

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ A
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M. Ing.

PAR
ANNIE CARON

ÉTALONNAGE ET VALIDATION D'UN GÉNÉRATEUR DE CLIMAT
DANS LE CONTEXTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

MONTREAL, LE 24 JANVIER 2006

(c) droits réservés de Annie Caron

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Robert Leconte, directeur de mémoire
Département de génie de la construction, à l'École de technologie supérieure

M. François Brissette, codirecteur de mémoire
Département de génie de la construction, à l'École de technologie supérieure

M. Paul Gervais, président du jury
Département de génie de la construction, à l'École de technologie supérieure

M. Daniel Damov, membre du jury
Département de Mines et Métallurgie, SNC Lavalin

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC
LE 14 DÉCEMBRE 2005
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

ÉTALONNAGE ET VALIDATION D'UN GÉNÉRATEUR DE CLIMAT DANS LE CONTEXTE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Annie Caron

SOMMAIRE

La Terre entre présentement dans une période de grands bouleversements climatiques. Ces changements se répercuteront sur plusieurs aspects de l'environnement dont les températures et les précipitations, deux éléments contrôlant les événements extrêmes. Pour s'adapter à ces nouveaux phénomènes, il est primordial de pouvoir inclure dans la gestion des ressources naturelles, incluant les ressources hydriques, un volet concernant l'étude des changements climatiques. Les modèles de circulation générale disponibles présentement pour la prévision des effets de ces changements possèdent une échelle trop grande pour permettre l'utilisation de leurs résultats à l'échelle locale. Comme la gestion des ressources hydriques se fait souvent à l'échelle d'un bassin versant, il devient essentiel de créer de nouveaux outils permettant de produire des données climatiques à l'échelle locale tenant compte d'un climat futur perturbé.

Ce mémoire présente un générateur stochastique de climat en tant qu'outil permettant l'étude des changements climatiques. Une revue de la littérature fait un survol des types de générateurs stochastiques de climat déjà développés. Deux générateurs sont ensuite sélectionnés pour représenter les deux grandes catégories existantes. Ces deux générateurs sont Lars-WG et WGEN. Par la suite, la comparaison entre leur performance respective est effectuée en utilisant des indices relatifs aux générations des précipitations et des températures, et certains tests statistiques. Il est constaté que WGEN montre certaines faiblesses au niveau de la génération des précipitations et plus particulièrement au niveau de la représentation des extrêmes. Des modifications ont donc été apportées à la version de base de WGEN pour permettre de développer un nouveau générateur, appelé WeaGETS, simulant mieux les extrêmes dans le contexte du climat canadien. Ces modifications ont été orientées vers la génération des occurrences et des quantités de précipitations. Ensuite, les modifications apportées sont évaluées à l'aide d'une validation directe pour plusieurs régions québécoises et canadiennes, et d'une validation indirecte effectuée sur un bassin versant du sud du Québec. Les résultats obtenus à la suite de ces validations montrent que les modifications apportées à la version de base de WGEN ont servi à améliorer considérablement la performance du nouveau générateur WeaGETS dans le contexte du climat canadien. Ce nouveau générateur est un premier pas vers la mise au point d'un outil performant dans l'analyse du risque hydrologique dans un contexte de changements climatiques.

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à exprimer toute ma gratitude à M. Robert Leconte, Ph.D. et M. François Brissette, Ph.D. qui ont dirigés conjointement, à titre de directeur et de codirecteur, les travaux de recherche que je présente ici. Je ne puis dire à quel point je leur suis reconnaissante pour leur précieuse aide, leur soutien moral et financier, leur extrême patience et leurs commentaires très pertinents. Ils ont su être, à eux deux, une source inestimable de savoir et de sagesse. Je sais que sans leur compréhension et leur appui, je n'aurais pu, de façon aussi agréable, surmonter l'obstacle qu'un tel projet représentait pour moi au départ.

Il convient également de remercier M. Paul Gervais, M. Ing., professeur au département de génie de la construction de l'École de technologie supérieure, et M. Daniel Damov, ingénieur hydrologue senior chez SNC-Lavalin, qui ont accepté d'être membre du jury qui évaluera ce projet. Je les remercie du temps qu'il m'accorde ainsi et de leurs commentaires qui serviront à améliorer le résultat final de ce travail.

Je désire également souligner la collaboration du consortium Ouranos qui ont fournit une aide technique précieuse ainsi qu'une ouverture intéressante sur le sujet des changements climatiques.

Je ne peux omettre de vous dire merci à vous tous DRAMATIQUES. Sans vous les heures de travail auraient été beaucoup moins agréables. Vous avez sus, chacun à votre façon, mettre du soleil dans mes journées. Je n'oublierai jamais nos BBQ et party de Noël, nos pauses café et nos petits 5 à 7, nos discussions et l'ambiance générale du DRAME. Je vous dis donc un gros merci à chacun de vous, Arnaud (mon Français préféré), Bruno (le tombeur de ces dames), Karine (et toute sa présence), Malika (la travaillante), Marie (l'organisée), Marouane (le fidèle au poste) et Sébastien (l'escaladeur). Vous ferez toujours partie de mes souvenirs.

Finalement, je tiens à souligner ma reconnaissance et à remercier mes parents, Magella et Constance, mon frère Jérôme, Amélie et bien sûr Marc. Ils ont été pour moi, et sont toujours, un soutien précieux. Votre amour, votre aide et votre compréhension m'ont permis de concrétiser mes projets.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
SOMMAIRE	I
REMERCIEMENTS	II
TABLE DES MATIÈRES	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	VI
LISTE DES FIGURES.....	VIII
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES	X
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	5
1.1 Utilisation des générateurs de climat	5
1.2 Description des générateurs de climat	7
1.2.1 Description des générateurs de type Lars-WG.....	9
1.2.2 Description des générateurs de type Richardson.....	15
CHAPITRE 2 COMPARAISON DES RÉSULTATS OBTENUS AVEC LARS- WG ET WGEN	25
2.1 Choix de la station climatologique.....	25
2.2 Critères de comparaison.....	26
2.3 Comparaison des résultats.....	30
2.3.1 Résultats de la comparaison des distributions de précipitations.....	31
2.3.2 Résultats de la comparaison des quantités de précipitations.....	37
2.3.3 Résultats de la comparaison des séries de jours secs et pluvieux.....	38
2.3.4 Résultats de la comparaison des températures	41
CHAPITRE 3 PRÉSENTATION DE LA VERSION MODIFIÉE DE WGEN: WEAGETS.....	46
3.1 Problèmes rencontrés avec WGEN et améliorations apportées.....	46
3.1.1 Les radiations solaires	47
3.1.2 Les précipitations extrêmes et la distribution des percentiles	48
3.1.3 Les séries de jours secs et pluvieux.....	53

3.1.4	Les températures minimales	56
CHAPITRE 4 VALIDATION DIRECTE DE WEAGETS		57
4.1	Description des stations climatologiques utilisées pour la validation.....	57
4.2	Résultats de la validation directe.....	59
4.2.1	Résultats des indices de STARDEX.....	60
4.2.2	Résultats des tests statistiques	67
CHAPITRE 5 VALIDATION INDIRECTE DE WEAGETS.....		79
5.1	Présentation du bassin versant.....	79
5.2	Description du modèle hydrologique.....	82
5.3	Description des données d'entrée du modèle.....	85
5.4	Choix des critères d'analyse.....	87
5.5	Résultats de la validation indirecte	88
5.5.1	Les durées d'étiage	88
5.5.2	Les quantités de ruissellement direct.....	91
5.5.3	Les débits de pointe	93
5.5.4	L'analyse de fréquence.....	98
5.5.5	Résultats des tests statistiques	100
CHAPITRE 6 ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS.....		102
6.1	Types de générateurs	102
6.2	Caractère saisonnier des données générées	103
6.2.1	Distribution et quantité de précipitations	104
6.2.2	Séries de jours secs et pluvieux	105
6.2.3	Effets sur la modélisation hydrologique.....	106
6.3	Caractère régional.....	108
6.4	Études futures	109
CONCLUSION.....		111
ANNEXES		
1 :	Régions climatiques.....	115
2 :	Résultats des indices STARDEX pour l'ensemble des stations.....	118
BIBLIOGRAPHIE		132

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I	Comparaison des procédures utilisées par Lars-WG et WGEN pour générer chaque variable climatique 23
Tableau II	Résumé des indices STARDEX utilisés pour l'analyse de comparaison des variables climatiques simulées avec Lars-WG et WGEN 28
Tableau III	Résultats obtenus à la stations Dorval pour la comparaison des distributions de précipitations..... 32
Tableau IV	Résultats obtenus à la station Dorval pour la comparaison des quantités de précipitations 38
Tableau V	Résultats obtenus à la station Dorval pour la comparaison des séries de jours secs et pluvieux..... 39
Tableau VI	Résultats obtenus à la station Dorval pour la comparaison des températures minimales et maximales moyennes 43
Tableau VII	Comparaison des précipitations extrêmes saisonnières générées avec les fonction de distribution exponentielles et gamma par WGEN pour la station Dorval 48
Tableau VIII	Comparaison des distributions de précipitations saisonnières générées avec les fonction de distribution exponentielles et gamma par WGEN pour la station Dorval 49
Tableau IX	Définition des probabilités de transition d'une chaîne de Markov de 3ème ordre..... 55
Tableau X	Description des stations climatologiques utilisées 58

Tableau XI	Résultats saisonniers des distribution de précipitations obtenus aux stations Dorval, Québec et Mont-Joli avec les données observées (O) et les données générées par WGEN (WG) et WeaGETS (We)	61
Tableau XII	Résultats saisonniers des quantités de précipitations obtenus aux stations Dorval, Québec et Mont-Joli avec les données observées (O) et les données générées par WGEN (WG) et WeaGETS (We)	64
Tableau XIII	Résultats saisonniers des séries de jours secs et pluvieux obtenus aux stations Dorval, Québec et Mont-Joli avec les données observées (O), et les données générées par WGEN (WG) et WeaGETS (We).....	66
Tableau XIV	Nombre de rejets obtenus avec les tests statistiques de Fisher et de Student respectivement effectués sur les variances (F) et les moyennes (t) des indices calculés aux stations Dorval, Québec et Mont-Joli avec les données générées par WGEN (WG) et WeaGETS (WE).....	73
Tableau XV	Nombre de rejets obtenus avec le test de Kolmogorov-Smirnov effectué sur les distributions de précipitations aux stations Dorval, Québec et Mont-Joli avec les données générées par WGEN (WG) et WeaGETS (WE).....	76
Tableau XVI	Résumé des débits de pointe des crues de printemps et des crues d'été et d'automne pour différentes périodes de récurrence.....	98
Tableau XVII	Résultats des tests statistiques de Fisher (F-test) et de Student (t-test) respectivement effectués sur les variances et les moyennes des critères d'analyse.....	101

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1	Exemple d'un histogramme de distribution empirique pour les séries de jours pluvieux 11
Figure 2	Exemple d'un histogramme de distribution empirique des quantités de précipitations 13
Figure 3	Exemple de séries de Fourier à 4 harmoniques appliquées aux probabilités d'occurrence calculées pour des périodes de 14 jours 18
Figure 4	Exemple de séries de Fourier à 4 harmoniques appliquées au paramètre λ calculés pour des périodes de 14 jours 20
Figure 5	Probabilités cumulatives des distributions de précipitations simulées par Lars-WG (en haut) et WGEN (en bas) pour la station Dorval au mois d'octobre..... 35
Figure 6	Distribution des précipitations observées et simulées par Lars-WG (en haut) et WGEN (en bas) pour la station Dorval au printemps 36
Figure 7	Comparaison des températures moyennes mensuelles des données observées et des données simulées par WGEN et Lars-WG..... 44
Figure 8	Comparaison des variances des températures mensuelles des données observées et des données simulées par WGEN et Lars-WG..... 45
Figure 9	Exemple de courbe servant à la détermination des équations de correction..... 53
Figure 10	Distribution du test de Student avec valeurs critiques à chaque extrémitée de la distribution..... 69
Figure 11	Exemple du test de Kolmogorov-Smirnov effectué sur les distributions cumulatives des précipitations journalières observées et simulées pour la station de Dorval aux mois de mars (haut) et de février (bas). 78

Figure 12	Situation géographique du bassin versant de la rivière Châteauguay.....	81
Figure 13	Schéma simplifié du modèle conceptuel HSAMI.....	84
Figure 14	Durées moyennes des périodes d'étiage observées et simulées à l'été pour le bassin versant de la rivière Châteauguay avec un seuil de 12 m ³ /s.....	89
Figure 15	Durées moyennes des périodes d'étiage simulées vs observées à l'été pour le bassin versant de la rivière Châteauguay avec un seuil de 12 m ³ /s.....	90
Figure 16	Ruissellement moyen annuel simulé vs observé pour le bassin versant de la rivière Châteauguay.....	92
Figure 17	Ruissellement moyen annuel observé et simulé pour le bassin versant de la rivière Châteauguay.....	92
Figure 18	Moyennes des débits observés et simulés pour le bassin versant de la rivière Châteauguay.....	94
Figure 19	Débits de pointe annuel moyens simulés vs observés pour le bassin versant de la rivière Châteauguay (30 simulations de 37 années).....	95
Figure 20	Périodes de récurrence des crues printanières selon la loi de Log Pearson.....	97
Figure 21	Périodes de récurrence des crues d'été et automne selon la loi de Log Pearson.....	97
Figure 22	Exemple d'analyse de fréquence pour 2 simulations des 30 effectuées pour le bassin versant de la rivière Châteauguay.....	99
Figure 23	Exemple de séries de Fourier à 4 harmoniques appliquées aux probabilités d'occurrence des séries sèches calculées pour des périodes de 14 jours.....	106

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

HSAMI:	Modèle hydrologique conceptuel développé par Hydro-Québec
IREQ:	Institut de recherche d'Hydro-Québec
LARS-WG:	Générateur de climat développé par le 'Long Ashton Research Station' (Long Ashton Research Station Weather Generator)
Matlab:	Logiciel de programmation
MCG:	Modèle de Circulation Générale
NCDC:	National Climatic Data Center (Etats-Unis)
Ouranos:	Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques
SDSM:	Statistical DownScaling Model
STARDEX:	STATistical and Regional dynamic Downscaling of EXtreme for European regions
WeaGETS:	Générateur de climat de l'École de Technologie Supérieure (WEATHER Generator of ETS)
WGEN:	Générateur de climat décrit par Richardson (Weather GENERator)

INTRODUCTION

L'une des plus grande richesse de la Terre, sinon la plus est importante, est l'eau. Cette ressource est à la base même de la vie humaine et de son développement. Souvent prise pour acquis par ceux qui ont la chance de vivre dans un endroit du monde où elle se retrouve en quantité abondante, elle peut aussi devenir le plus précieux des trésors pour la majorité des hommes et des femmes ayant vu le jour dans des régions beaucoup moins favorisées. La ressource en eau se retrouve souvent à la base de nombreux drames humains par son absence ou son abondance instantanée. Qu'il s'agisse de sécheresses, d'inondations, d'ouragans ou de Tsunamis, le lien entre l'eau et les hommes demeure très puissant. Donc, que l'on fasse partie de ceux qui ne manquent en aucun point de cette richesse ou de ceux qui la comptent à la goutte, il est primordial de procéder à une gestion des plus efficaces pour conserver et gérer efficacement cette ressource qui contrôle notre vie.

Pour procéder à une gestion appropriée de la ressource en eau, il faut prendre en compte tous ses processus. Il devient, de jours en jours, quasiment impossible de nier le fait que notre planète entre maintenant dans une période de changements climatiques. Ces changements, en partie naturels, mais en majorité provoqués par l'homme et sa croissance démographique, auront des répercussions majeures sur l'ensemble de la planète. Le réchauffement planétaire se répercutera non seulement sur la température globale mais sur l'ensemble des processus atmosphériques qui sont reliés entre eux. Il devient capital, dans ce contexte, d'anticiper les effets que ces changements auront sur les différents aspects de la gestion de la ressource hydrique. L'eau revêt une importance marqué dans plusieurs domaine touchant la vie de tous les jours tels que l'agriculture, l'hydroélectricité, la gestion des systèmes de drainage urbain, des systèmes de traitement des eaux ainsi que la prévisions des évènements extrêmes tels que les inondations et les

sécheresses. C'est pourquoi depuis quelques années, l'étude des changements climatiques et leurs effets sur la ressource en eau a pris de l'essor.

