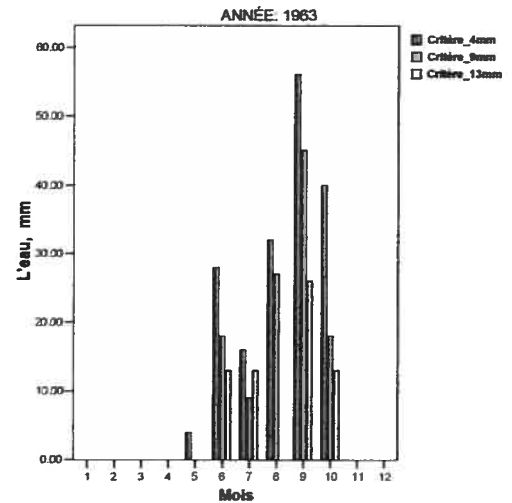
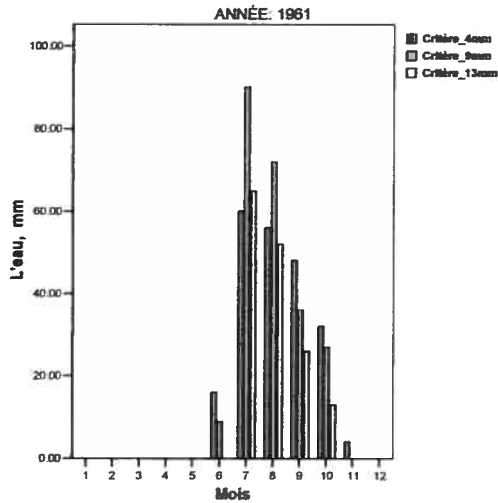
ANNEXE G. suite



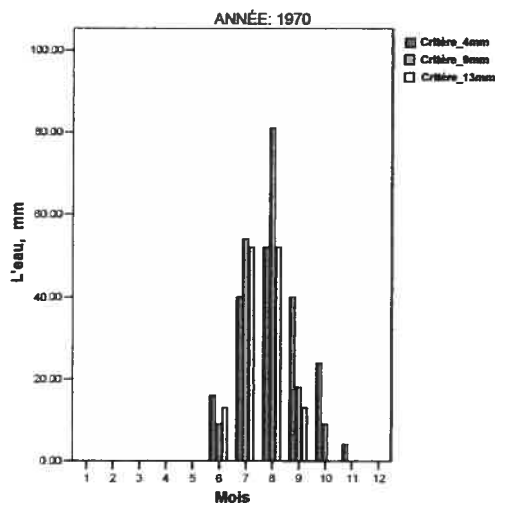
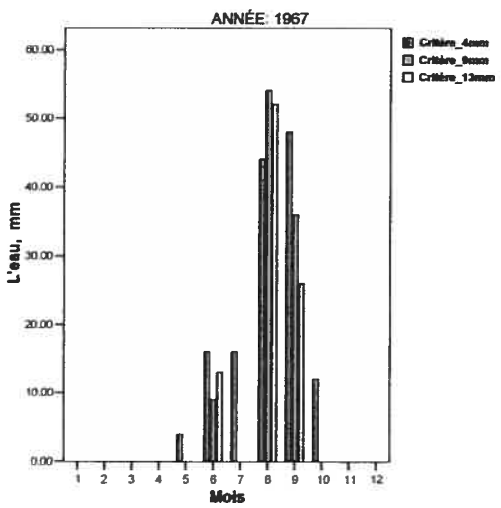
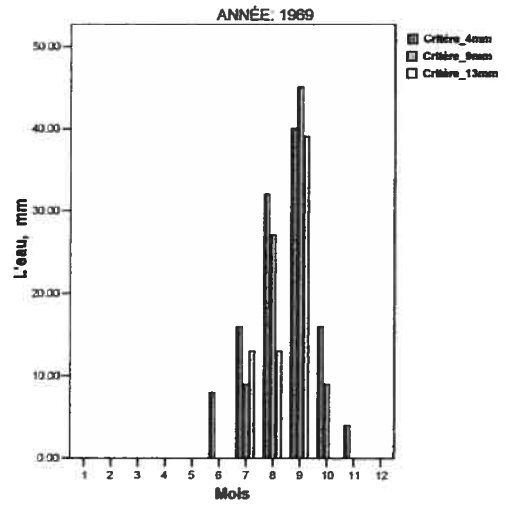
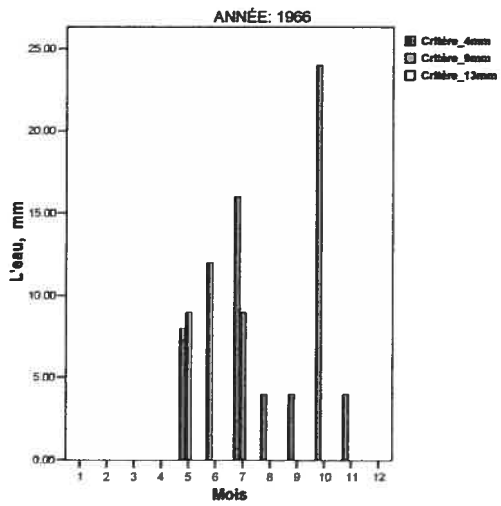
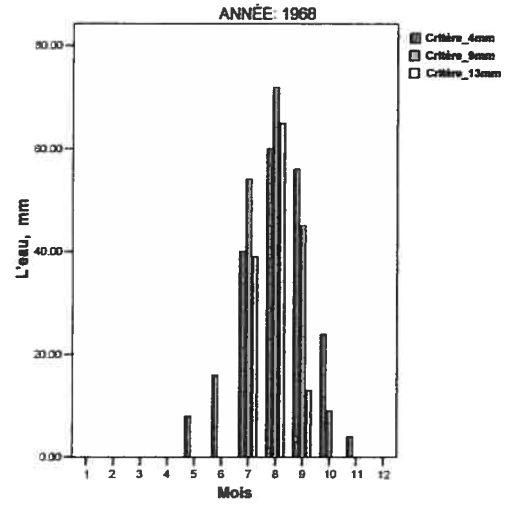
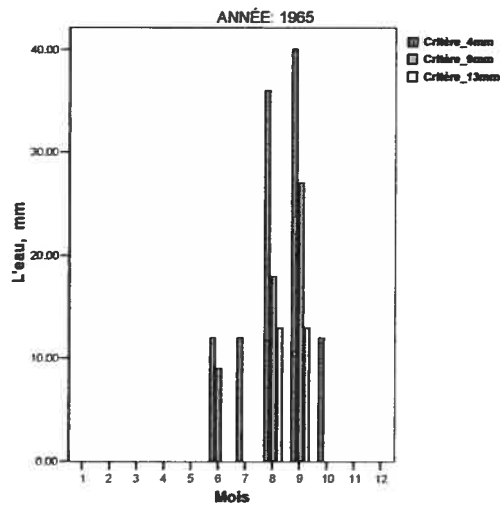
ANNEXE G suite