Déjà, plusieurs scénarios de changements climatiques ont été mis en oeuvre et des modèles globaux de climat ont été développés par différents pays. Ces modèles, quoique efficace dans l'analyse à grande échelle des changements climatiques, sont difficilement utilisables pour des régions plus restreintes. Cependant, la gestion de la ressource en eaux est aussi très importante au niveau régional tel qu'un bassin versant. Comme les modèles globaux de climats sont dans l'impossibilité de produire des résultats précis et adéquats pour des zones de cet ordre de grandeur il est nécessaire de trouver des solutions. C'est pourquoi, dernièrement, des modèles régionaux de climat ont été développés. Ces modèles régionaux augmentent considérablement la précision des résultats de la modélisation du climat à une échelle plus fine. Toutefois, le problème rencontré avec les modèles régionaux de climats est qu'ils demandent une grande capacité de calcul et qu'ils sont relativement coûteux et complexes à utiliser.

Une autre option pour l'analyse à petite échelle des changements climatiques est l'utilisation des générateurs de climats couplés à différentes méthodes de mise à l'échelle ou « downscaling ». Il y a déjà quelques décennies que différents types de générateurs de climats sont étudiés et utilisés dans divers domaines. D'abord mise au point pour la génération de longues séries de données climatiques servant à l'analyse de risque, cette méthode est ensuite devenue une option dans la génération de données climatologiques perturbées pour tenir compte de l'effet des changements climatiques. Si la procédure de génération de données climatologiques telles que les précipitations, les températures et les radiations solaires est couplée à un scénario de changement climatique et à des résultats de modélisation d'un modèle global ou régional, il devient possible d'obtenir des résultats pertinents représentant ces mêmes données climatologiques dans le futurs. Une fois ces données obtenues, elles peuvent être utilisées pour procéder à une modélisation hydrologique et ainsi permettre une prévision

des effets des changements climatique sur différents régimes hydriques. Ainsi, il devient possible d'obtenir un outil de gestion capable de prévoir et de procéder à la gestion des évènements extrêmes causés par le réchauffement planétaire.

Ce projet se veut donc l'élaboration d'une procédure d'étalonnage et de validation d'un générateur de climat dans le but d'y intégrer dans le futur un module permettant de modifier certains paramètres pour modéliser les effets des changements climatiques. Le but de ce projet est d'obtenir un générateur de climat fiable qui servira par la suite de base à un outil intégrant l'analyse des changements climatiques à la gestion des ressources hydriques. Pour ce faire, un type de générateur de climat existant a été sélectionné pour servir de base. Le choix de ce générateur a été fait suite à sa comparaison avec d'autres types et à l'analyse des ses différents avantages par rapport aux autres dans le contexte des changements climatiques. Par la suite, des modifications majeures ont été apportées à ce générateur pour en améliorer sa performance. L'étalonnage du modèle a été exécuté en utilisant les données climatologiques de plusieurs stations météorologiques couvrant un large territoire. La validation du générateur a ensuite été réalisée de façon directe et indirecte selon des indices prédéfinis et en procédant à une modélisation hydrologique avec les données générées.

Le présent mémoire se divise comme suit. Une revue de la littérature couvrant le sujet des générateurs de climat fait l'objet du chapitre 1. Au chapitre 2, la comparaison de deux types de générateurs courants est exécutée en utilisant certains paramètres précis. Puis, au chapitre 3, les différentes modifications apportées au générateur sélectionné sont énumérées et expliquées. Le calibrage du nouveau générateur de climat fat parti de ce chapitre. Le chapitre 4 concerne la validation directe du générateur de climat modifié en utilisant des tests statistiques et les mêmes indices que lors de la comparaison. La validation indirecte du générateur, exécuté grâce à une modélisation hydrologique sur le bassin versant de la rivière Châteauguay, est présentée au chapitre 5. Par la suite, l'analyse et la discussion des différents résultats obtenus sont abordées au chapitre 6 en

mettant l'accent sur les principaux objectifs de l'étude. En guise de conclusion, les principaux résultats sont mentionnés et certaines recommandations et commentaires sont formulés.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Il y a déjà quelques décennies qu'a débuté l'élaboration de modèles permettant la génération de séries de variables climatiques ayant des propriétés statistiques spécifiques. Ces modèles, appelés générateurs stochastiques de climat, utilisent des séries de données observées pour la détermination des paramètres statistiques servant à la génération des différentes variables climatiques. C'est vers les années 1960 que les premiers générateurs de climat ont vu le jour (Bailey, 1964; 1962). Ces premiers générateurs de climat ne généraient souvent qu'une seule variable qui était la plupart du temps les précipitations. Par la suite, d'autres générateurs sont apparus simulant une plus grande variété de variables climatiques. C'est au cours des années 1980 que l'un des générateurs de climat les plus utilisés a vu le jour. Ce générateur de climat, appelé WGEN et créé selon la description faite par Richardson (1981), pouvait générer comme variables climatiques les précipitations, les températures maximales et minimales, et les radiations solaires sur une base journalière. Plus tard, bien d'autres générateurs ont suivi se basant le plus souvent sur les principes décrits par Richardson.

1.1 Utilisation des générateurs de climat

Au début de leur histoire, les générateurs de climat, aussi appelés générateurs stochastiques de climat, étaient surtout utilisés pour la génération de longues séries de données synthétiques de précipitations servant à améliorer la justesse des évaluations de risque dans le domaine de l'hydrologie et de l'agriculture. Généralement, ce sont les données observées qui servent de données d'entrée dans les modèles mathématiques en hydrologie et en agriculture. Malheureusement, pour certains sites, ces séries de données observées ne sont pas toujours suffisamment longues ou tout simplement

disponibles pour permettre une bonne estimation de la probabilité d'occurrence des événements extrêmes. De plus, d'un point de vue statistique, les données observées ne représentent qu'une seule réalisation du climat. C'est donc pour remédier à ces problèmes que les générateurs de climat ont vu le jour. En se servant d'un générateur de climat, il devient possible de créer de plus longues séries de données possédant les mêmes caractéristiques statistiques que les données observées. Ces nouvelles séries permettent de reproduire une plus grande variété de situations possibles. Et, dans le cas de sites ne possédant aucun historique de données climatiques, les générateurs peuvent pallier au problème en utilisant les paramètres d'un autre site situé à proximité et en transférant à l'endroit désiré ces paramètres par l'application d'une technique d'interpolation. Ainsi, en se servant des paramètres interpolés, il est possible de créer une série de données synthétiques servant de données d'entrée dans les modèles hydrologiques ou agraires.

De nos jours, les variables climatiques produites par les générateurs de climat existants peuvent être utiles dans plusieurs domaines de recherche. Cependant, un nouveau domaine prend de plus en plus d'importance avec les années. Il s'agit de l'étude des changements climatiques. Il existe des modèles climatiques globaux mais ils ne peuvent être utilisés directement dans l'étude des changements climatiques pour une région restreinte car leur maillage est beaucoup trop grand et ne permet pas une précision suffisante (la superficie d'une maille est d'environ 90 000 km²). Il existe plusieurs méthodes, regroupées sous le vocable de « downscaling », qui visent à produire des données climatologiques à l'échelle locale, à partir des modèles globaux. Parmi ces méthodes, l'utilisation d'un générateur de climat présente plusieurs avantages intéressants pour la production de séries de données synthétiques à l'échelle locale, sous l'effet des changements climatiques.

Pour générer des données synthétiques perturbées par les changements climatiques, il suffit d'ajuster les paramètres obtenus à partir des données observées avec un générateur

de climat. Les résultats obtenus avec les modèles climatiques globaux sont utilisés conjointement avec les statistiques des données observées dans la construction de scénarios « downscalés » de changements climatiques. Une fois qu'un scénario a été sélectionné, on utilise ce dernier pour modifier les paramètres du générateur de climat et ainsi produire une série de données synthétiques représentant les variables climatiques futures. Plusieurs possibilités, de simples à complexes, existent pour la modification des paramètres du générateur de climat pour la simulation d'un climat futur.

1.2 Description des générateurs de climat

Un générateur stochastique de climat est un modèle numérique qui produit une série chronologique de variables climatiques avec des propriétés statistiques semblables à celles des séries observées. Il existe deux grandes catégories de générateurs de climat. On peut les regrouper selon leur structure dans la catégorie de type Richardson (Richardson, 1981) ou ceux utilisant une approche basée sur les séries. Dans la première catégorie, on retrouve des générateurs de climats tels que WGEN (Richardson et Wright, 1984), WXGEN (Williams, 1995), USCLIMATE (Johnson et al., 1996), CLIGEN (Zhang et Garbrecht, 2003) et CLIMGEN (Stöckle et al., 1999). Le principal générateur de la seconde catégorie est Lars-WG (Racsko et al., 1991b). Bien sûr, certains générateurs de climat sont mixtes, utilisant les deux approches selon la variable climatique analysée. La majorité des générateurs de climat sont uni-site, c'est-à-dire qu'ils génèrent des données synthétiques pour un seul site à la fois. Mais certains générateurs utilisant la méthode de Richardson (1981) ont été modifiés pour permettre l'analyse simultanée de plusieurs sites. Cette approche multisite est décrite par Wilks (1998) et reprise par Qian et al. (2002) et Khalili et al. (2004). Les générateurs décrits dans ce mémoire font partie de la gamme des générateurs utilisant une approche uni-site.

Il existe aussi un outil appelé SDSM « **S**tatistical **D**own**S**caling **M**odel » (Wilby et al., 2002) qui se décrit comme étant un modèle hybride intégrant les caractéristiques d'un générateur stochastique de climat et une méthode basée sur la régression linéaire dans le but de produire des variables climatiques dans un climat futur affecté par les changements climatiques. Ce modèle identifie des relations empiriques entre les données à grande échelle provenant de modèle de circulation générale et les variables climatiques de sites spécifiques pour établir un processus de mise à l'échelle des résultats du modèle de circulation générale. La façon de procéder de cet outil est de calculer les relations statistiques, basées sur des techniques de régression linéaire multiple, entre le climat à grande échelle et celui à l'échelle locale. Ces relations sont développées en utilisant des données climatiques observées et, en faisant l'hypothèse que ces relations demeureront valides dans l'avenir, elles peuvent être utilisées pour obtenir de l'information locale pour une période quelconque dans le futur. Cet outil de mise à l'échelle ne sera pas discuté davantage dans cette étude puisque cette dernière se concentre sur les générateurs stochastiques de climat.

Les deux catégories de générateurs de climat uni-site sur lesquels cette étude se concentre, soit de type Richardson et de type Lars-WG, procèdent de façon similaire. Les deux analysent dans un premier temps les propriétés statistiques des différentes variables climatiques observées pour un site spécifique et, par la suite, utilisent ces résultats avec un générateur de nombre aléatoire pour produire une série de données simulées journalières. De cette façon, les générateurs créent des paramètres de distribution journaliers pour chaque variable climatique.

Ce qui différencie ces deux catégories de générateurs se situe justement au niveau de ces paramètres de distribution et plus particulièrement ceux des probabilités d'occurrences des précipitations. Les variables climatiques les plus fréquemment étudiées par ces générateurs de climat sont les précipitations, les températures maximales et minimales et les radiations solaires. Les variables simulées de températures et de radiations solaires

dépendent de l'état sec ou pluvieux du jour. En effet, les variables climatiques de températures et de radiations solaires dépendent de la couverture nuageuse et, dans le cas des températures, de l'emmagasinement de la chaleur dans le sol. C'est pourquoi les générateurs utilisent différents paramètres de distribution pour ces variables selon l'état du jour. De plus, les températures doivent être corrélées pour tenir compte de l'emmagasinement de la chaleur dans le sol d'une journée à l'autre. Un modèle simulant des variables climatiques journalières devra donc être capable de tenir compte de ces interrelations et des variations saisonnières. La première étape dans la simulation des variables climatiques est donc de déterminer l'état de la journée et de conditionner les trois autres variables pour une journée donnée sur cet état. Les deux types de générateurs de climat, seront maintenant décrits. Il sera expliqué en détail la façon dont chacun procède pour générer chacune des variables climatiques.

1.2.1 Description des générateurs de type Lars-WG

Dans les sections suivantes, Lars-WG est utilisé comme modèle de base pour représenter sa catégorie de générateur de climat. Lars-WG est un générateur stochastique de climat utilisant une approche basée sur les séries pour la génération des variables climatiques. Il a été développé en Grande-Bretagne au « Long Ashton Research Station » pour reproduire diverses catégories de climats à travers l'Europe. Lars-WG est fondé sur le générateur de climat décrit en détail par Racsko et al. (1991b) et Semenov et Barrow (1997). Les variables climatiques analysées et produites par Lars-WG sont les précipitations, les températures maximales et minimales, et les radiations solaires. Les générateurs de type Lars-WG utilisent une distribution semi-empirique pour la génération des séries de jours secs et pluvieux, des quantités de précipitations pour les jours pluvieux et des radiations solaires. Il utilise des données observées pour un site spécifique comme données d'entrée pour définir les paramètres de distribution des différentes variables climatiques ainsi que les corrélations entre ces variables. Par la

suite, le générateur procède à la production de données climatiques synthétiques, basées sur la sélection de valeurs appartenant à la bonne distribution, en utilisant un générateur de nombre aléatoire. La génération des variables climatiques par Lars-WG est maintenant décrite en détail.

1.2.1.1 Génération des précipitations

Ce qui distingue Lars-WG de l'approche de Richardson est la façon dont il procède pour la génération des occurrences de précipitations. Lars-WG se base sur une fonction de distribution semi-empirique pour déterminer la durée des séries de jours secs ou pluvieux. Une fois l'état de la journée déterminé, il procède à la génération de la quantité de pluie pour les jours dont l'état est déterminé comme pluvieux.

1.2.1.1.1 Génération des occurrences de précipitations

Les séries de jours pluvieux et de jours secs sont déterminées selon une fonction de distribution semi-empirique. Les séries pluvieuses et sèches sont alternées et le nombre de jours dans chaque série est calculé de façon empirique. Lorsqu'une série se termine, une nouvelle valeur est sélectionnée à partir de la distribution semi-empirique pour le mois concerné. Une journée considérée comme pluvieuse est une journée avec des précipitations supérieures ou égales à 0.1 mm (dernière version de Lars-WG). Les fonctions de distribution des séries de jours secs et pluvieux et des quantités de précipitations pour les jours pluvieux sont définies mensuellement à l'intérieur du mois dans lequel la série débute. Une distribution semi-empirique $Emp = \{e_0, e_i; h_i, i=1, \dots, 10\}$ est un histogramme possédant dix intervalles, $[e_{i-1}, e_i]$, où $e_{i-1} < e_i$ et h_i représente le nombre d'évènements observés compris dans le $i^{\text{ème}}$ intervalle. Dans le cas d'un jour avec précipitations, $e_0=0$. L'histogramme a pour effet de légèrement adoucir la distribution exacte des valeurs empiriques. Les dimensions des intervalles varient

proportionnellement à la valeur de e_i . Comme il y a, de façon générale pour ce type de distribution, beaucoup plus de petites valeurs que de grandes, la dimension des intervalles augmentent en même temps que la valeur de i augmente. C'est-à-dire que plus le nombre de jours consécutifs secs ou pluvieux est grand, plus la dimension de l'intervalle sera grande. Dans la Figure 1, les valeurs de e_i en abscisse représentent les valeurs des séries de jours pluvieux consécutifs de chaque intervalle et les valeurs en ordonnée représentent la quantité de jours à l'intérieur de chaque intervalle.

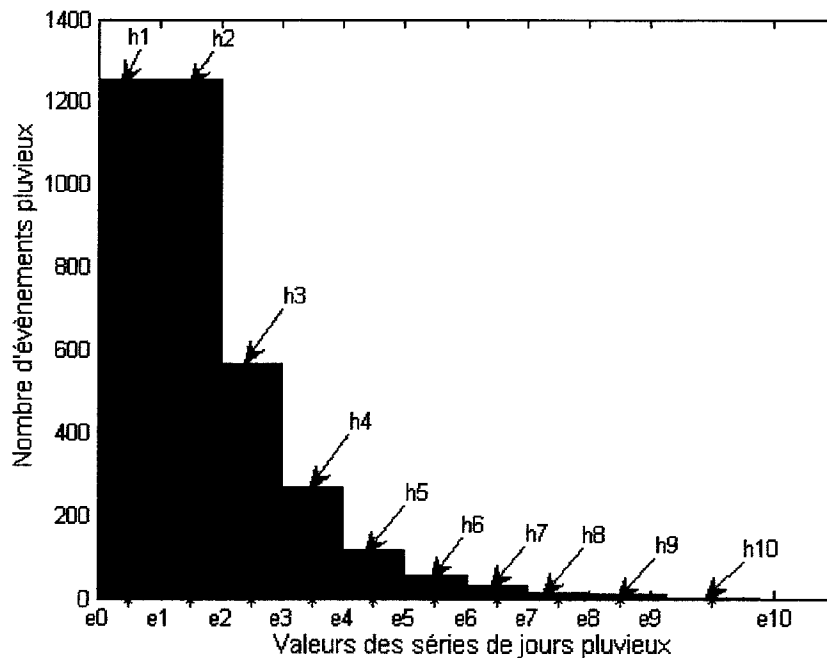


Figure 1 Exemple d'un histogramme de distribution empirique pour les séries de jours pluvieux

À partir de la distribution empirique, une variable aléatoire est choisie premièrement en utilisant la proportion d'évènements à l'intérieur de chaque intervalle comme probabilité et, par la suite, en sélectionnant une valeur à l'intérieur de l'intervalle à partir d'une distribution normale. Une telle distribution est flexible et permet de modéliser une grande variété de distribution en ajustant simplement les intervalles $[e_{i-1}, e_i]$. Par contre,

pour permettre une telle flexibilité, cette façon de procéder requiert 21 paramètres comparativement à d'autres distributions comme la distribution exponentielle, la distribution gamma et la distribution exponentielle mixte qui ne requièrent respectivement qu'un, deux et trois paramètres.

1.2.1.1.2 Génération des quantités de précipitations

Dans les premières versions de Lars-WG, les précipitations étaient générées à partir d'une fonction de distribution exponentielle mixte à 3 paramètres. Maintenant, la valeur des précipitations est générée, de la même façon que les occurrences, à partir de la distribution semi-empirique des précipitations pour un mois spécifique indépendamment de la durée de la série de jours pluvieux ou de la quantité de précipitations du jour précédent. Cette nouvelle façon de procéder permet de mieux reproduire la variabilité des données de précipitations observées. Dans la Figure 2, les valeurs de e_i en abscisse représentent les quantités de précipitations de chaque intervalle et les valeurs en ordonnée représentent la quantité d'évènements pluvieux à l'intérieur de chaque intervalle.

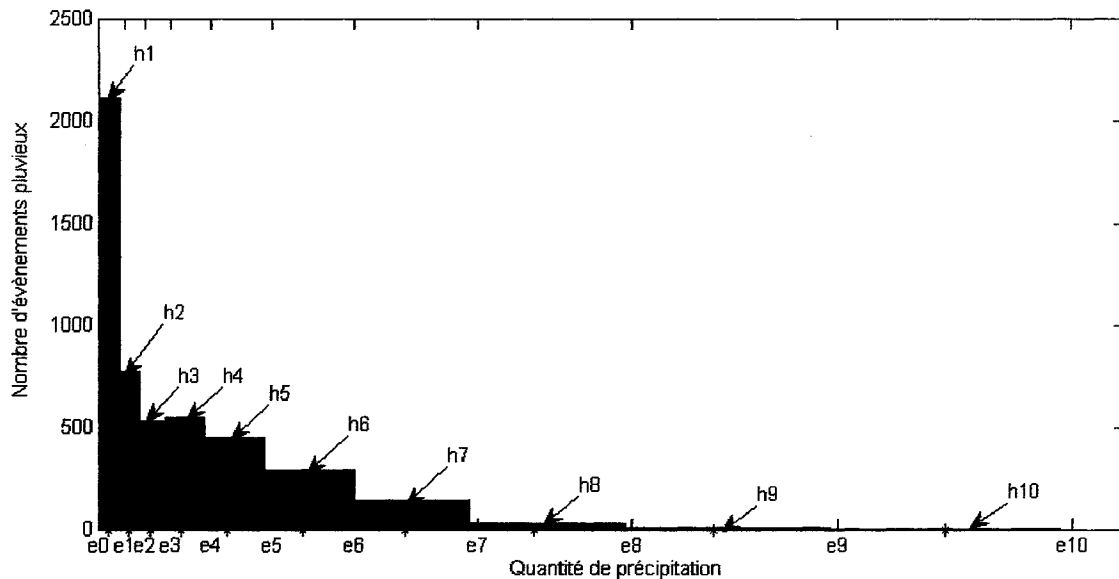


Figure 2 Exemple d'un histogramme de distribution empirique des quantités de précipitations

1.2.1.2 Génération des températures minimales et maximales

Contrairement à la génération des occurrences, des précipitations et des radiations solaires, la génération des températures maximales et minimales est considérée comme un processus stochastique avec une moyenne et un écart-type journaliers conditionnés sur l'état du jour. Les cycles saisonniers des moyennes et des écart-types sont modélisés par une série de Fourier d'ordre 3 et les valeurs résiduelles sont estimées à partir d'une distribution normale. Les séries de Fourier des moyennes sont ajustées aux valeurs moyennes observées de façon mensuelle. Avant d'ajuster les séries de Fourier des écart-types, les écart-types observés pour chaque mois sont ajustés pour donner une estimation moyenne journalière de l'écart-type en soustrayant l'effet estimé des changements de la moyenne à l'intérieur du mois. L'ajustement est calculé en utilisant les séries de Fourier ajustées obtenue préalablement pour la moyenne.

Les valeurs résiduelles observées, obtenues par la soustraction des valeurs moyennes ajustées à partir des données observées, sont utilisées pour l'analyse d'une auto-corrélation temporelle pour chacune des variables de température maximale et de température minimale. Pour simplifier l'analyse, les auto-corrélations sont considérées constantes tout au long de l'année pour les jours secs et pluvieux et les valeurs moyennes provenant des données observées sont utilisées. Les valeurs résiduelles des températures minimales et maximales ont aussi une corrélation croisée pré-établie de 0,6. Il arrive parfois que la température minimale générée pour une journée soit supérieure à la température maximale générée pour cette même journée. Dans ces cas, la valeur de la température minimale générée est remplacée par la valeur de la température maximale générée moins $0,1^{\circ}\text{C}$.

1.2.1.3 Génération des radiations solaires

Tout comme les températures, les radiations solaires sont affectées par l'état sec ou pluvieux du jour. Par conséquent, il est nécessaire d'utiliser des fonctions de distribution distinctes dépendamment de l'état du jour. De la même façon que les occurrences et les quantités de précipitations, les radiations solaires sont générées à l'aide d'une fonction de distribution semi-empirique. Les intervalles de l'histogramme utilisés sont de dimensions égales. Une auto-corrélation est aussi calculée en supposant qu'elle est constante tout au long de l'année. Les radiations solaires sont générées indépendamment des températures. Lorsque des données observées de radiations solaires ne sont pas disponibles pour un site ou pour une certaine période, Lars-WG peut utiliser les données d'heures d'ensoleillement pour les convertir en données de radiations solaires par l'emploi d'une relation de régression entre ces deux variables.

Donc, en résumé, les générateurs de type Lars-WG sont des générateurs stochastiques de climat qui utilisent des fonctions de distribution semi-empirique pour générer des séries

de données synthétiques journalières de précipitations et de radiations solaires et une fonction de distribution normale pour les températures minimales et maximales. Les occurrences sont déterminées selon des séries de jours pluvieux et secs en alternance. Pour les jours faisant partie d'une série de jours pluvieux, la quantité de précipitations est simulée, encore une fois par une distribution semi-empirique. Pour ce qui est des radiations solaires, deux distributions semi-empiriques sont utilisées, une pour les jours secs et une deuxième pour les jours pluvieux. Dans le cas des températures, les valeurs résiduelles, obtenues avec une distribution normale, sont également simulées séparément selon l'état sec ou pluvieux de la journée.

1.2.2 Description des générateurs de type Richardson

Les générateurs de climat de type Richardson sont des modèles stochastiques de simulation de données synthétiques journalières de précipitations, de températures et de radiations solaires basé sur la méthode proposée par Richardson (1981). Comme dans le processus utilisé par Lars-WG, ces générateurs de climat conditionnent les variables climatiques de températures et de radiations solaires sur les occurrences d'un jour sec ou pluvieux. La méthode de génération des occurrences est, par contre, très différente. Les générateurs de type Richardson utilisent une chaîne de Markov à deux états pour produire les occurrences de précipitations.

Comme il a été mentionné plus tôt, plusieurs générateurs de climat sont basés sur la méthode développée par Richardson. Le premier générateur de cette catégorie à avoir vu le jour est WGEN. D'autres générateurs sont apparus avec les années utilisant WGEN comme modèle de base. Ces nouveaux générateurs ont été créés pour ajouter certaines variables climatiques à l'analyse ou simplement pour modifier la procédure de génération des variables climatiques déjà incluses dans WGEN.

Par exemple, les générateurs WXGEN, CLIMGEN et USCLIMATE sont très semblables à WGEN. Dans le cas de WXGEN et CLIMGEN, les variables climatiques d'humidité relative et de vitesse du vent ont été ajoutées au processus pour permettre de tenir compte des impacts de l'érosion sur la productivité dans le domaine de l'agriculture. Également, avec WXGEN le processus de génération des occurrences de précipitations est passé d'une chaîne de Markov du 1^{er} ordre à une chaîne de Markov du 2^{ème} ordre. Avec CLIMGEN et USCLIMATE, en revanche, c'est la fonction de distribution des quantités de précipitations qui a été modifiée. Pour ce qui est de CLIMGEN, la génération des occurrences de précipitations est restée inchangée, mais les variables de vitesse et de direction du vent, de même que de point de rosée, ont été ajoutées. Des modifications ont aussi été apportées à la génération des quantités de précipitations ainsi qu'aux caractéristiques des événements pluvieux tels que la durée et l'intensité maximale. Ces changements permettent de prendre en compte dans la modélisation de l'évapotranspiration, de même que de l'accumulation et de la fonte de la neige.

Pour permettre une description plus générale des générateurs de type Richardson, c'est le générateur de climat WGEN qui sera utilisé dans les sections suivantes pour expliquer le fonctionnement des générateurs de cette catégorie. Comme ce générateur a servi de base à tous les autres générateurs de cette catégorie, il est plus simple de l'utiliser pour la description des processus de génération des différentes variables climatiques. La génération des variables climatiques par WGEN est donc maintenant décrite en détail.

1.2.2.1 Génération des précipitations

Dans la version initiale du générateur de climat WGEN, les précipitations sont simulées à partir d'une chaîne de Markov de 1^e ordre pour la génération des occurrences des jours

secs et pluvieux et une fonction de distribution exponentielle ou gamma pour la génération des quantités de précipitations des jours déterminés comme pluvieux.

1.2.2.1.1 Générations des occurrences de précipitations

Comme mentionné plus tôt, les occurrences de précipitations, selon le modèle proposé par Richardson (1981), sont générées à partir d'une chaîne de Markov de 1^e ordre avec seulement deux états, sec ou pluvieux. Avec une chaîne de Markov de 1^e ordre, les probabilités de précipitations, pour un jour donné, sont conditionnées sur l'état pluvieux ou sec de la journée précédente. Un jour avec des précipitations supérieures à 0,2 mm est considéré comme pluvieux. Si $P11_i$ désigne la probabilité qu'un jour pluvieux i succède à un jour pluvieux $i-1$ et $P01_i$ désigne la probabilité qu'un jour pluvieux i succède à un jour sec $i-1$, alors les équations des probabilités $P10_i$ qu'un jour sec i succède à un jour pluvieux $i-1$ et $P00_i$ qu'un jour sec i succède à un jour sec $i-1$ sont :

$$P10_i = 1 - P11_i \quad (1.1)$$

$$P00_i = 1 - P01_i \quad (1.2)$$

Par conséquent, la probabilité de transition est définie entièrement par $P11_i$, $P01_i$ et l'état pluvieux ou sec du jour $i-1$. Les paramètres $P11_i$ et $P01_i$ sont habituellement bimensuels pour la plupart des sites. Chaque probabilité est calculée à partir des données observées avec une approche de maximum de vraisemblance pour des périodes de 14 jours (26 périodes). Pour simuler correctement ces paramètres tout au long de l'année, il est nécessaire d'appliquer une série de Fourier pour décrire les valeurs quotidiennes. L'équation utilisée pour décrire les séries de Fourier est :

$$v_i = C_0 + \sum_{j=1}^m C_j \cos\left(\frac{ji}{T} + \theta_j\right) \quad (1.3)$$

Où v_i est la valeur du paramètre pour le jour i , C_0 est la moyenne de v_i , T est égal à $365/2\pi$, C_j est l'amplitude et θ_j est l'angle de la phase du $j^{\text{ème}}$ harmonique. Le nombre d'harmoniques des séries de Fourier varie entre 1 et 4. Dans la Figure 3, chaque cercle vert représente la valeur moyenne du paramètre P00 ou P10 pour une période de 14 jours. La courbe bleue est obtenue en procédant à l'application de la méthode du moindre carré et la courbe rouge avec la méthode de maximum de vraisemblance.

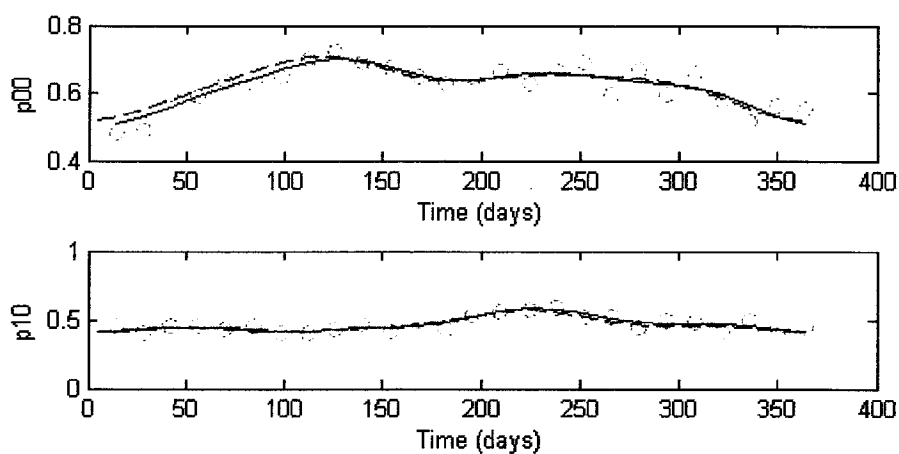


Figure 3 Exemple de séries de Fourier à 4 harmoniques appliquées aux probabilités d'occurrence calculées pour des périodes de 14 jours

Une fois les paramètres des probabilités d'occurrence obtenus avec les séries de Fourier, il devient possible d'obtenir ces probabilités de façon journalière pour le nombre d'années désirées. La façon de procéder est de fixer la première journée ($i-1$) comme étant une journée sèche, de choisir la probabilité d'occurrence $P00_i$ pour le jour i correspondant et de générer un nombre aléatoire entre 0 et 1. Si le nombre généré est supérieur à $P00_i$, le jour i sera considéré comme pluvieux et s'il est inférieur à $P00_i$, il sera considéré comme sec.

1.2.2.1.2 Génération des quantités de précipitations

Plusieurs fonctions de distribution paramétriques peuvent être utilisées pour générer une quantité de précipitations pour les jours pluvieux. Les fonctions de distribution les plus souvent utilisées sont la fonction exponentielle à un paramètre, la fonction gamma à deux paramètres et la fonction exponentielle mixte à trois paramètres. Ces deux dernières distributions représentent, en général, mieux les précipitations que la distribution exponentielle. Les fonctions de distribution disponibles dans WGEN sont la fonction exponentielle et la fonction gamma. La distribution exponentielle possède une fonction de densité de probabilité donnée par :

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad (1.4)$$

Où $f(x)$ est la fonction de densité et λ_i le paramètre de distribution de la fonction exponentielle pour le jour i . La fonction de densité de probabilité de la distribution gamma est donnée par :

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (1.5)$$

Et

$$\Gamma(\alpha) = (\alpha - 1)\Gamma(\alpha - 1) \quad (1.6)$$

Où $f(x)$ est la fonction de densité de la fonction gamma, β_i et α_i sont les paramètres de distribution pour le jour i . De la même façon que les probabilités de transition, les paramètres λ_i , β_i et α_i sont calculés pour des périodes de 14 jours sur la totalité des années analysées. Pour calculer le paramètre λ de la fonction exponentielle, la somme des jours avec précipitations est divisée par la quantité de précipitations totale pour chaque période de 14 jours. Le paramètre β de la fonction gamma est calculé en divisant le paramètre α par la moyenne de la quantité de précipitations par jour de pluie

pour chaque période de 14 jours. Le paramètre α est obtenu, toujours pour des périodes de 14 jours, en divisant le carré de la moyenne des quantités de précipitations par jour de pluie par la variance de cette même quantité. Une série de Fourier est utilisée pour décrire les valeurs quotidiennes de ces paramètres. Un exemple de série de Fourier appliquée aux valeurs périodiques du paramètre λ est présenté à la Figure 4.