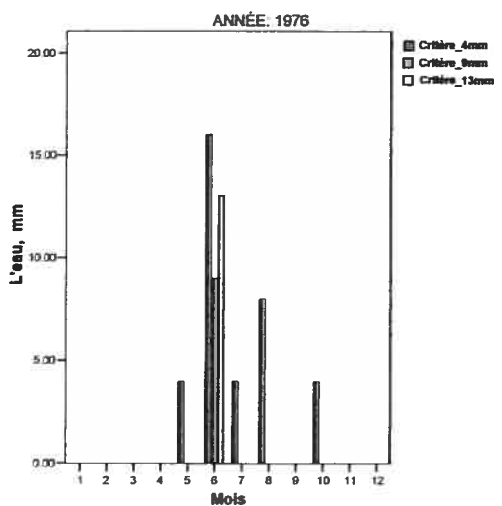
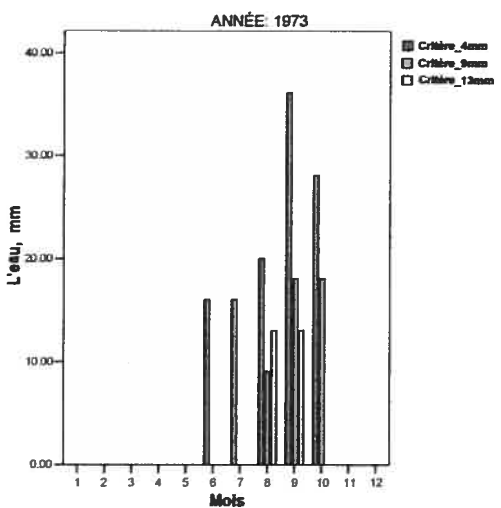
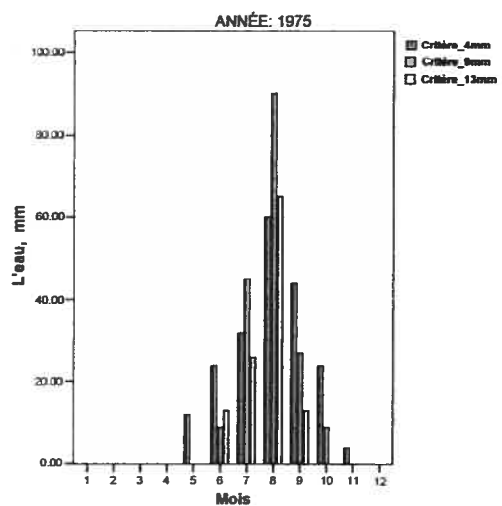
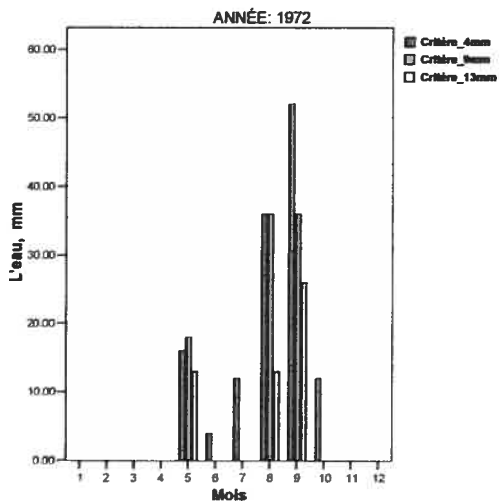
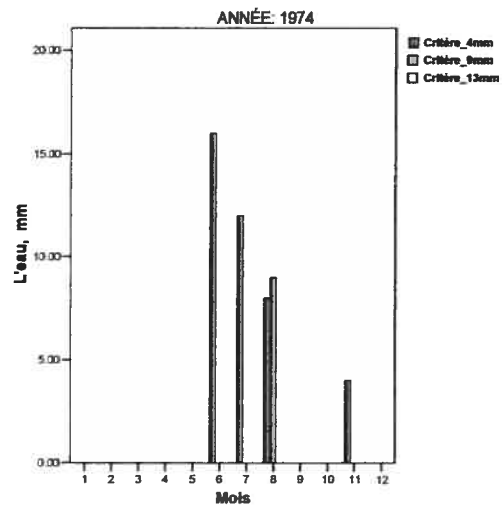
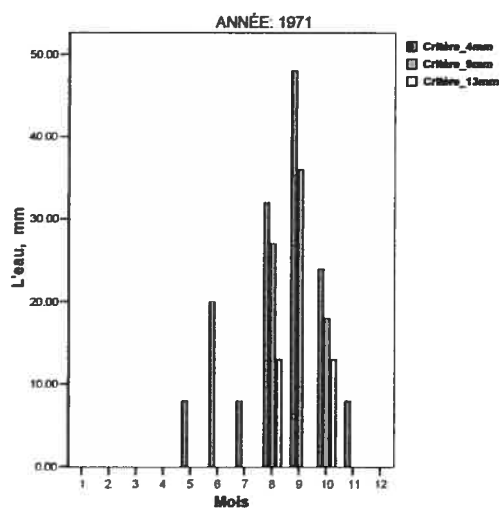
ANNEXE H : SIMULATIONS ANNUELLES DE L'IRRIGATION POUR LES ECPÈCES GAZONANTES DANS LA RÉGION DU QUÉBEC, PÉRIODE 1961-1990 (DONNÉES OBSERVÉES)



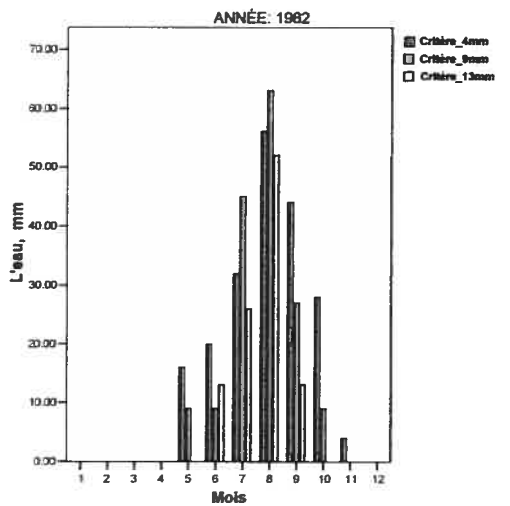
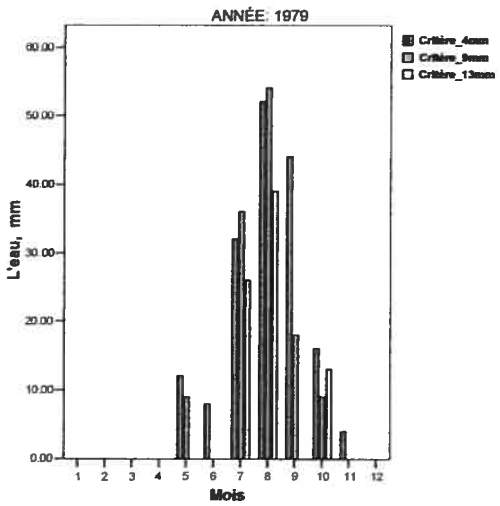
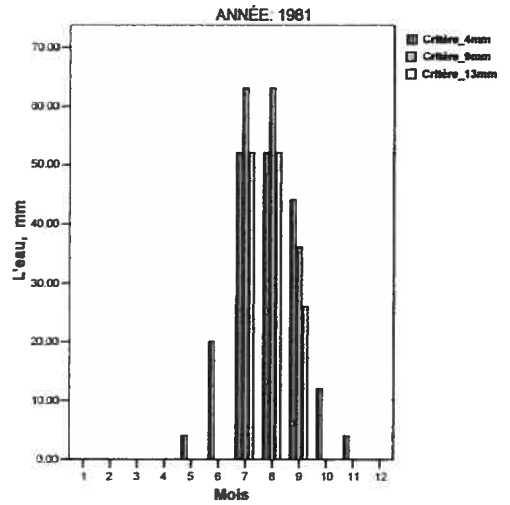
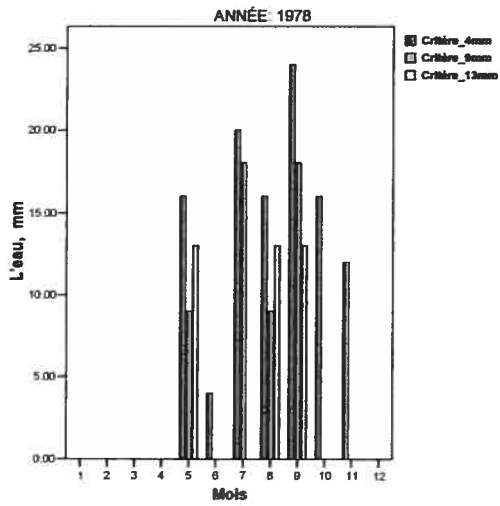
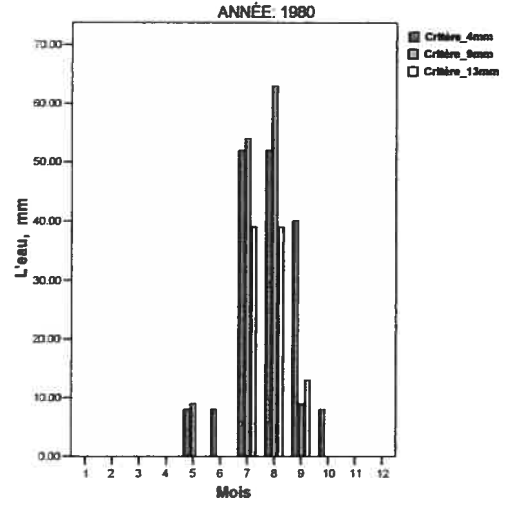
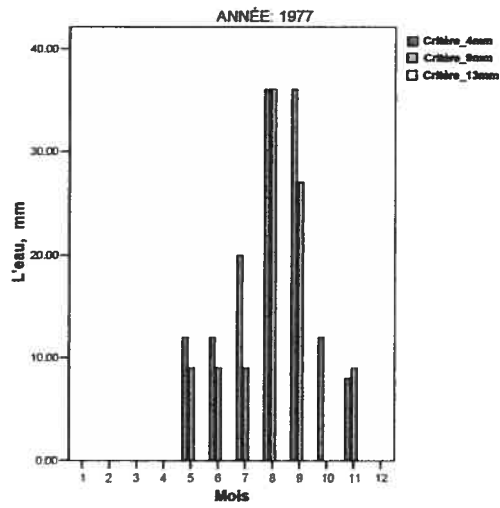
ANNEXE H suite