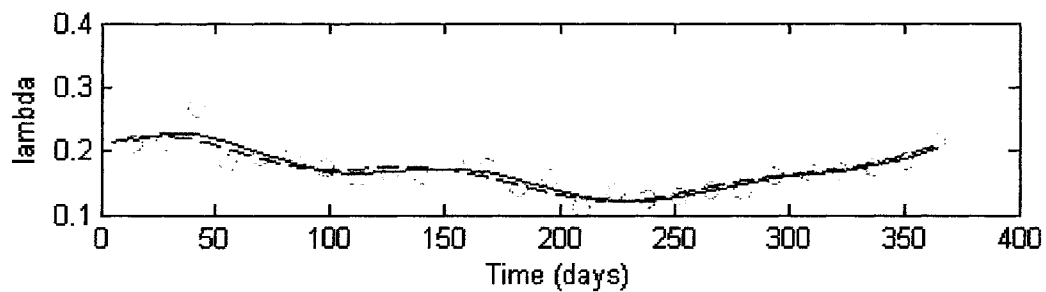


Figure 4 Exemple de séries de Fourier à 4 harmoniques appliquées au paramètre λ calculés pour des périodes de 14 jours

1.2.2.2 Génération des températures et des radiations solaires

L'approche décrite par Richardson pour la simulation des températures et des radiations solaires considère la génération de ces trois variables comme étant un processus stochastique continu multivarié. L'analyse de ces variables se fait avec les moyennes et les écarts-type conditionnés sur l'état sec ou pluvieux du jour. Pour chaque état, les moyennes et les écart-types calculés pour des périodes de 14 jours sont lissés par une série de Fourier à deux harmoniques. Les séries temporelles de ces trois variables sont transformées en valeurs résiduelles en y soustrayant la moyenne et en divisant par l'écart-type. Ces valeurs résiduelles servent, par la suite, à déterminer la dépendance temporelle à l'intérieur de chaque série (auto-corrélation) et l'interdépendance entre chaque variable (corrélation croisée). Les équations utilisées pour obtenir les valeurs résiduelles de chaque variable sont les suivantes :

$$X_{p,i}(j) = \frac{X_{p,i}(j) - \bar{X}_i^0(j)}{\sigma_i^0(j)} \quad \text{Pour les jours secs} \quad (1.7)$$

Et

$$X_{p,i}(j) = \frac{X_{p,i}(j) - \bar{X}_i^1(j)}{\sigma_i^1(j)} \quad \text{Pour les jours pluvieux} \quad (1.8)$$

Où $\bar{X}_i^0(j)$ et $\sigma_i^0(j)$ sont la moyenne et l'écart-type pour un jour sec, $\bar{X}_i^1(j)$ et $\sigma_i^1(j)$ sont la moyenne et l'écart-type pour un jour pluvieux et $X_{p,i}(j)$ est la valeur résiduelle pour la variable j ($j=1$ pour les températures maximales, $j=2$ pour les températures minimales et $j=3$ pour les radiations solaires). Ce procédé permet d'obtenir des séries résiduelles possédant une moyenne égal à 0 et un écart-type égal à un. En général, les séries de résiduelles pour les trois variables sont dépendantes dans le temps et interdépendantes entre elles. Les coefficients d'auto-corrélation et de corrélation croisée sont calculés pour décrire ces relations d'interdépendance et de dépendance temporelle. Ces coefficients sont représentés respectivement par les matrices A et B (Richardson, 1981). Les équations matricielles pour obtenir ces matrices sont :

$$A = M_1 M_0^{-1} \quad (1.9)$$

Et

$$BB^T = M_0 - M_1 M_0^{-1} M_1^T \quad (1.10)$$

Où -1 représente l'inverse de la matrice et T la transposée. Les matrices de covariance M_0 et M_1 , définissant les coefficients de corrélation croisée avec et sans décalage temporel, sont obtenus avec :

$$M_0 = \begin{bmatrix} 1 & \rho_0(1,2) & \rho_0(1,3) \\ \rho_0(2,1) & 1 & \rho_0(2,3) \\ \rho_0(3,1) & \rho_0(3,2) & 1 \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

Et

$$M_1 = \begin{bmatrix} \rho_1(1) & \rho_1(1,2) & \rho_1(1,3) \\ \rho_1(2,1) & \rho_1(2) & \rho_1(2,3) \\ \rho_1(3,1) & \rho_1(3,2) & \rho_1(3) \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

Où $\rho_0(j, k)$ représente le coefficient de corrélation croisée entre les variables j et k sans décalage, $\rho_1(j, k)$ représente le coefficient de corrélation croisé entre les variables j et k avec la variable k décalée d'un jour et $\rho_1(j)$ représente l'auto-corrélation pour la variable j avec un décalage d'un jour. Puisque $\rho_0(j, k)$ est égal à $\rho_0(k, j)$, la matrice M_0 est symétrique. Par contre, puisque $\rho_1(j, k)$ n'est pas égal à $\rho_1(k, j)$, les éléments de M_1 doivent être déterminés séparément. Une fois l'analyse des relations entre les trois variables climatiques et le calcul de leurs coefficients effectués, l'équation utilisée pour la simulation des températures et des radiations solaires est l'équation (1.13) (Richardson, 1981).

$$X_{p,i}(j) = AX_{p,i-1}(j) + B\varepsilon_{p,i}(j) \quad (1.13)$$

Où $X_{p,i}(j)$ et $X_{p,i-1}(j)$ sont des matrices de dimension 3 par 1 pour les jours i et $i-1$ de l'année p dont les éléments sont les résiduelles de chaque variable j et $\varepsilon_{p,i}(j)$ est une matrice de dimension 3 par 1 composée de nombres aléatoires indépendants distribués normalement avec une moyenne de zéro et une variance de un. Finalement, les valeurs journalières pour chacune des trois variables sont obtenues en multipliant les valeurs résiduelles par l'écart-type et en additionnant la moyenne. Évidemment, la moyenne et l'écart-type utilisés pour ce calcul ont été obtenus par les séries de Fourier et conditionnés sur l'état sec ou pluvieux du jour. Le Tableau I fait le résumé des différentes approches utilisées par chacun des générateurs de climat.

Tableau I

Comparaison des procédures utilisées par Lars-WG et WGEN pour générer chaque variable climatique

<i>Variables climatiques</i>	<i>Lars-WG</i>	<i>WGEN</i>
Occurrences des précipitations <ul style="list-style-type: none"> • <i>Définition d'un jour pluvieux</i> • <i>Détermination de l'état d'un jour donné</i> 	Précipitations > 0.1 mm Durée des séries de jours pluvieux et secs déterminée à partir d'une distribution semi-empirique ajustée aux données observées mensuellement.	Précipitations > 0.2 mm Probabilité de transition d'une chaîne de Markov de 1 ^o ordre avec 2 états. Paramètres calculés pour des périodes de 14 jours et interpolés à l'échelle journalière.
Quantité de précipitations <ul style="list-style-type: none"> • <i>Distribution journalière</i> • <i>Paramètres</i> • <i>Corrélation</i> 	Distribution semi-empirique. Paramètres calculés pour chaque mois. Aucune	Distribution paramétrique : exponentielle à un paramètre ou gamma à deux paramètres. Paramètre calculé pour des périodes de 14 jours. Aucune
Température minimale <ul style="list-style-type: none"> • <i>Distribution journalière</i> • <i>Paramètres</i> • <i>Conditionné sur l'état du jour</i> • <i>Corrélation</i> 	Distribution normale La moyenne et l'écart-type varient de façon journalière. Ces paramètres sont obtenus en ajustant des séries de Fourier aux moyennes et aux écart-types des données observées mensuellement tout au long de l'année. Oui, les séries de Fourier sont ajustées séparément pour les jours secs et les jours pluvieux. Auto-corrélation avec décalage de 1 jour constante. Corrélation croisée préétablie entre les températures minimale et maximale.	Distribution normale La moyenne et l'écart-type varient de façon journalière. Ces paramètres sont obtenus en ajustant des séries de Fourier aux moyennes et aux écart-types des données observées pour des périodes de 14 jours tout au long de l'année. Oui, les séries de Fourier sont ajustées séparément pour les jours secs et les jours pluvieux. Auto-corrélation avec décalage de 1 jour constante. Corrélation croisée constante entre les températures minimale et maximale et les radiations solaires.
Température maximale	Même procédure que les températures minimales.	Même procédure que les températures minimales

Tableau I (suite)

<i>Variables climatiques</i>	<i>Lars-WG</i>	<i>WGEN</i>
Radiations solaires		
• <i>Distribution journalière</i>	Distribution semi-empirique.	Distribution normale.
• <i>Paramètres</i>	Paramètres calculés pour chaque mois	La moyenne et l'écart-type varient de façon journalière. Ces paramètres sont obtenus en ajustant des séries de Fourier aux moyennes et aux écarts-types des données observées tout au long de l'année.
• <i>Conditionné sur l'état du jour</i>	Oui, les paramètres sont calculés séparément pour les jours secs et pluvieux.	Oui, les séries de Fourier sont ajustées séparément pour les jours secs et les jours pluvieux.
• <i>Corrélation</i>	Auto-corrélation avec décalage de 1 jour constante.	Auto-corrélation avec décalage de 1 jour constante. Corrélation croisée constante entre les températures minimale et maximale et les radiations solaires.

Adapté de Semenov et al, (1998)

CHAPITRE 2

COMPARAISON DES RÉSULTATS OBTENUS AVEC LARS-WG ET WGEN

De nombreux articles font la comparaison entre les résultats obtenus avec les différents générateurs de climats faisant partie des catégories de type Richardson et de type Lars-WG (Johnson et al., 1995; Qian et al., 2004; Semenov et al., 1998). Les conclusions de ces comparaisons sont souvent dépendantes du type d'utilisation qui est faite des générateurs en question. Par exemple, si le but à atteindre est de reproduire exactement, d'un point de vue statistique, les données observées et de simplement en augmenter la longueur pour l'étude du risque en hydrologie ou en agriculture, Lars-WG est probablement le meilleur candidat. Effectivement, puisqu'il utilise une distribution semi-empirique pour générer les variables climatiques de précipitations et de radiations solaires, il reproduit plus exactement les propriétés statistiques des données observées. Par contre, lorsque le but de l'étude est d'analyser les changements climatiques et les impacts qui en découlent, les générateurs du type Richardson deviennent plus efficaces. Dans ce type de générateur, il est possible de modifier les probabilités de transition pour mieux représenter les effets possibles d'un changement de climat sur les occurrences de précipitations. L'exercice est plus difficile pour Lars-WG puisqu'il faudra modifier la distribution des séries de jours secs et humides qui est définie par le climat actuel de manière semi-empirique. Seule leur durée moyenne pourra être adaptée. Voyons maintenant en détail les différents résultats de la comparaison des résultats obtenus avec ces deux générateurs de climat.

2.1 Choix de la station climatologique

Une station climatologique a été sélectionnée pour la comparaison des résultats obtenus avec Lars-WG et WGEN. Cette station est la station de Dorval située à une latitude de

45°28', une longitude de 73°45' et une altitude de 76 mètres. Cette station possède de nombreuses années de données mais seulement 30 années ont été utilisées dans ce travail pour les variables climatiques de précipitations et de températures maximales et minimales, soit de 1971 à 2000. Dorval fait partie de la région climatique B₁ B'₁ de la classification de Thornthwaite (1948). Cette classification a été développée à partir du concept d'évapotranspiration. Thornthwaite s'est basé sur la notion d'évapotranspiration virtuelle, c'est-à-dire l'évapotranspiration que produirait une surface couverte de végétation si les conditions d'humidité du sol étaient suffisantes pour une transpiration illimitée. Pour la station Dorval, B₁ signifie qu'il s'agit d'un type de climat hydrique humide de premier niveau et B'₁ un type de climat thermique mésothermique (voir annexe 1).

Les radiations solaires ne font pas partie de l'analyse car il y a trop peu de stations au Québec offrant un historique de données observées assez long pour produire les paramètres de génération de cette variable. De plus, comme les radiations solaires n'ont aucun effet sur la simulation des occurrences et des quantités de précipitations, le sujet visé par cette étude, leur élimination de l'analyse n'affecte pas les résultats obtenus.

2.2 Critères de comparaison

Les critères de comparaison utilisés toucheront seulement les différents aspects des précipitations et des températures. Les indices sont basés sur ceux développés dans le cadre du projet STARDEX (<http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardexStatistical>). Ces indices ont été développés en premier lieu par Tom Peterson et Byron Gleason en 1999 dans le cadre du programme « Climate Indices » du « US National Climatic Data Centre ». Cette première version contenait une vingtaine d'indices. Par la suite, d'autres indices ont été ajoutés à la liste par Malcom Haylock du « Australian Bureau of Meteorology » et par Colin Harpham du « King's College London ». STARDEX a entre

autres résulté en la création d'un logiciel de calcul de ces indices comprenant deux éléments : une sous-routine en Fortran calculant tous les indices et un programme utilisant la sous-routine pour produire des données de sortie dans un format standard. Dans le cadre de cette recherche, seuls les indices concernant les précipitations et les températures moyennes ont été conservés et reprogrammés en Matlab pour en faciliter l'utilisation avec la version de WGEN programmée dans ce langage. Les définitions des indices STARDEX ont été choisies pour la comparaison car elles concentrent l'analyse sur les extrêmes des différentes variables climatiques. L'analyse a été axée sur les extrêmes car c'est sur cet aspect de la génération des données climatiques que WGEN montre une faiblesse. De plus, les changements climatiques auront des répercussions particulièrement sur ces extrêmes.

Les données observées et simulées ont été analysées de façon saisonnière. Les années comptent 365 jours et ne considèrent pas les années bissextiles. L'été comprend les mois de juin, juillet et août, l'automne les mois de septembre, octobre et novembre, l'hiver les mois de décembre, janvier et février et finalement, le printemps comprend les mois de mars, avril et mai. Les matrices de données observées de précipitations et de températures utilisées pour l'analyse des indices ne considèrent pas les années avec plus de 20% de données manquantes. Les jours avec précipitations sont déterminés selon une valeur « limite » définie par l'utilisateur. Si les précipitations ne dépasse pas cette valeur limite, le jour est considéré sec. Les indices sont divisés en 4 parties, soit ceux relatifs à la distribution des précipitations, à la quantité de précipitations, aux séries de jours secs et pluvieux et ceux relatifs aux températures moyennes. Ces différents indices sont décrits dans le Tableau II.

Tableau II

Résumé des indices STARDEX utilisés pour l'analyse de comparaison des variables climatiques simulées avec Lars-WG et WGEN

<i>Noms</i>	<i>Équations</i>	<i>Définitions</i>
<i>Indices relatifs à la distribution des précipitations</i>		
Prec_perc 20, 40, 50, 60, 80, 90, 95, 99 (mm)	$\text{Rang } X_p = (X/100 * (W + 0.2)) + 0.4$ $\text{prec_perc}X =$ la valeur correspondant au rang calculé est obtenue par une interpolation linéaire entre les deux valeurs les plus proches.	Percentiles des précipitations totales où W représente le nombre de jours avec précipitations et X le percentile (Cunnane, 1978).
Prec_quant 20, 40, 50, 60, 80, 90, 95, 99	$\text{prec_quant}X = \frac{\sum P_{wj} \geq \text{prec_perc}X}{\sum P_{wj}}$	Fraction des précipitations totales au dessus de la valeur du percentile X où P_{wj} représente les précipitations journalières de la période j .
<i>Indices relatifs aux quantités de précipitations</i>		
Prec_mean (mm)	$\text{prec_mean} = \sum_1^w P_{ij} / D$	Moyenne climatologique où D représente le nombre de jours total et P_{ij} la quantité de précipitations totale au jour i de la période j .
Prec>10mm (jours)	$\text{Rthresh} = P_{ij} > 10 \text{ mm}$	Nombre de jours dont la quantité de précipitations journalière est supérieure à 10 mm où P_{ij} est la quantité de précipitations pour le jour i de la période j .
Max_rainfall_3d (mm)	$\text{Max_rainfall_3d} = \max(P_j)$	Quantité de précipitations maximale pour une période de 3 jours où P_j représente la quantité de précipitations totale pour 3 jours consécutifs.
Max_rainfall_5d (mm)	$\text{Max_rainfall_5d} = \max(P_j)$	Quantité de précipitations maximale pour une période de 5 jours où P_j représente la quantité de précipitations totale pour 5 jours consécutifs.
Max_rainfall_10d (mm)	$\text{Max_rainfall_10d} = \max(P_j)$	Quantité de précipitations maximale pour une période de 10 jours où P_j représente la quantité de précipitations totale pour 10 jours consécutifs.
Rain_per_rainday (mm)	$\text{SDII}_j = \sum_{w=1}^w P_{wj} / W$	Intensité des précipitations où P_{wj} représente la quantité de précipitations pour un jour pluvieux de la période j et W le nombre de jours avec précipitations dans la période j .
<i>Indices relatifs aux séries de jours secs et pluvieux</i>		
Consec_dry_day (jours)	$\text{CDD}_j = \max(P_{ij} (\text{conséc.}) \leq \text{valeur limite})$	Nombre maximum de jours secs consécutifs où P_{ij} représente la quantité de précipitations pour le jour i de la période j .