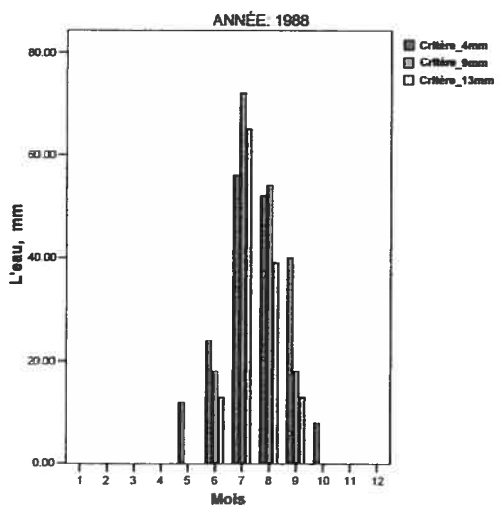
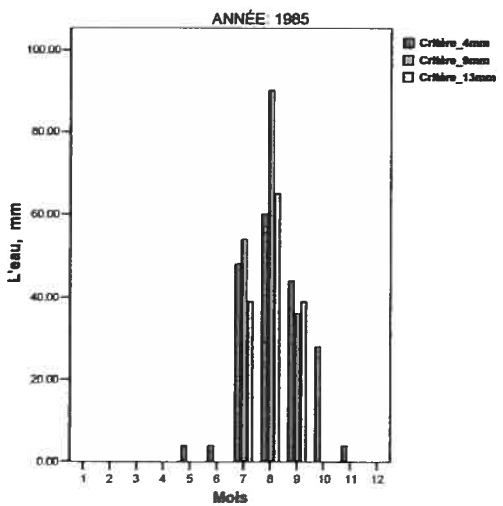
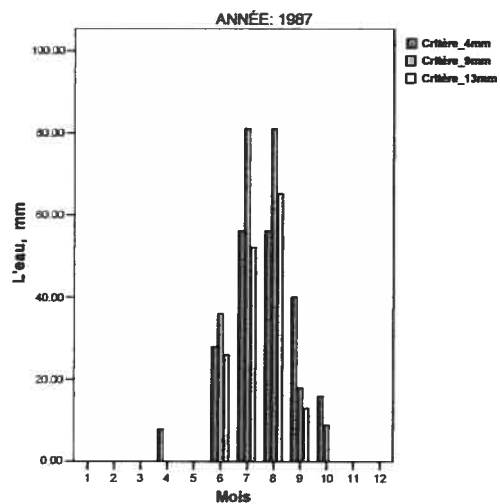
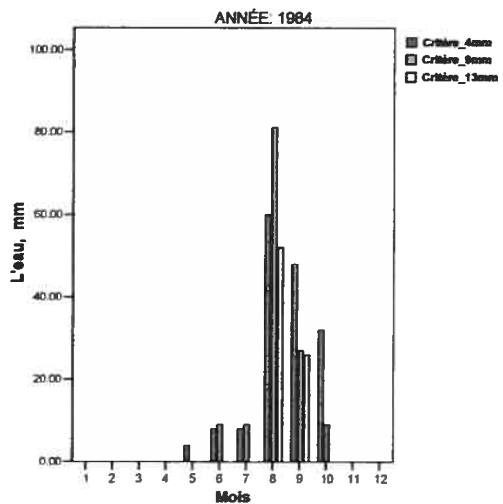
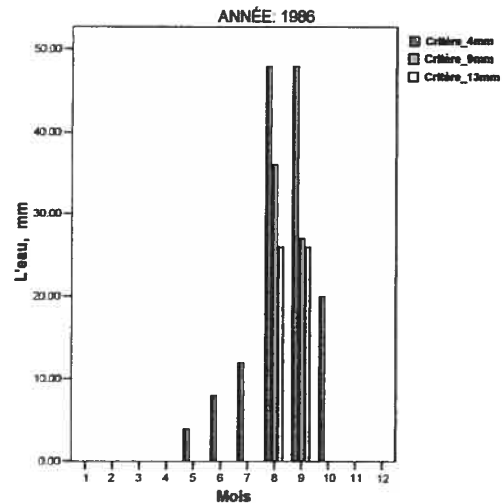
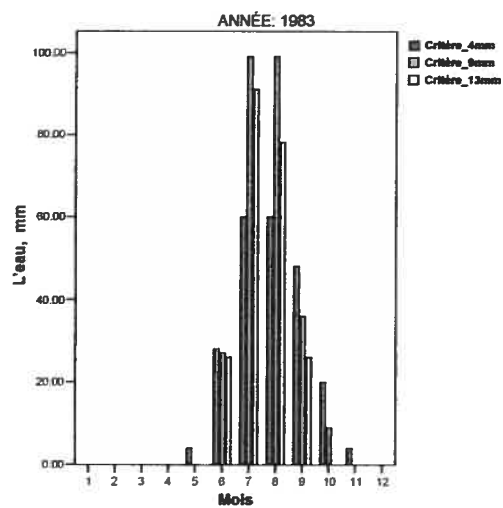
ANNEXE H suite



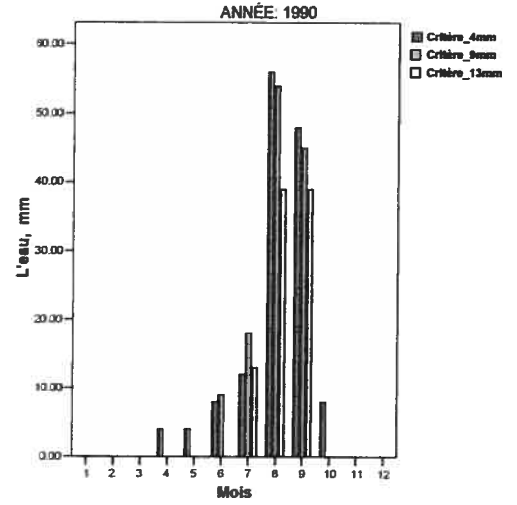
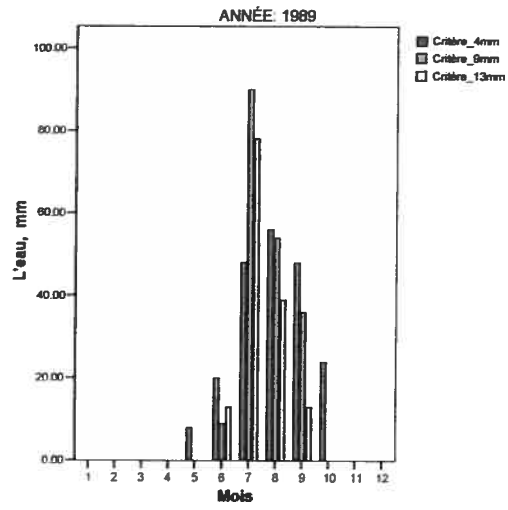
ANNEXE H suite



ANNEXE H suite



ANNEXE H suite



ANNEXE I. LES RESULTATS DES REGRESSIONS POUR LA REGION DU QUEBEC

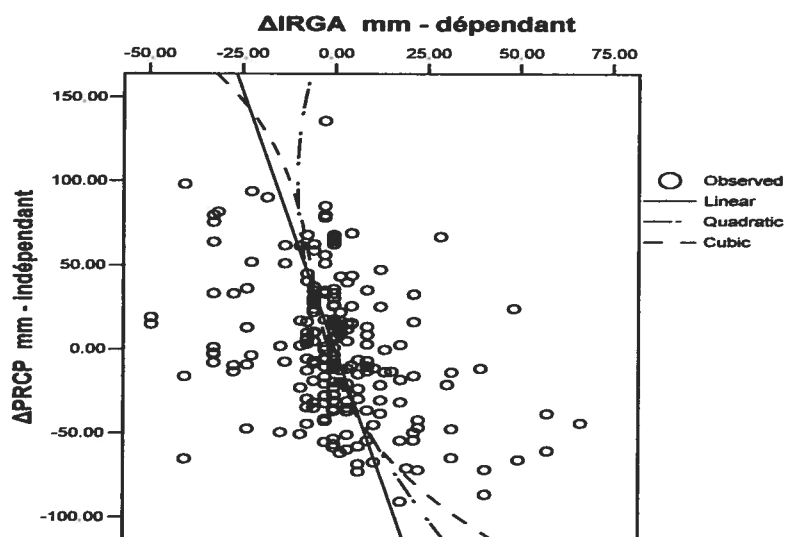


Figure I.1. Régressions du Δ IRGA (*critère de 9mm*) et du Δ PRCP, région du Québec, 1961-1990

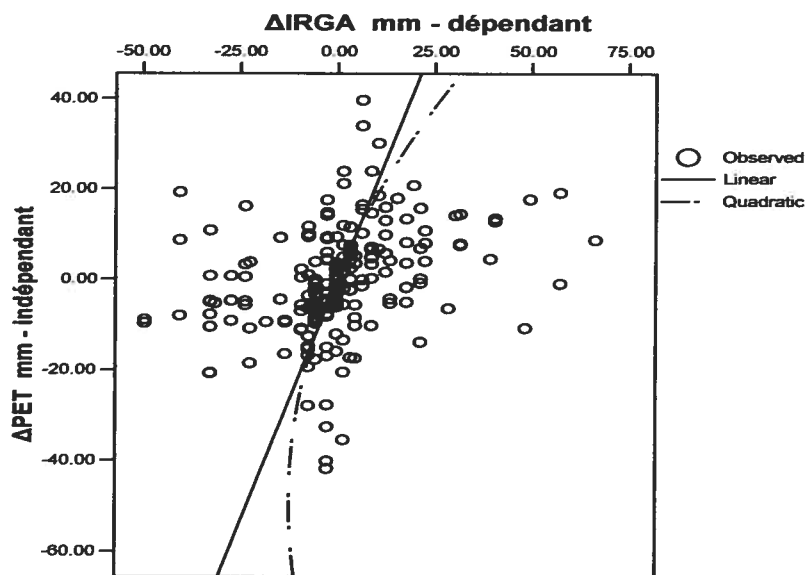
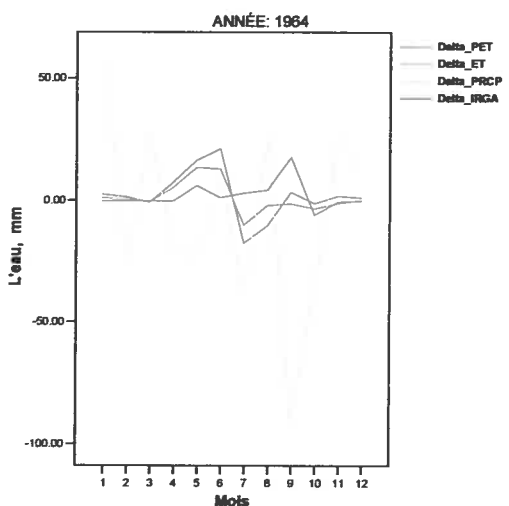
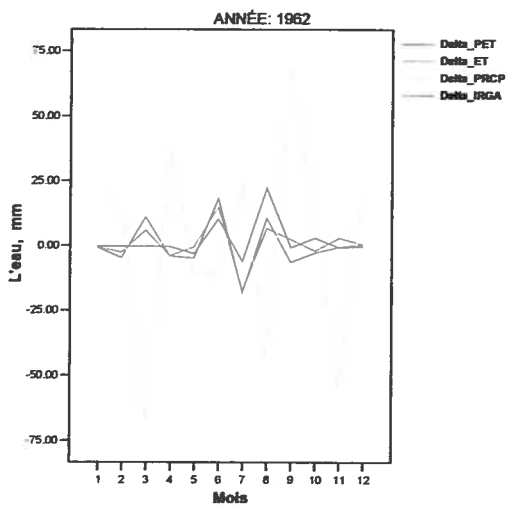
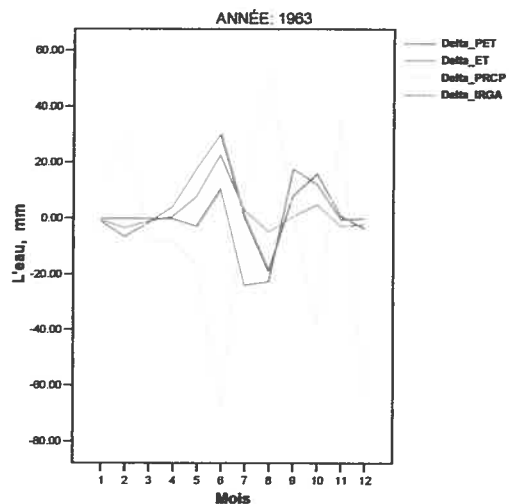
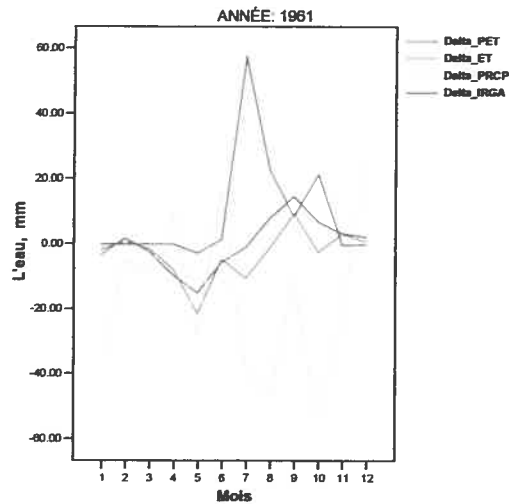
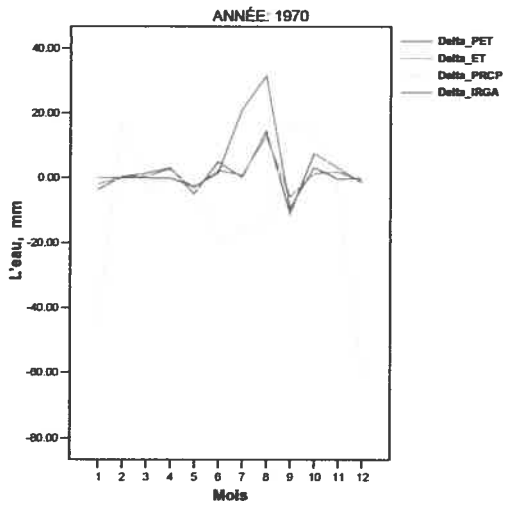
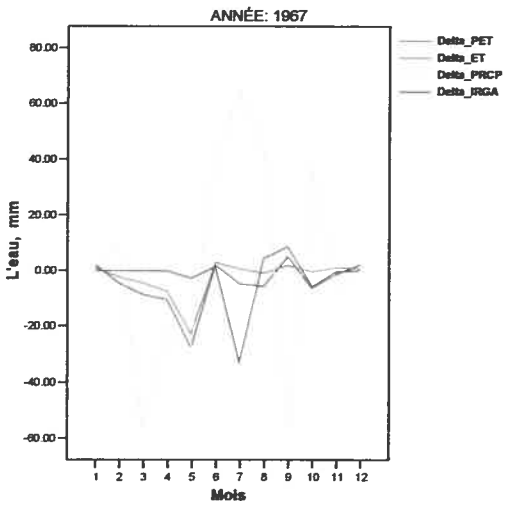
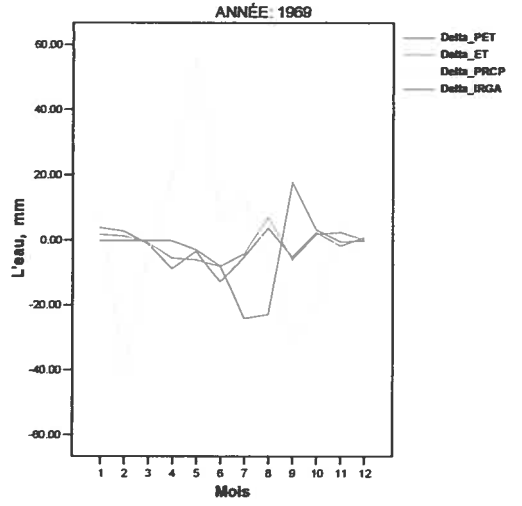
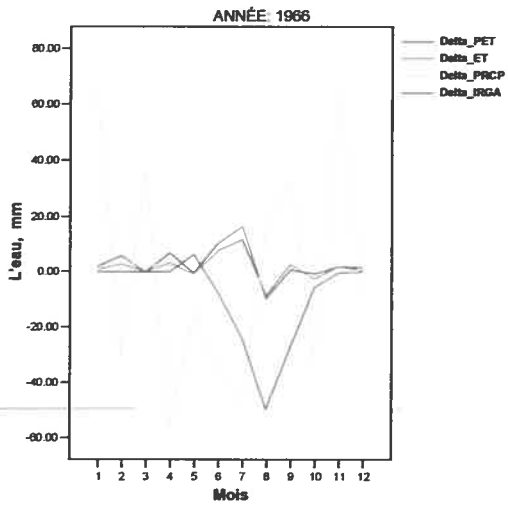
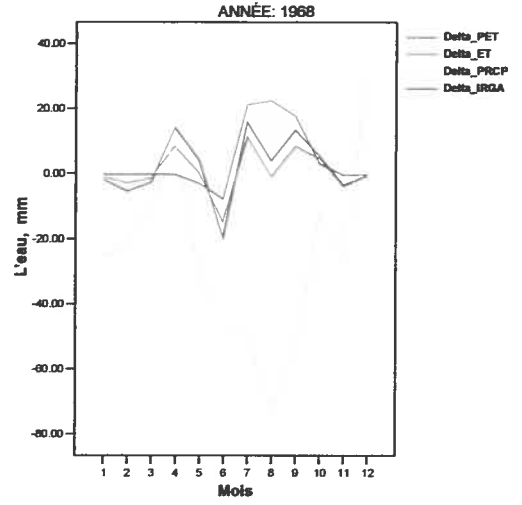
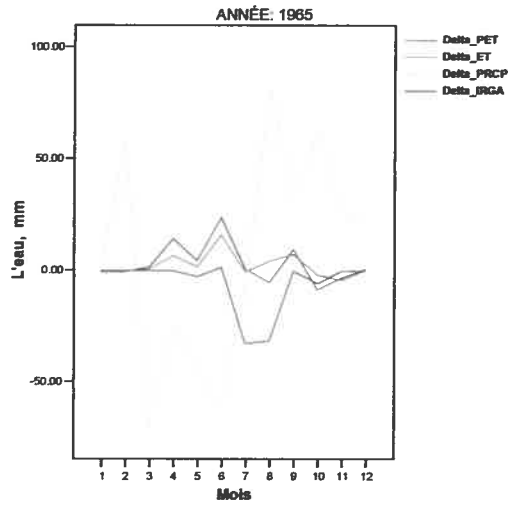