Tableau II (suite)

<i>Noms</i>	<i>Équations</i>	<i>Définitions</i>
Consec_wet_day (jours)	$CWDj = \max (P_{ij} \text{ (conséc.)} > \text{threshold})$	Nombre maximum de jours pluvieux consécutifs où P_{ij} représente la quantité de précipitations pour le jour i de la période j .
Wet_day_pers	$Pwwj = \text{totalPww}_j / \text{totalPw}_j$	Persistance des jours pluvieux où totalPww_j représente le nombre de séries de 2 jours pluvieux consécutifs pour la période j et totalPw_j le nombre total de jours pluvieux pour la période j .
Dry_day_pers	$Pddj = \text{totalPdd}_j / \text{totalPd}_j$	Persistance des jours secs où totalPdd_j représente le nombre de séries de 2 jours secs consécutifs pour la période j et totalPd_j le nombre total de jours secs pour la période j .
Corr_spell_lengths	$\text{Corr_spell_lengths} = Pwwj - (1 - Pddj)$	Corrélation entre les séries de jours secs consécutifs et les séries de jours pluvieux consécutifs.
Wet_spell_mean (jours)	$\text{Wet_spell_mean} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	Durée moyenne des séries de jours pluvieux où x_i représente la durée de la série de jours pluvieux consécutifs et i représente le nombre de séries de jours humides ($i=1 \dots n$).
Wet_spell_sd (jours)	$\text{Wet_spell_sd} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$	Écart-type des séries de jours pluvieux où x_i représente la durée de la série de jours pluvieux consécutifs et i représente le nombre de séries de jours humides ($i=1 \dots n$).
Dry_spell_50thperc (jours)		Médiane des séries de jours pluvieux.
Dry_spell_mean (jours)	$\text{Dry_spell_mean} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$	Durée moyenne des séries de jours secs où x_i représente la durée de la série de jours secs consécutifs et i représente le nombre de séries de jours secs ($i=1 \dots n$).
Dry_spell_sd (jours)	$\text{Dry_spell_sd} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$	Écart-type des séries de jours secs où x_i représente la durée de la série de jours secs consécutifs et i représente le nombre de séries de jours secs ($i=1 \dots n$).
Dry_spell_50thperc (jours)		Médiane des séries de jours secs.
P00	$P00 = \frac{\sum occ00}{\sum occ00 + occ01}$	Probabilité d'occurrence d'un jour sec suivant un jour sec où occ00 est l'occurrence d'un jour sec suivant un jour sec et occ01 l'occurrence d'un jour pluvieux suivant un jour sec.
P10	$P10 = \frac{\sum occ10}{\sum occ10 + occ11}$	Probabilité d'occurrence d'un jour sec suivant un jour pluvieux où occ10 est l'occurrence d'un jour sec suivant un jour pluvieux et occ11 l'occurrence d'un jour pluvieux suivant un jour pluvieux.

Tableau II (suite)

<i>Noms</i>	<i>Équations</i>	<i>Définitions</i>
<i>Indices relatifs aux températures</i>		
Temp_max (°C)	$\text{temp_max} = \sum_1^w Tx_{ij} / D$	Température maximales moyenne où Tx_{ij} représente la valeur de la température maximale au jour i de la période j et D le nombre total de jours.
Temps_min (°C)	$\text{temp_min} = \sum_1^w Tn_{ij} / D$	Température minimales moyenne où Tn_{ij} représente la valeur de la température minimale au jour i de la période j et D le nombre total de jours.

2.3 Comparaison des résultats

Les différents résultats obtenus avec les deux types de générateurs pour la station Dorval sont présentés du Tableau III au Tableau V ainsi qu'aux Figures 5 à 8. Les résultats sont séparés de façon saisonnière selon leurs catégories de variables climatiques analysées. Les valeurs simulées obtenues sont la moyenne de trente simulations de 300 années chacune. Les différences entre les indices calculés pour les données observées et simulées sont calculées en soustrayant aux valeurs observées les valeurs simulées et en divisant ces résultats par les mêmes valeurs observées. Les valeurs de différences supérieures à 5% sont représentées en rouge car elles signalent que les valeurs simulées de ces indices sont considérées comme différentes des valeurs observées. Les indices sont représentés par leur nom de programmation mentionné dans le Tableau II. Les unités de mesure de chaque indice sont indiquées entre parenthèses dans la première colonne du Tableau II. La valeur limite choisie pour la détermination d'un jour pluvieux est de 0,25 mm pour l'ensemble des analyses. Cette valeur de 0,25 mm a été sélectionnée car elle est souvent utilisée dans les différents articles portant sur l'analyse de performance des générateurs de climat.

2.3.1 Résultats de la comparaison des distributions de précipitations

La génération adéquate de la distribution et des quantités de précipitations est très importante dans l'étude des inondations et des risques d'érosion. Pour générer les quantités de précipitations, Lars-WG utilise une distribution semi-empirique et WGEN une distribution exponentielle ou gamma. Pour WGEN, la fonction gamma est utilisée dans le cadre de cette comparaison. Le Tableau III et les Figure 5 et Figure 6 montrent les résultats obtenus pour les indices de distribution des précipitations. Les résultats démontrent qu'avec la fonction de distribution gamma utilisée par WGEN, les petits percentiles sont sous-estimés. Ce phénomène se retrouve à toutes les saisons mais il est particulièrement prononcé en hiver où le pourcentage de différence atteint 50% pour la valeur du 20^e percentile donc une surestimation de la valeur du percentile d'environ 0,37 mm. Si, par contre, on considère la valeur du percentile et non le pourcentage de différence, les surestimations des petits percentiles sont du même ordre de grandeur pour toutes les saisons. À l'automne, la valeur du 99^e percentile est sous-estimée signifiant que les précipitations extrêmes ne sont pas reproduites adéquatement par WGEN. Quant aux fractions des précipitations totales, elles sont, de façon générale, sous-estimées pour tous les percentiles mais particulièrement pour les valeurs supérieures au 60^e percentile.

La Figure 5 montre graphiquement les résultats des probabilités cumulatives des précipitations observées et simulées avec Lars-WG et WGEN, en prenant le mois d'octobre comme exemple. Avec WGEN, les probabilités cumulatives des précipitations inférieures à 15 mm sont sous-estimées démontrant encore une fois la sous-estimation des petites précipitations par WGEN. Pour les précipitations au-dessus de 15 mm, c'est l'inverse qui se produit, les probabilités cumulatives sont surestimées et par conséquent les occurrences de ces précipitations sont surestimées sauf pour les précipitations supérieures au 99^e percentile qui, elles, sont sous-estimées. Dans le cas de Lars-WG, la distribution semi-empirique reproduit presque exactement la distribution des données observées. Avec Lars-WG, les probabilités d'occurrence des petites et plus grandes

précipitations proviennent directement des données observées. Comme le démontre la Figure 6, les précipitations générées par Lars-WG suivent presque exactement la distribution des précipitations observées même au niveau des précipitations au dessus du 99^e percentile. Par contre, même si Lars-WG réussit à reproduire les précipitations extrêmes actuelles, il n'est pas certain que leur probabilité d'occurrence dans un climat et un temps donné soit vraisemblable. Un évènement extrême se produisant au cours d'une année particulière n'est pas nécessairement un évènement qui se reproduira dans les années suivantes.

Tableau III

Résultats obtenus à la stations Dorval pour la comparaison des distributions de précipitations

<i>Indices</i>	<i>observés</i>	<i>Lars-WG</i>	<i>Différences</i>	<i>WGEN</i>	<i>Différences</i>
<i>Été</i>					
<i>prec_perc20</i>	1,2363	1,1081	-10%	1,6151	31%
<i>prec_perc40</i>	2,8587	2,8149	-2%	3,7084	30%
<i>prec_perc50</i>	4,2883	4,2033	-2%	5,1683	21%
<i>prec_perc60</i>	6,2064	6,1502	-1%	7,0639	14%
<i>prec_perc80</i>	13,1950	12,8291	-3%	13,4207	2%
<i>prec_perc90</i>	20,2910	20,2824	-0%	20,2342	0%
<i>prec_perc95</i>	28,6750	27,9887	-2%	27,6405	-4%
<i>prec_perc99</i>	37,6530	38,3059	2%	37,4162	-1%
<i>prec_quant20</i>	0,9847	0,9834	0%	0,9773	-1%
<i>prec_quant40</i>	0,9349	0,9341	0%	0,9135	-2%
<i>prec_quant50</i>	0,8905	0,8928	0%	0,8645	-3%
<i>prec_quant60</i>	0,8232	0,8220	0%	0,7851	-5%
<i>prec_quant80</i>	0,5813	0,5873	1%	0,5455	-6%
<i>prec_quant90</i>	0,3762	0,3752	0%	0,3435	-9%
<i>prec_quant95</i>	0,2220	0,2253	1%	0,1972	-11%
<i>prec_quant99</i>	0,1458	0,1481	2%	0,1458	0%

Tableau III (suite)

<i>Indices</i>	<i>observés</i>	<i>Lars-WG</i>	<i>Différences</i>	<i>WGEN</i>	<i>Différences</i>
<i>Automne</i>					
<i>prec_perc20</i>	1,0581	1,0119	-4%	1,3870	31%
<i>prec_perc40</i>	2,4983	2,6248	5%	3,2089	28%
<i>prec_perc50</i>	3,6700	3,8588	5%	4,5057	23%
<i>prec_perc60</i>	5,4339	5,6261	4%	6,2014	14%
<i>prec_perc80</i>	10,6770	11,4838	8%	11,9287	12%
<i>prec_perc90</i>	18,2330	18,5065	2%	18,1474	0%
<i>prec_perc95</i>	25,7770	26,9745	5%	24,9265	-3%
<i>prec_perc99</i>	40,2870	42,1459	5%	34,6105	-14%
<i>prec_quant20</i>	0,9849	0,9836	0%	0,9777	-1%
<i>prec_quant40</i>	0,9357	0,9348	0%	0,9158	-2%
<i>prec_quant50</i>	0,8949	0,8938	0%	0,8677	-3%
<i>prec_quant60</i>	0,8260	0,8248	0%	0,7900	-4%
<i>prec_quant80</i>	0,5989	0,5973	0%	0,5523	-8%
<i>prec_quant90</i>	0,3907	0,3942	1%	0,3504	-10%
<i>prec_quant95</i>	0,2545	0,2491	-2%	0,2075	-18%
<i>prec_quant99</i>	0,1510	0,1576	4%	0,1435	-5%
<i>Hiver</i>					
<i>prec_perc20</i>	0,7507	0,7893	5%	1,1273	50%
<i>prec_perc40</i>	1,7981	1,7236	-4%	2,5085	40%
<i>prec_perc50</i>	2,6350	2,5634	-3%	3,4960	33%
<i>prec_perc60</i>	3,8568	3,8598	0%	4,7539	23%
<i>prec_perc80</i>	8,7699	8,9469	2%	8,9991	3%
<i>prec_perc90</i>	14,3870	14,4954	1%	13,6329	-5%
<i>prec_perc95</i>	19,5760	19,7954	1%	18,4957	-6%
<i>prec_perc99</i>	26,8000	27,8271	4%	26,4827	-1%
<i>prec_quant20</i>	0,9824	0,9819	0%	0,9753	-1%
<i>prec_quant40</i>	0,9383	0,9358	0%	0,9110	-3%
<i>prec_quant50</i>	0,8999	0,8983	0%	0,8612	-4%
<i>prec_quant60</i>	0,8325	0,8353	0%	0,7831	-6%
<i>prec_quant80</i>	0,6155	0,6085	-1%	0,5459	-11%
<i>prec_quant90</i>	0,3908	0,3907	0%	0,3460	-11%
<i>prec_quant95</i>	0,2235	0,2292	3%	0,2105	-6%
<i>prec_quant99</i>	0,1246	0,1299	4%	0,1278	3%
<i>Printemps</i>					
<i>prec_perc20</i>	1,0153	0,9799	-3%	1,3804	36%
<i>prec_perc40</i>	2,4755	2,4588	-1%	3,0605	24%
<i>prec_perc50</i>	3,5067	3,6298	4%	4,2072	20%

Tableau III (suite)

<i>Indices</i>	<i>observés</i>	<i>Lars-WG</i>	<i>Différences</i>	<i>WGEN</i>	<i>Différences</i>
<i>prec_perc60</i>	4,9605	5,1577	4%	5,6865	15%
<i>prec_perc80</i>	10,3750	10,4156	0%	10,5466	2%
<i>prec_perc90</i>	16,3180	16,2542	0%	15,6759	-4%
<i>prec_perc95</i>	21,9200	22,1991	1%	21,1857	-3%
<i>prec_perc99</i>	28,6100	29,1722	2%	29,1880	2%
<i>prec_quant20</i>	0,9836	0,9816	0%	0,9747	-1%
<i>prec_quant40</i>	0,9300	0,9288	0%	0,9073	-2%
<i>prec_quant50</i>	0,8842	0,8844	0%	0,8559	-3%
<i>prec_quant60</i>	0,8143	0,8108	0%	0,7751	-5%
<i>prec_quant80</i>	0,5744	0,5723	0%	0,5346	-7%
<i>prec_quant90</i>	0,3670	0,3626	-1%	0,3355	-9%
<i>prec_quant95</i>	0,2128	0,2154	1%	0,1985	-7%
<i>prec_quant99</i>	0,1313	0,1318	0%	0,1337	2%

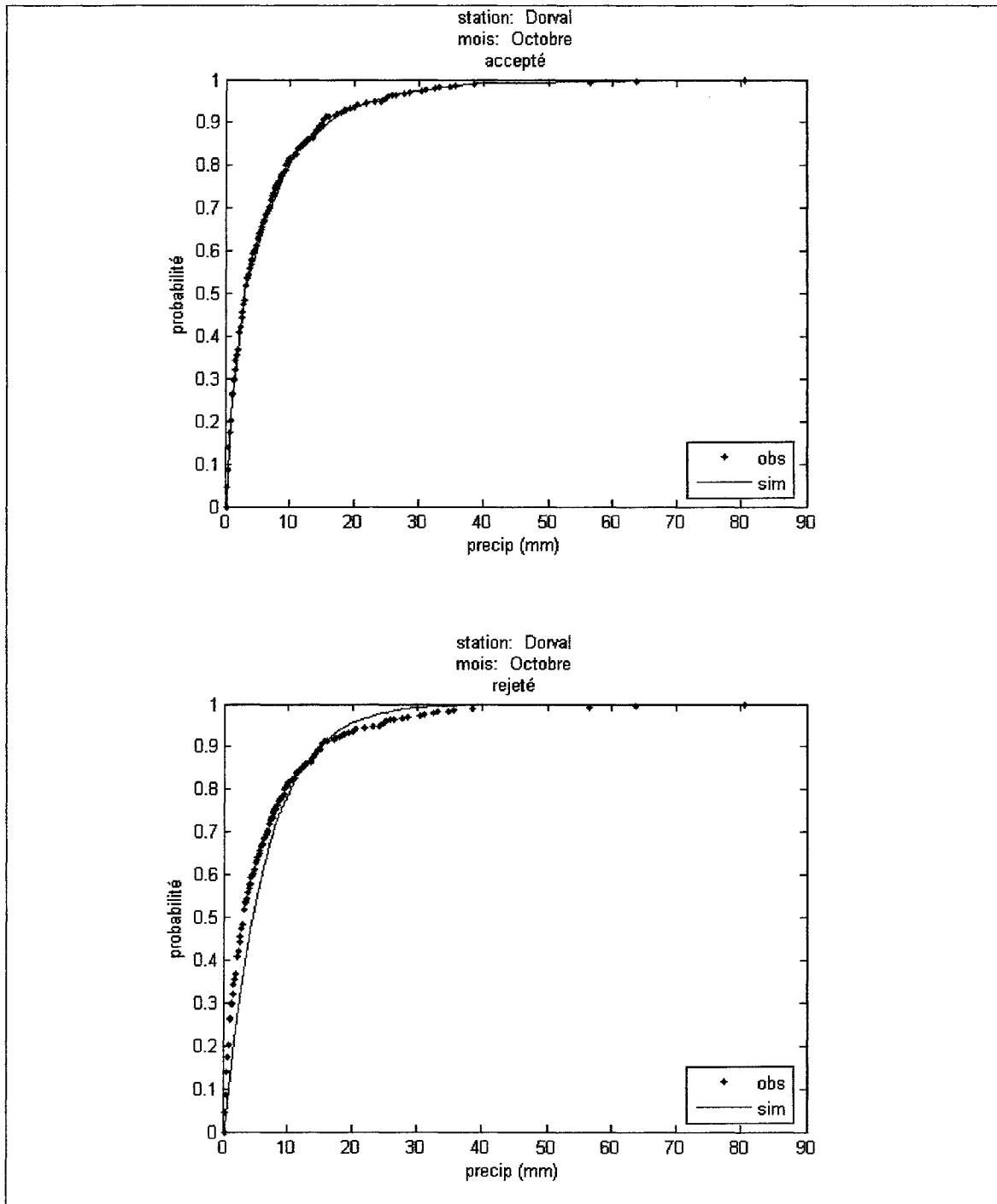


Figure 5 Probabilités cumulatives des distributions de précipitations simulées par Lars-WG (en haut) et WGEN (en bas) pour la station Dorval au mois d'octobre