Figure I.2. Régressions du Δ IRGA (*critère de 15mm*) et du Δ PET région du Québec, 1961-1990

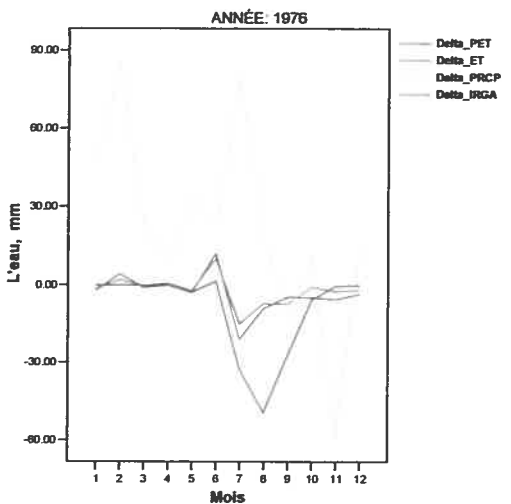
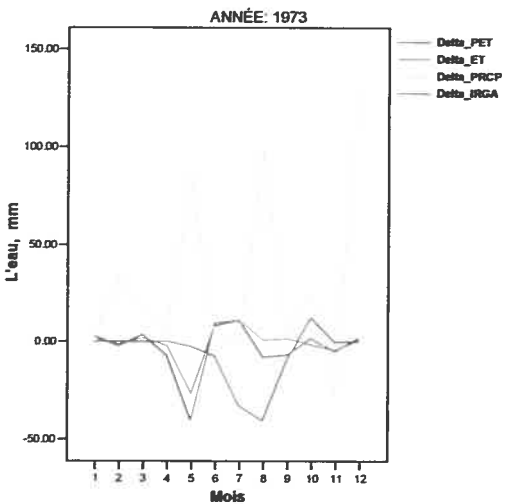
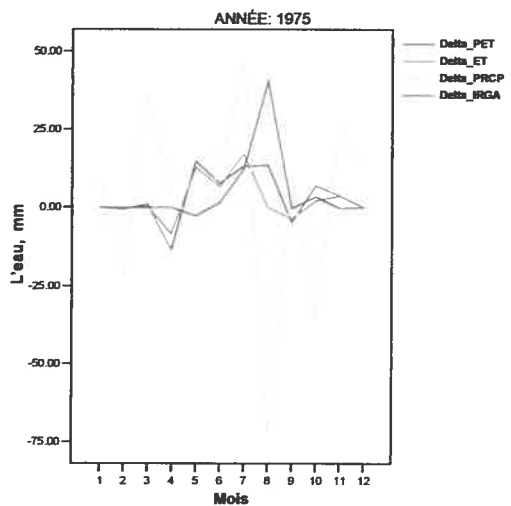
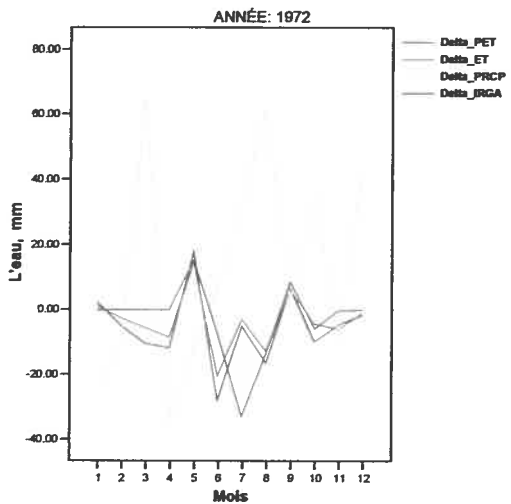
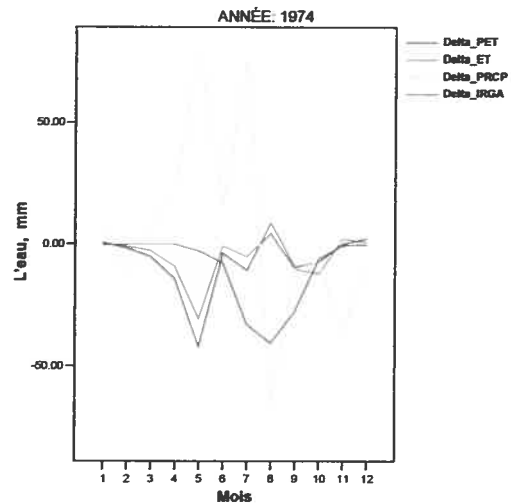
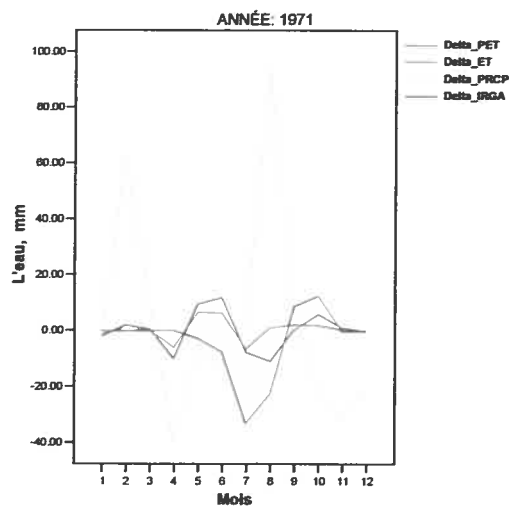
ANNEXE J. LES ECARTS MENSUELS (LE RAPPORT ENTRE LES SOMMES MENSUELLES ET LES VALEURS MOYENS MENSUELLES) DE L'EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (PET), DE L'EVAPOTRANSPIRATION (ET), DES PRECIPITATIONS (PRCP) ET DE L'IRRIGATION (IRGA) (CRITERE DE 9MM) DANS LA REGION DU QUEBEC, PERIODE 1961-1990