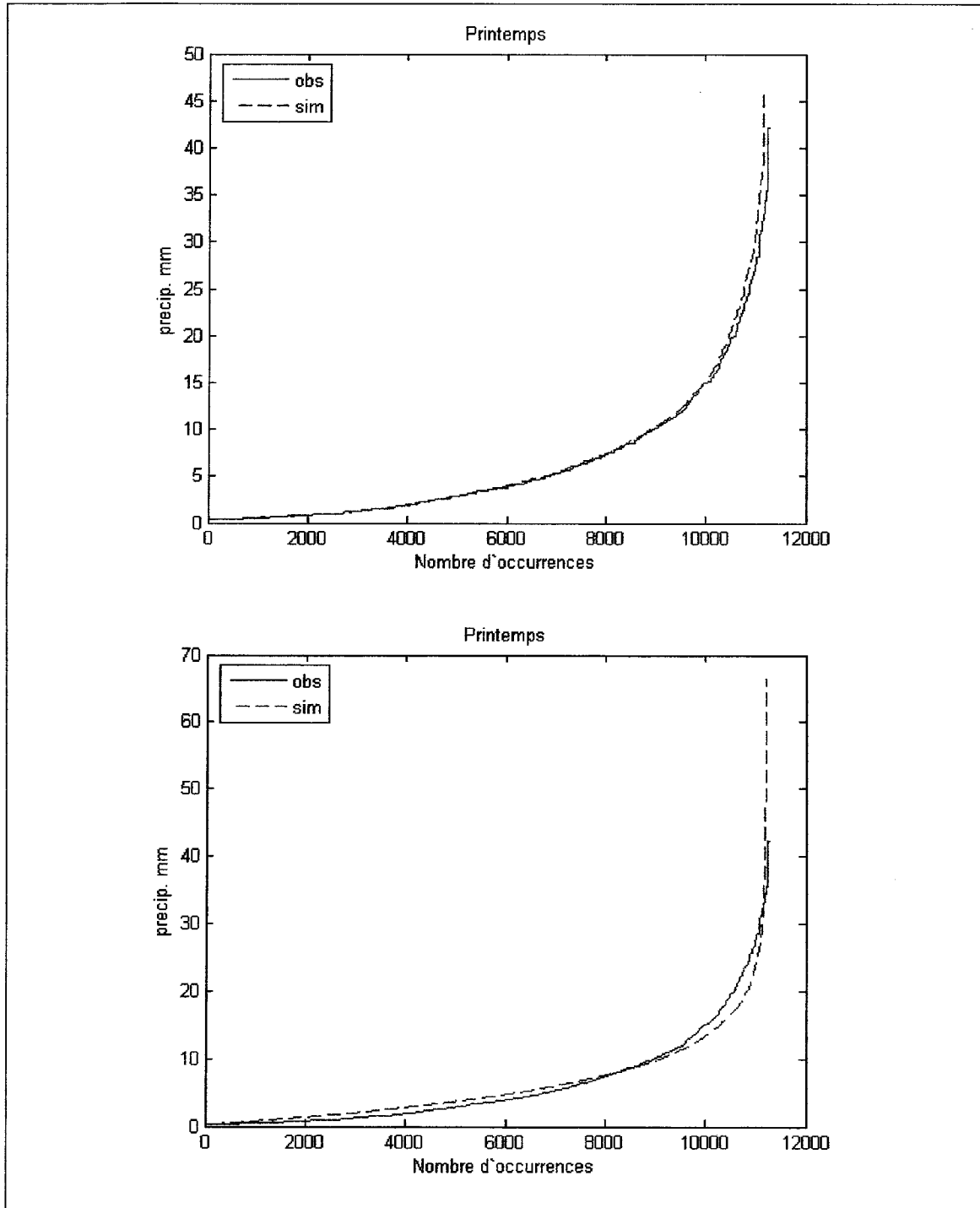


Figure 6 Distribution des précipitations observées et simulées par Lars-WG (en haut) et WGEN (en bas) pour la station Dorval au printemps

2.3.2 Résultats de la comparaison des quantités de précipitations

Les deux types de générateurs réussissent à bien générer les moyennes de précipitations observées. Les résultats obtenus avec les deux générateurs sont montrés dans le Tableau IV. Même si WGEN ne réussit pas à reproduire correctement la distribution des probabilités d'occurrence et des quantités de précipitations journalières, la méthode utilisée réussit à recréer le comportement moyen. Les moyennes climatologiques (`prec_mean`) sont donc relativement bien simulées, sauf à l'automne où la moyenne est légèrement sous-estimée. Par contre, les événements extrêmes (`max_rainfall_3d`, `max_rainfall_5d` et `max_rainfall_10d`) de précipitations sont sous-estimés par la fonction de distribution gamma utilisé par WGEN à l'automne et à l'hiver. Avec Lars-WG, les quantités de précipitations sont bien reproduites pour l'ensemble des saisons. La principale lacune commune aux deux types de générateurs se situe au niveau de la variance interannuelle des données synthétiques. Les données simulées ont tendance à sous-estimer cette variabilité. La raison probable de cette sous-estimation est le fait que, dans les deux cas, les probabilités d'occurrence et les quantités de précipitations sont générées séparément. Une série de jours consécutifs avec des précipitations importantes est difficilement reproductible puisque chaque quantité de précipitations journalières est générée à partir d'un nombre aléatoire indépendant. Une solution possible à ce problème serait d'inclure dans l'analyse de ces paramètres une variable basée sur les patrons de circulation atmosphérique et de conditionner la distribution des précipitations sur cette variable.

Tableau IV

Résultats obtenus à la station Dorval pour la comparaison des quantités de précipitations

<i>Indices</i>	<i>observés</i>	<i>Lars-WG</i>	<i>Différences</i>	<i>WGEN</i>	<i>Différences</i>
<i>Été</i>					
<i>prec_mean</i>	2,8976	2,8857	0%	2,8404	-2%
<i>prec>10mm</i>	9,2000	8,8257	-4%	8,9836	-2%
<i>max_rainfall_3d</i>	51,5800	50,6815	-2%	49,9908	-3%
<i>max_rainfall_5d</i>	59,8970	59,9748	0%	59,4658	-1%
<i>max_rainfall_10d</i>	77,6230	79,2443	2%	78,7717	1%
<i>rain_per_rainday</i>	7,7755	7,6364	-2%	8,1663	5%
<i>Automne</i>					
<i>prec_mean</i>	2,8947	2,9535	2%	2,6981	-7%
<i>prec>10mm</i>	8,3000	8,5813	3%	8,2180	-1%
<i>max_rainfall_3d</i>	53,7730	53,8069	0%	46,2607	-14%
<i>max_rainfall_5d</i>	61,0800	62,9146	3%	54,8863	-10%
<i>max_rainfall_10d</i>	76,4430	82,2009	8%	72,6602	-5%
<i>rain_per_rainday</i>	6,9021	7,1993	4%	7,2794	5%
<i>Hiver</i>					
<i>prec_mean</i>	2,4516	2,4538	0%	2,3337	-5%
<i>prec>10mm</i>	7,3333	7,2841	-1%	6,3190	-14%
<i>max_rainfall_3d</i>	37,8700	38,1442	1%	36,0412	-5%
<i>max_rainfall_5d</i>	46,4070	46,0003	-1%	43,2221	-7%
<i>max_rainfall_10d</i>	64,6330	62,3849	-3%	58,4365	-10%
<i>rain_per_rainday</i>	5,1934	5,2488	1%	5,5354	7%
<i>Printemps</i>					
<i>prec_mean</i>	2,5118	2,5018	0%	2,4245	-3%
<i>prec>10mm</i>	7,7000	7,7203	0%	7,2376	-6%
<i>max_rainfall_3d</i>	40,1700	41,0785	2%	40,4901	1%
<i>max_rainfall_5d</i>	48,0030	49,5274	3%	48,6159	1%
<i>max_rainfall_10d</i>	63,5770	66,5712	5%	65,1228	2%
<i>rain_per_rainday</i>	6,1321	6,2030	1%	6,4611	5%

2.3.3 Résultats de la comparaison des séries de jours secs et pluvieux

Pour générer les séries de jours secs et pluvieux, WGEN utilise une chaîne de Markov de 1^{er} ordre à deux états et Lars-WG une distribution semi-empirique. Le Tableau V

montre les résultats obtenus avec les deux types de générateurs pour la comparaison des indices relatifs aux séries de jours secs et pluvieux. Les tests effectués sur les résultats obtenus avec WGEN montrent qu'une chaîne de Markov de 1^{er} ordre seulement ne permet pas de bien représenter l'ensemble des caractéristiques de la distribution des séries de jours secs et pluvieux. En considérant seulement l'état de la journée précédente dans l'analyse de la probabilité de transition, on diminue la capacité de mémoire du processus. Il devient donc difficile de reproduire les longues séries de jours secs ou pluvieux. Pour ce qui est de Lars-WG, sa distribution semi-empirique implique une meilleure représentation de ces séries car il prend en compte, dans sa distribution semi-empirique, toutes les séries observées.

Tableau V

Résultats obtenus à la station Dorval pour la comparaison des séries de jours secs et pluvieux

<i>Indices</i>	<i>observés</i>	<i>Lars-WG</i>	<i>Différences</i>	<i>WGEN</i>	<i>Différences</i>
<i>Été</i>					
<i>consec_dry_day</i>	8,4333	9,2870	10%	10,0209	19%
<i>consec_wet_day</i>	4,5667	4,6932	3%	4,5838	0%
<i>wet_day_pers</i>	0,4401	0,4381	0%	0,4135	-6%
<i>dry_day_pers</i>	0,6567	0,6593	0%	0,6882	5%
<i>corr_spell_lengths</i>	0,0968	0,0974	1%	0,1017	5%
<i>wet_spell_mean</i>	1,8293	1,8041	-1%	1,7339	-5%
<i>wet_spell_sd</i>	1,0632	1,0902	3%	1,0772	1%
<i>wet_spell_50thperc</i>	1,4667	1,4033	-4%	1,2482	-15%
<i>dry_spell_mean</i>	2,9939	2,9781	-1%	3,2546	9%
<i>dry_spell_sd</i>	2,1635	2,3188	7%	2,5890	20%
<i>dry_spell_50thperc</i>	2,3667	2,3053	-3%	2,4523	4%
<i>p00</i>	0,6414	0,6454	1%	0,6927	4%
<i>p10</i>	0,5261	0,5225	-1%	0,5773	4%
<i>Automne</i>					
<i>consec_dry_day</i>	8,7667	8,7007	-1%	9,4349	8%
<i>consec_wet_day</i>	5,2667	5,0850	-3%	4,8332	-8%
<i>wet_day_pers</i>	0,4932	0,4739	-4%	0,4355	-12%
<i>dry_day_pers</i>	0,6394	0,6345	-1%	0,6687	5%

Tableau V (suite)

<i>Indices</i>	<i>observés</i>	<i>Lars-WG</i>	<i>Différences</i>	<i>WGEN</i>	<i>Différences</i>
<i>corr_spell_lengths</i>	0,1326	0,1084	-18%	0,1042	-21%
<i>wet_spell_mean</i>	2,0203	1,9267	-5%	1,8016	-11%
<i>wet_spell_sd</i>	1,2528	1,1986	-4%	1,1430	-9%
<i>wet_spell_50thperc</i>	1,6333	1,5488	-5%	1,3093	-20%
<i>dry_spell_mean</i>	2,7703	2,7780	0%	3,0672	11%
<i>dry_spell_sd</i>	2,1650	2,1728	0%	2,4164	12%
<i>dry_spell_50thperc</i>	1,9833	2,0919	5%	2,3260	17%
<i>p00</i>	0,6425	0,6394	0%	0,6733	5%
<i>p10</i>	0,4947	0,5178	5%	0,5545	12%
<i>Hiver</i>					
<i>consec_dry_day</i>	7,8000	7,4810	-4%	7,7708	-0%
<i>consec_wet_day</i>	5,7333	5,8096	1%	5,1561	-10%
<i>wet_day_pers</i>	0,5229	0,5126	-2%	0,4550	-13%
<i>dry_day_pers</i>	0,5655	0,5731	1%	0,6050	7%
<i>corr_spell_lengths</i>	0,0884	0,0857	-3%	0,0601	-32%
<i>wet_spell_mean</i>	2,1337	2,0788	-3%	1,8628	-13%
<i>wet_spell_sd</i>	1,3636	1,3700	0%	1,2089	-11%
<i>wet_spell_50thperc</i>	1,6833	1,6848	0%	1,3668	-19%
<i>dry_spell_mean</i>	2,3903	2,3784	0%	2,5623	7%
<i>dry_spell_sd</i>	1,8483	1,7859	-3%	1,9196	4%
<i>dry_spell_50thperc</i>	1,7333	1,8410	6%	1,9632	13%
<i>p00</i>	0,5744	0,5797	1%	0,6102	6%
<i>p10</i>	0,4696	0,4809	2%	0,5373	14%
<i>Printemps</i>					
<i>consec_dry_day</i>	9,7000	9,8997	2%	10,2847	6%
<i>consec_wet_day</i>	5,3667	5,4951	2%	5,4040	1%
<i>wet_day_pers</i>	0,5340	0,5253	-2%	0,4837	-9%
<i>dry_day_pers</i>	0,6779	0,6798	0%	0,6916	2%
<i>corr_spell_lengths</i>	0,2118	0,2052	-3%	0,1753	-17%
<i>wet_spell_mean</i>	2,1630	2,1407	-1%	1,9785	-9%
<i>wet_spell_sd</i>	1,2916	1,3525	5%	1,3244	3%
<i>wet_spell_50thperc</i>	1,8167	1,7886	-2%	1,4847	-18%
<i>dry_spell_mean</i>	3,2218	3,1894	-1%	3,3025	3%
<i>dry_spell_sd</i>	2,6226	2,5942	-1%	2,6875	2%
<i>dry_spell_50thperc</i>	2,3833	2,3713	-1%	2,4643	3%
<i>p00</i>	0,6864	0,6863	0%	0,6972	2%
<i>p10</i>	0,4571	0,4666	2%	0,5062	11%

2.3.4 Résultats de la comparaison des températures

Les deux types de générateurs procèdent de façon très similaire pour générer les températures minimales et maximales. Les moyennes et les écart-types sont conditionnés sur l'état pluvieux ou sec de la journée et sont réduits ensuite en valeurs résiduelles pour le calcul des coefficients d'auto-corrélation et de corrélation croisée. Ces coefficients de corrélation sont considérés comme constants tout au long de l'année. Comme il est possible d'observer dans le Tableau VI, les températures minimales et maximales moyennes sont relativement bien reproduites par les deux générateurs. Par contre, les différences calculées pour les températures minimales moyennes au printemps sont très grandes. Cela peut s'expliquer du fait que dans le calcul de la différence entre les valeurs observée et simulée, la valeur au dénominateur se situe près de 0 ce qui a pour effet d'augmenter la valeur numérique du résultats obtenu sans pour autant que la valeur simulée soit considérée comme significativement différente de la valeur observée. De plus, les indices du Tableau VI ne représentent que les valeurs moyennes saisonnières ce qui rend impossible l'analyse de la variabilité intermensuelle des résultats. La Figure 7 montre qu'en général les deux types de générateurs réussissent à reproduire correctement les valeurs de températures minimales et maximales moyennes mensuelles mais que Lars-WG performe mieux que WGEN pour les températures minimales. Effectivement, les valeurs simulées par WGEN ne suivent pas exactement les points calculés pour les valeurs observées. Les valeurs de températures minimales moyennes mensuelles sont sous-estimés par WGEN pour les mois de février, mars, juillet, août, novembre et décembre tandis que celles des mois de juin et septembre sont surestimées. Pour les températures maximales moyennes mensuelles, les valeurs simulées autant par Lars-WG que par WGEN collent presque parfaitement aux valeurs observées.

Dans la Figure 8, les variances mensuelles des températures minimales et maximales moyennes observées et simulées sont tracées pour chaque mois. Les variances calculées avec les données simulées de températures minimales par WGEN divergent

considérablement des données observées surtout pour les mois où les températures sont près de zéro ou sous zéro. Tandis que les valeurs simulées par Lars-WG se rapprochent beaucoup plus des valeurs observées. Ce phénomène peut s'expliquer par plusieurs facteurs. Tout d'abord, WGEN utilise des séries de Fourier à deux harmoniques seulement pour l'obtention des valeurs journalières de températures au lieu de trois harmoniques utilisé par Lars-WG. De plus, Lars-WG conditionne les valeurs mensuelles des écart-types, avant l'application des séries de Fourier, sur les séries de Fourier calculées préalablement pour les moyennes mensuelles pour obtenir une estimation journalière de l'écart-type. Ceci peut expliquer que les valeurs des variances obtenues avec Lars-WG se rapprochent plus des données observées. Une partie des erreurs peut aussi être causée par le forçage qui est fait en modifiant les températures minimales simulées lorsque celles-ci sont supérieures aux températures maximales simulées pour une journée donnée.

De la même façon que pour les précipitations, le processus de génération des températures a tendance à sous-estimer la variance interannuelle dans WGEN. Même si une auto-corrélation est effectuée, cela ne suffit pas à reproduire la corrélation qui existe entre les valeurs successives qui sont grandement affectées par le patron de circulation atmosphérique (Semenov et al., 1998). Dans le cas de Lars-WG, les paramètres des températures sont calculés de façon mensuelle ce qui produit une grande variabilité entre chacune des valeurs. Les séries de Fourier, utilisées pour le lissage de ces paramètres et l'obtention de valeurs journalières, ne sont pas toujours en mesure de bien représenter chacune des valeurs mensuelles. Certains articles mentionnent aussi que les températures ne suivent pas toujours une distribution normale (Qian et al., 2004). C'est pourquoi certains chercheurs ont modifié l'approche utilisée par Lars-WG et WGEN pour créer un nouveau générateur de climat adoptant une approche semi-empirique pour la simulation des températures. L'utilisation d'une nouvelle fonction de distribution pourrait aussi être envisagée pour remédier au problème de variabilité annuelle.

Tableau VI

Résultats obtenus à la station Dorval pour la comparaison des températures minimales et maximales moyennes

<i>Indices</i>	<i>observés</i>	<i>Lars-WG</i>	<i>Différences</i>	<i>WGEN</i>	<i>Différences</i>
<i>Été</i>					
<i>temp_max</i>	24,8890	24,7449	-1%	24,8679	0%
<i>temp_min</i>	14,2370	14,0698	-1%	14,0113	-2%
<i>Automne</i>					
<i>temp_max</i>	12,5700	12,5414	0%	12,6277	0%
<i>temp_min</i>	3,5528	3,4360	-3%	3,4966	-2%
<i>Hiver</i>					
<i>temp_max</i>	-3,9151	-3,5432	-9%	-3,9031	0%
<i>temp_min</i>	-12,6810	-12,4565	-2%	-12,7201	0%
<i>Printemps</i>					
<i>temp_max</i>	10,6310	10,4130	-2%	10,5990	0%
<i>temp_min</i>	0,5319	0,2941	-45%	0,4013	-25%

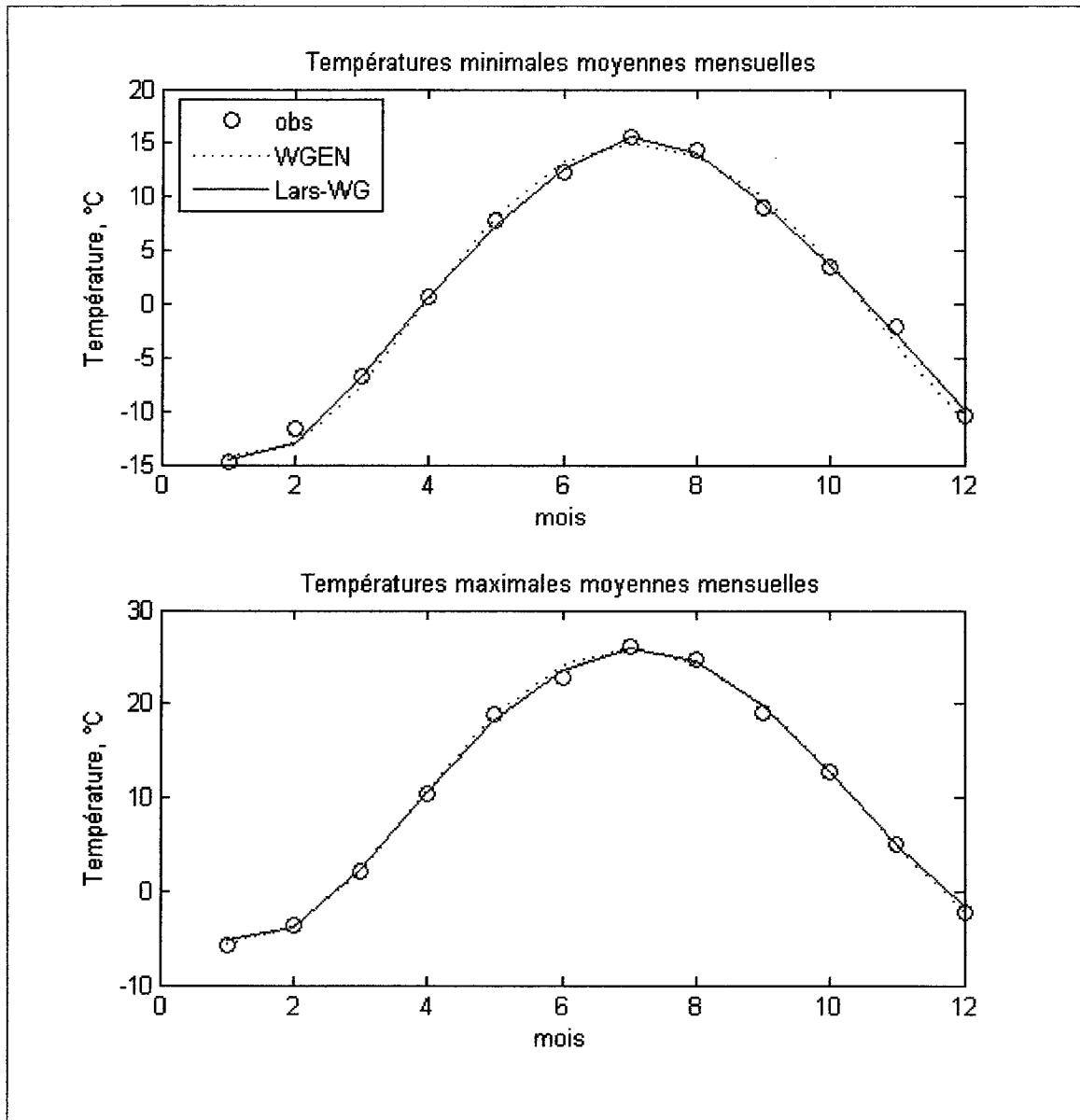


Figure 7 Comparaison des températures moyennes mensuelles des données observées et des données simulées par WGEN et Lars-WG

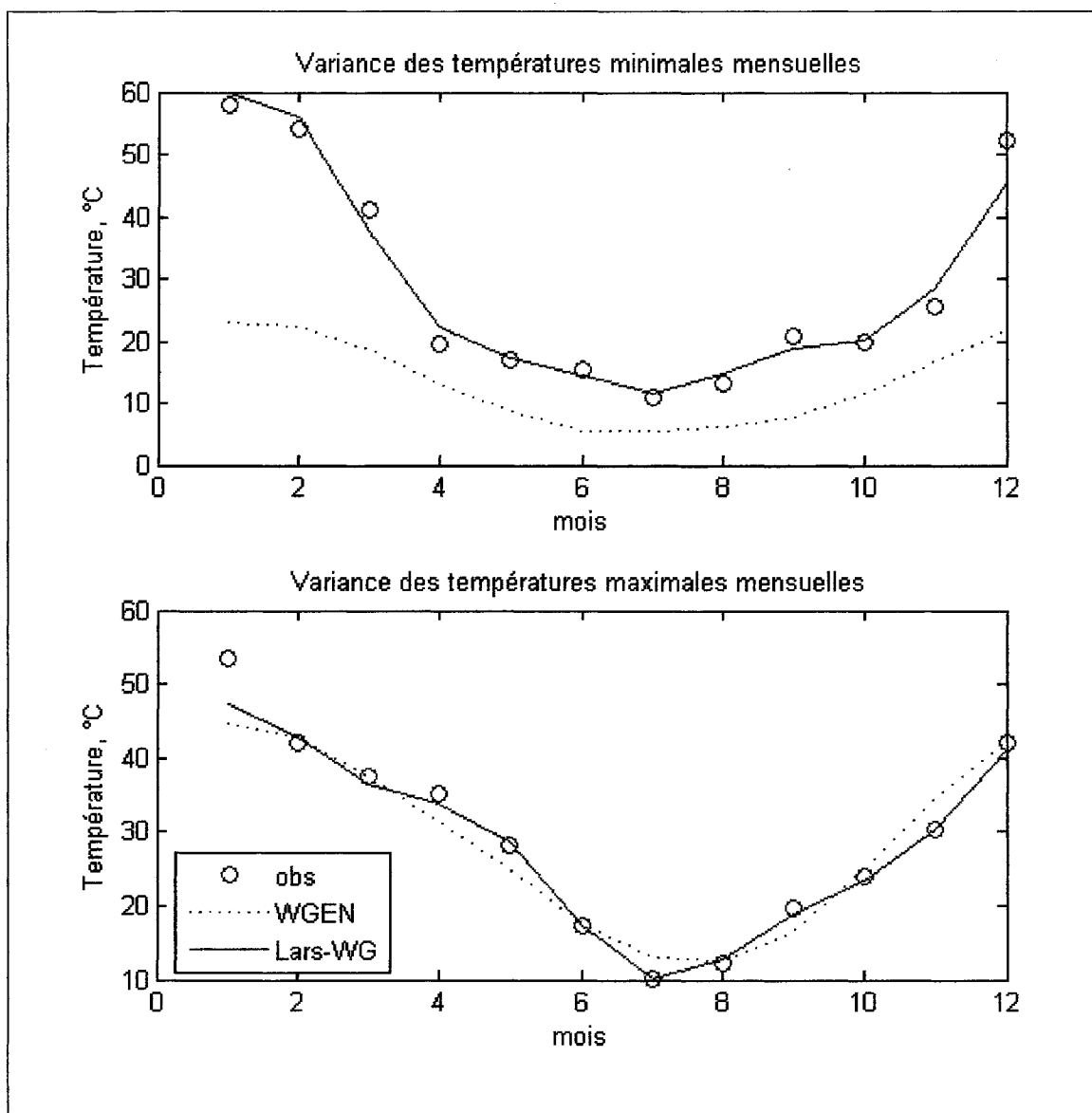


Figure 8 Comparaison des variances des températures mensuelles des données observées et des données simulées par WGEN et Lars-WG

CHAPITRE 3

PRÉSENTATION DE LA VERSION MODIFIÉE DE WGEN: WEAGETS

Les changements climatiques sont une préoccupation grandissante dans plusieurs domaines d'étude. En hydrologie, ce sont surtout les modifications que ces changements produiront sur les précipitations qui intéressent les chercheurs. En effet, c'est avec les données de précipitations que sont déterminés les risques d'inondation, de sécheresse et d'érosion. Comme il a été démontré dans le chapitre 2, les résultats obtenus avec la version non modifiée de WGEN ne sont pas satisfaisants pour certaines variables climatiques analysées dont les distributions, les occurrences et les valeurs extrêmes des précipitations. C'est sur ces aspects surtout que l'amélioration de la performance du générateur de climat est orientée.

3.1 Problèmes rencontrés avec WGEN et améliorations apportées

Dans le chapitre 2, il a été démontré que Lars-WG reproduit mieux les données observées que WGEN. Malgré cela, il est préférable d'utiliser un générateur de climat de type Richardson dans le contexte des changements climatiques. Lorsque le but à atteindre est de produire des séries de données synthétiques sous l'influence des changements climatiques, il n'est pas exact de seulement majorer les valeurs obtenues avec les données observées par un facteur de correction. Dans un contexte de climat perturbé, ce ne sont pas seulement les quantités de précipitations qui seront modifiées mais aussi leurs occurrences. C'est pourquoi il devient intéressant avec un générateur du type Richardson de pouvoir modifier les paramètres de probabilité de transition d'un état pluvieux à un état sec en plus de ceux de quantité. Les risques d'inondation et de sécheresse sont autant affectés par le nombre de jours consécutifs secs ou pluvieux que par les quantités de précipitations tombées. C'est donc pour cette raison que WGEN a

été choisi comme générateur de climat dans un contexte d'étude des effets produits par les changements climatiques sur les régimes hydrologiques. Ici, la version de base de WGEN, décrite par Richardson (1981), est utilisée comme point de départ pour l'élaboration d'un nouveau générateur de climat réussissant mieux à reproduire les variables de précipitations, primordiales pour toute étude des changements climatiques. Ce nouveau générateur de climat se nomme WeaGETS (« Weather Generator » de l'École de Technologie Supérieure). Les modifications apportées sont orientées en particulier sur le climat du Québec mais elles corrigent aussi les résultats pour d'autres régions à travers le Canada. Les problèmes rencontrés avec WGEN et corrigés dans la version de WeaGETS sont maintenant décrits en détail.

3.1.1 Les radiations solaires

Un problème récurrent avec les séries de données observées pour un grand nombre de stations climatologiques au Québec, est l'absence complète ou la disponibilité restreinte des données de radiations solaires. Pour calculer les paramètres des radiations solaires, il est nécessaire d'utiliser au moins une vingtaine d'années de données observées. Cependant, il n'y a que très peu de stations qui puissent offrir une telle disponibilité. C'est donc pour remédier à ce problème de disponibilité de données observées, possédant une série suffisamment longue, que l'analyse des radiations solaires a été soustraite dans la version de WeaGETS. De plus, puisque les radiations solaires n'ont aucun effet sur la génération des occurrences et des quantités de précipitations, leur soustraction du processus de génération n'a aucun impact sur les résultats obtenus à ce niveau. C'est lors de la modélisation hydrologique que les radiations solaires auront un certain effet sur les débits en influençant l'assèchement du sol, l'évapotranspiration et la fonte de la neige. Cependant, cet effet est relativement mineur, en particulier pour l'analyse des événements extrêmes. Dans le cas où ce serait nécessaire, les températures pourraient être utilisées pour remplacer les radiations solaires.

3.1.2 Les précipitations extrêmes et la distribution des percentiles

Avec WGEN, les fonctions de distributions disponibles pour générer les quantités de précipitations sont la fonction de distribution exponentielle et la fonction de distribution gamma. Lorsque la fonction exponentielle est utilisée, il en découle une forte sous-estimation des valeurs de précipitations extrêmes variant entre 10% et 20% et pouvant atteindre jusqu'à 24% de différence entre les données observées et les données simulées en automne pour la station Dorval. L'utilisation de la fonction gamma atténue cette importante marge d'erreur mais la différence demeure relativement élevée variant entre 10% et 15% en automne et en hiver. Le Tableau VII illustre ces résultats.