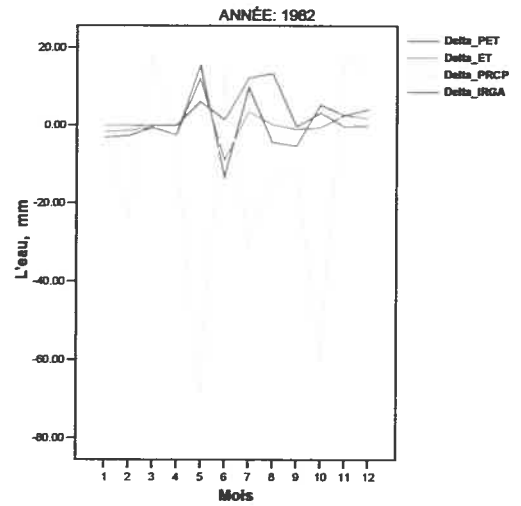
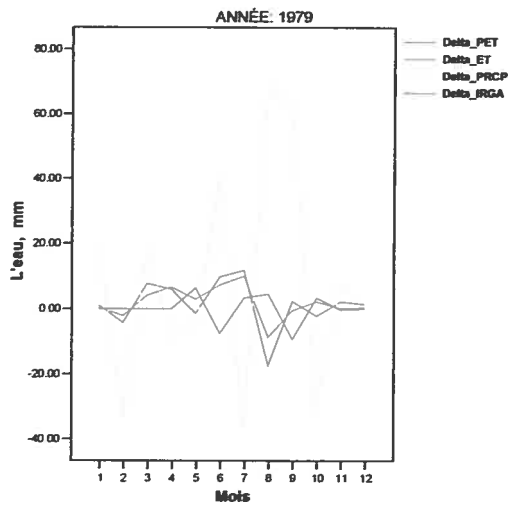
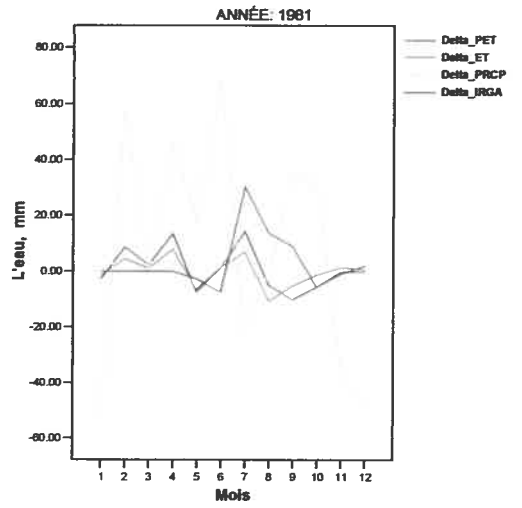
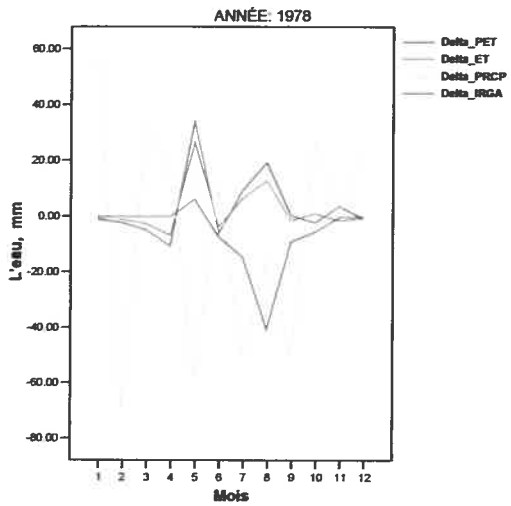
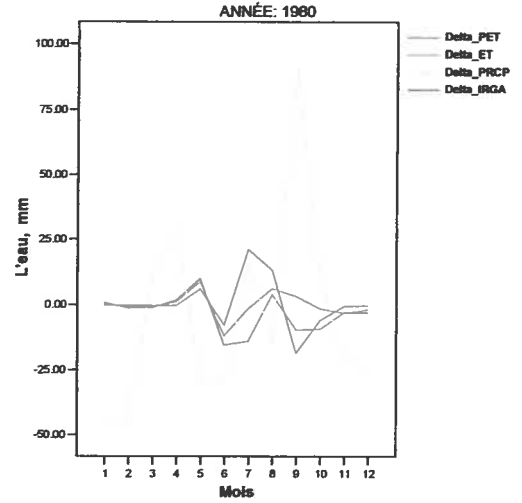
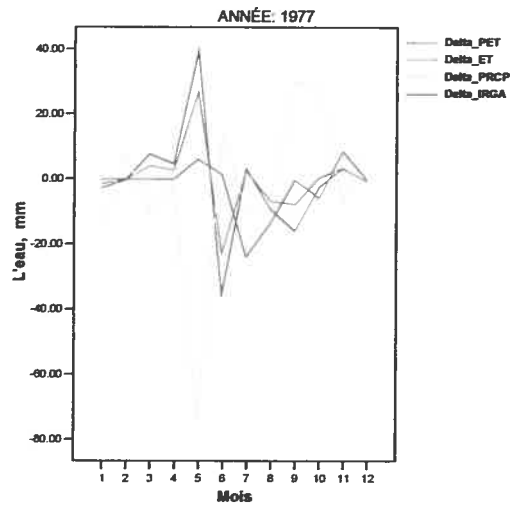
ANNEXE J suite



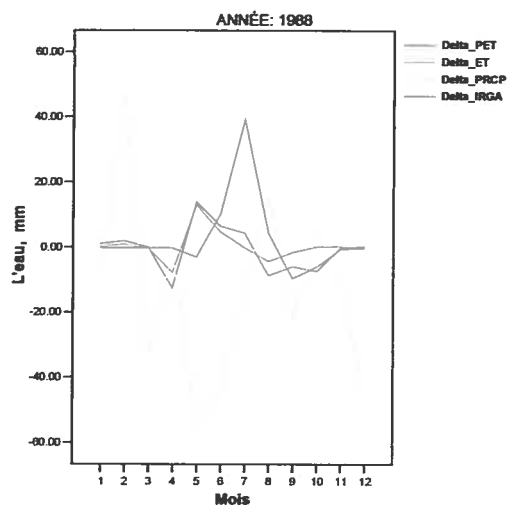
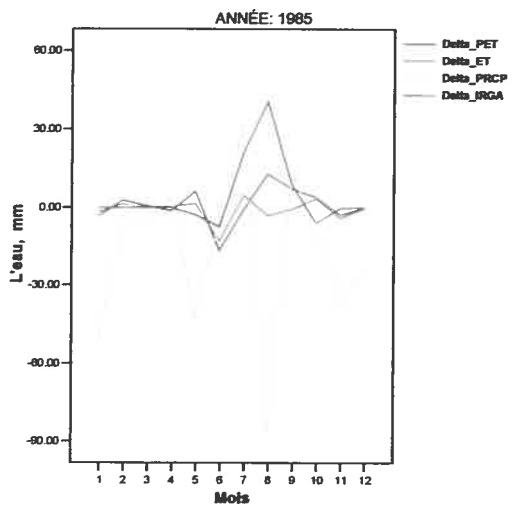
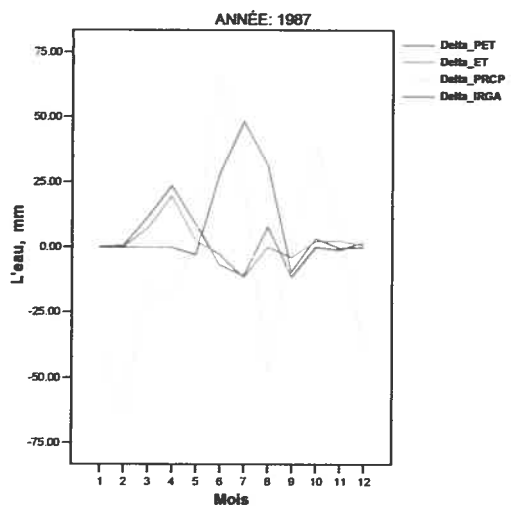
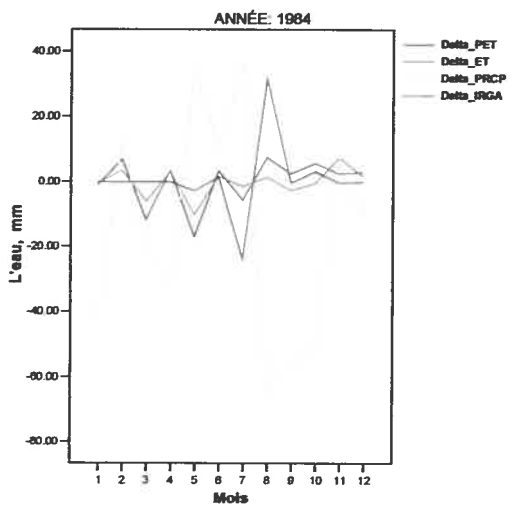
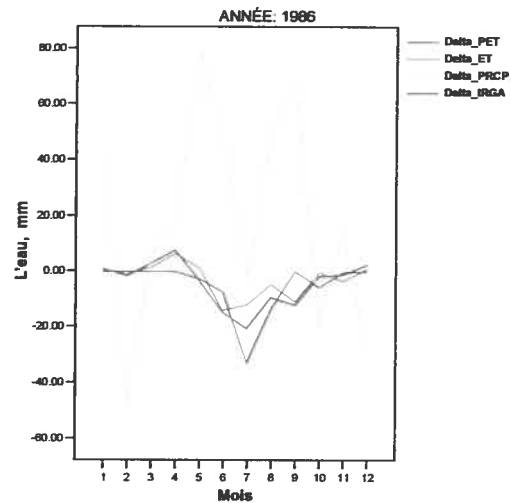
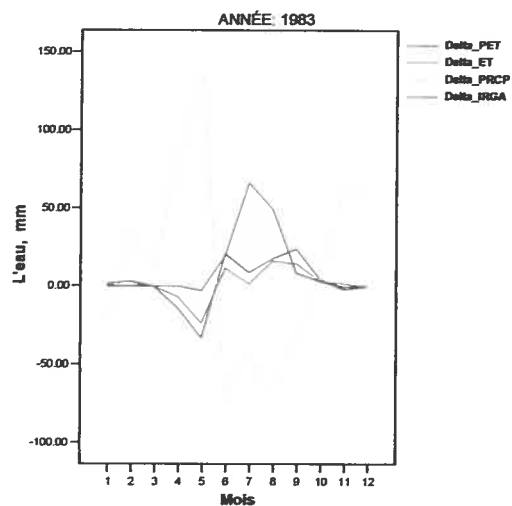
ANNEXE J suite



ANNEXE J suite



ANNEXE J suite



ANNEXE J suite