Tableau VII

Comparaison des précipitations extrêmes saisonnières générées avec les fonction de distribution exponentielles et gamma par WGEN pour la station Dorval

<i>Indices</i>	<i>observés</i>	<i>Exponentielle</i>	<i>Différences</i>	<i>Gamma</i>	<i>Différences</i>
<i>Été</i>					
<i>max_rainfall_3d</i>	51,5800	44,6236	-13%	49,9908	-3%
<i>max_rainfall_5d</i>	59,8970	54,1307	-10%	59,4658	-1%
<i>max_rainfall_10d</i>	77,6230	73,9768	-5%	78,7717	1%
<i>Automne</i>					
<i>max_rainfall_3d</i>	53,7730	40,6915	-24%	46,2607	-14%
<i>max_rainfall_5d</i>	61,0800	49,8364	-18%	54,8863	-10%
<i>max_rainfall_10d</i>	76,4430	68,4750	-10%	72,6602	-5%
<i>Hiver</i>					
<i>max_rainfall_3d</i>	37,8700	31,9699	-16%	36,0412	-5%
<i>max_rainfall_5d</i>	46,4070	39,6051	-15%	43,2221	-7%
<i>max_rainfall_10d</i>	64,6330	55,5530	-14%	58,4365	-10%
<i>Printemps</i>					
<i>max_rainfall_3d</i>	40,1700	36,1054	-10%	40,4901	1%
<i>max_rainfall_5d</i>	48,0030	44,3472	-8%	48,6159	1%
<i>max_rainfall_10d</i>	63,5770	60,8100	-4%	65,1228	2%

Un autre problème majeur survient lorsque l'on génère les quantités de précipitations avec la version de base de WGEN. La distribution des percentiles des précipitations simulés diffère considérablement de celle des percentiles observés. L'analyse des différents percentiles (20, 40, 50, 60, 80, 90, 95, et 99) démontre que, dépendamment de la station, les valeurs des plus petits percentiles (de 20 à 60) sont grandement surestimées tandis que les valeurs des plus grands percentiles (de 80 à 99) sont sous-estimées. Ces mauvais résultats sont obtenus peu importe la fonction de distribution utilisée mais l'utilisation de la fonction exponentielle augmente l'écart entre les valeurs observées et simulées. Le Tableau VIII montre les résultats obtenus avec les fonctions de distribution exponentielle et gamma en prenant comme exemple la station Dorval. Dans ce tableau, la marge d'erreur des plus petits percentiles atteint les 80% en hiver avec la fonction exponentielle et 50% avec la fonction gamma. Pour les plus grands percentiles, la marge d'erreur atteint les 30% en automne avec la fonction exponentielle et se situe entre 10% et 15% avec la fonction gamma. Encore une fois, l'utilisation de la fonction de distribution gamma au lieu de la fonction de distribution exponentielle atténue la marge d'erreur mais pas de façon satisfaisante.

Tableau VIII

Comparaison des distributions de précipitations saisonnières générées avec les fonction de distribution exponentielles et gamma par WGEN pour la station Dorval

<i>Indices</i>	<i>observés</i>	<i>Exponentielle</i>	<i>Différences</i>	<i>Gamma</i>	<i>Différences</i>
<i>Été</i>					
<i>prec_perc20</i>	1,2363	1,9840	60%	1,6151	31%
<i>prec_perc40</i>	2,8587	4,1201	44%	3,7084	30%
<i>prec_perc50</i>	4,2883	5,4828	28%	5,1683	21%
<i>prec_perc60</i>	6,2064	7,1596	15%	7,0639	14%
<i>prec_perc80</i>	13,1950	12,4112	-6%	13,4207	2%
<i>prec_perc90</i>	20,2910	17,8326	-12%	20,2342	0%
<i>prec_perc95</i>	28,6750	23,4160	-18%	27,6405	-4%
<i>prec_perc99</i>	37,6530	31,5065	-16%	37,4162	-1%

Tableau VIII (suite)

<i>Indices</i>	<i>observés</i>	<i>Exponentielle</i>	<i>Différences</i>	<i>Gamma</i>	<i>Différences</i>
<i>Automne</i>					
<i>prec_perc20</i>	1,0581	1,7774	68%	1,3870	31%
<i>prec_perc40</i>	2,4983	3,6559	46%	3,2089	28%
<i>prec_perc50</i>	3,6700	4,8470	32%	4,5057	23%
<i>prec_perc60</i>	5,4339	6,3152	16%	6,2014	14%
<i>prec_perc80</i>	10,6770	10,8998	2%	11,9287	12%
<i>prec_perc90</i>	18,2330	15,5235	-15%	18,1474	0%
<i>prec_perc95</i>	25,7770	20,3578	-21%	24,9265	-3%
<i>prec_perc99</i>	40,2870	28,1469	-30%	34,6105	-14%
<i>Hiver</i>					
<i>prec_perc20</i>	0,7507	1,3978	86%	1,1273	50%
<i>prec_perc40</i>	1,7981	2,8158	57%	2,5085	40%
<i>prec_perc50</i>	2,6350	3,7136	41%	3,4960	33%
<i>prec_perc60</i>	3,8568	4,8183	25%	4,7539	23%
<i>prec_perc80</i>	8,7699	8,2539	-6%	8,9991	3%
<i>prec_perc90</i>	14,3870	11,7406	-18%	13,6329	-5%
<i>prec_perc95</i>	19,5760	15,3728	-21%	18,4957	-6%
<i>prec_perc99</i>	26,8000	21,8093	-19%	26,4827	-1%
<i>Printemps</i>					
<i>prec_perc20</i>	1,0153	1,6123	59%	1,3804	36%
<i>prec_perc40</i>	2,4755	3,2779	32%	3,0605	24%
<i>prec_perc50</i>	3,5067	4,3378	24%	4,2072	20%
<i>prec_perc60</i>	4,9605	5,6264	13%	5,6865	15%
<i>prec_perc80</i>	10,3750	9,7136	-6%	10,5466	2%
<i>prec_perc90</i>	16,3180	13,8377	-15%	15,6759	-4%
<i>prec_perc95</i>	21,9200	18,0943	-17%	21,1857	-3%
<i>prec_perc99</i>	28,6100	24,4999	-14%	29,1880	2%

Les différences entre les données observées et simulées dépendent aussi de la situation géographique et du climat de la région où la station climatologique est située. WGEN ne réussit pas à reproduire correctement tous les types de climats. Les climats particulièrement humides comme les climats tropicaux ou maritimes, ayant de nombreux jours consécutifs avec de fortes précipitations, ou les climats plus secs, comme les climats désertiques ou nordiques, sont plus difficilement reproductibles par WGEN qu'un climat continental plus tempéré. Ce problème est dû à la courte mémoire des

séries de jours secs et pluvieux que la méthode de la chaîne de Markov permet en se basant seulement sur l'état du jour précédant pour déterminer l'état du jour présent. L'utilisation des fonctions de distributions exponentielle et gamma plutôt qu'une distribution empirique est aussi une cause de ce problème. Le processus naturel des précipitations journalières ne suit pas exactement une fonction de distribution exponentielle ou gamma. Ces fonctions ont tendance à sous-estimer les très petites précipitations, à surestimer les précipitations médianes et à sous-estimer les précipitations extrêmes. D'autres fonctions de distributions, possédant plus de paramètres, existent ou sont en développement pour régler ce problème comme la fonction exponentielle mixte ou la fonction de Fréchet. Ces fonctions ont comme effet d'équilibrer les extrémités des courbes de distribution. Plus une fonction possède de paramètres, meilleur est l'ajustement. Par contre, la modification des nombreux paramètres de ces fonctions devient complexe lors de l'étude des changements climatiques. Ici, une approche de correction régionale est utilisée pour corriger la distribution des précipitations et les précipitations extrêmes.

3.1.2.1 La correction régionale

Les modifications apportées au générateur de climat pour remédier aux problèmes rencontrés lors de la simulation des valeurs extrêmes et des distributions de précipitations sont l'intégration d'une équation de correction régionale et l'utilisation exclusive de la fonction de distribution gamma. La correction régionale est, en fait, une équation quadratique qui ajuste les précipitations simulées avec la fonction gamma. Deux équations d'ajustement sont nécessaires, une pour les précipitations dont la valeur simulée initiale se trouve sous la valeur du 65^{ième} ou du 85^{ième} percentile, dépendamment de la région géographique de la station climatologique, et une équation pour celles au-dessus de ce même percentile. La nécessité d'utiliser deux équations de correction provient du fait que les valeurs des petites précipitations sont surestimées et que celles

des précipitations extrêmes sont sous-estimées. Selon la région dans laquelle se trouve la station cette séparation se trouvera entre le 65^{ième} et le 85^{ième} percentile de la distribution.

Cinq régions ont été déterminées à l'intérieur du Québec en se basant sur la valeur de β moyen de la fonction gamma de chaque station analysée. Ces régions sont: la Gaspésie et la Côte Nord, les abords du fleuve Saint-Laurent, le sud du Québec, le nord-ouest du Québec et finalement le Grand Nord. Pour chacune de ces régions, deux équations de corrections sont nécessaires à l'ajustement des précipitations simulées. Une équation modifie les précipitations supérieures au percentile médian et une autre équation modifie les précipitations inférieures à ce même percentile. Ces deux équations ont été calculées de façon empirique pour chacune des régions. Le choix de la bonne équation de correction à appliquer s'effectue automatiquement, à l'intérieur du générateur, en se basant sur la valeur moyenne du paramètre β de la fonction de distribution gamma de la station climatologique et sur une probabilité générée aléatoirement entre 0 et 1 représentant le percentile de la quantité des précipitations simulée. Le paramètre β est calculé de la même façon que les probabilités d'occurrence des précipitations, c'est-à-dire, de façon périodique (14 jours) avec les données observées et lissées avec les séries de Fourier pour obtenir des valeurs journalières pour la totalité de la série simulée (voir chapitre 1).

La façon de procéder adoptée pour déterminer les équations de correction est de générer une première fois une série de données synthétiques de précipitations avec la fonction gamma non modifiée. Ensuite, les valeurs de percentiles sont calculées pour les données observées et les données simulées. Les percentiles sont séparés en deux parties pour tenir compte des précipitations surestimées et de celles sous-estimées. Par la suite, deux graphiques sont tracés avec, comme valeurs en abscisse, les valeurs des percentiles calculés pour les données simulées et en ordonné, les valeurs de percentiles calculés pour les données observées. Une courbe est tracée dans chaque graphique en essayant

de suivre le mieux possible les points obtenus à partir des percentiles. Le processus est répété pour les cinq régions climatiques prédéfinies. Finalement, les équations de ces courbes deviennent les équations de correction appliquées aux précipitations simulées pour chaque région. Un exemple de courbe de correction des percentiles 20, 40, 50 et 60 pour la région des abords du fleuve St-Laurent est présenté à la Figure 9.

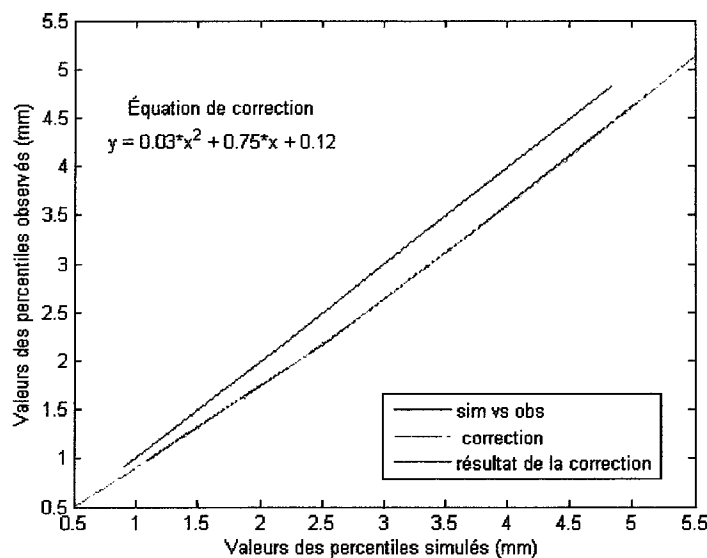


Figure 9 Exemple de courbe servant à la détermination des équations de correction

3.1.3 Les séries de jours secs et pluvieux

Comme il a été vu plus tôt, la chaîne de Markov, utilisant le 1^{er} ordre seulement, n'est pas suffisamment précise dans la représentation des séries de jours secs ou pluvieux. Le fait de tenir compte seulement de la journée précédente pour déterminer l'état du jour présent ne permet pas de reproduire les longues séries de jours secs ou pluvieux consécutifs. Dans certains climats tempérés, ce problème n'a pas d'incidence puisque les courtes séries de jours secs et pluvieux s'alternent de façon régulière. Mais lorsque

la région étudiée fait partie d'un climat particulièrement sec ou humide, il devient important de pouvoir bien représenter les longues séries. Au Canada, on retrouve une gamme importante de régions climatiques passant des zones désertiques, comme les montagnes au sud de la Colombie Britannique et les Prairies, aux zones maritimes, comme la côte du Pacifique et les provinces de l'Atlantique. Selon la classification proposée par Thornthwaite (1948), les régions hydriques présentent au Canada passent des zones perhumides à arides et les régions thermiques passent des zones de gel à mésothermique (tempérée chaude). Donc, pour permettre l'adaptation de WeaGETS à cette grande variété de climats, le degré de la chaîne de Markov a été modifié de sa valeur initiale pour ainsi améliorer les résultats de la génération des occurrences de précipitations.

3.1.3.1 La chaîne de Markov du 3^{ième} ordre

Plusieurs essais ont été effectués pour déterminer le degré de la chaîne de Markov pouvant reproduire de façon suffisamment précise les différents climats présents au Canada et plus particulièrement au Québec. Dans un premier temps, une chaîne de Markov de 2^{ième} ordre a été testée. Dans une chaîne de Markov de 2^{ième} ordre, l'état des deux jours précédents est utilisé pour déterminer l'état de la journée présente. La façon de procéder est pratiquement la même qu'avec une chaîne de Markov de 1^{er} ordre excepté que le nombre de paramètres à calculer passe de deux à quatre. Les résultats obtenus en utilisant le 2^{ième} ordre au lieu du 1^{er} ordre représentaient mieux la réalité mais pas encore de façon satisfaisante pour certaines stations. L'utilisation d'une chaîne de Markov de 3^{ième} ordre a donc été envisagée. En passant du 2^{ième} ordre au 3^{ième} ordre, les paramètres de probabilité de transition ont, une fois de plus, doublés passant de quatre à huit. Dans une chaîne de Markov de 3^{ième} ordre, l'état des trois jours précédents est considéré pour déterminer l'état de la journée présente. Dans la chaîne de 1^{er} ordre, les paramètres à calculer sont ; P_{11_i} , P_{01_i} . Les paramètres associés P_{00_i} et P_{10_i} sont

automatiquement obtenus sachant que $P_{10}=1-P_{11}$ (éq. 1.1) et que $P_{00}=1-P_{01}$ (éq. 1.2). Pour ce qui est des paramètres de probabilité de transition pour une chaîne de Markov de 3^{ième} ordre, ils sont décrits dans le Tableau IX.

Tableau IX

Définition des probabilités de transition d'une chaîne de Markov de 3^{ème} ordre.

<i>Probabilité de transition</i>	<i>Définitions de la probabilité de transition</i>			
	<i>Etat du jour</i>	<i>Etat du jour i-</i>	<i>Etat du jour i-</i>	<i>Etat du jour i-</i>
<i>P000i</i>	sec	sec	sec	sec
<i>P0001i</i>	pluvieux	sec	sec	sec
<i>P0010i</i>	sec	pluvieux	sec	sec
<i>P0011i</i>	pluvieux	pluvieux	sec	sec
<i>P0100i</i>	sec	sec	pluvieux	sec
<i>P0101i</i>	pluvieux	sec	pluvieux	sec
<i>P0110i</i>	sec	pluvieux	pluvieux	sec
<i>P0111i</i>	pluvieux	pluvieux	pluvieux	sec
<i>P1000i</i>	sec	sec	sec	pluvieux
<i>P1001i</i>	pluvieux	sec	sec	pluvieux
<i>P1010i</i>	sec	pluvieux	sec	pluvieux
<i>P1011i</i>	pluvieux	pluvieux	sec	pluvieux
<i>P1100i</i>	sec	sec	pluvieux	pluvieux
<i>P1101i</i>	pluvieux	sec	pluvieux	pluvieux
<i>P1110i</i>	sec	pluvieux	pluvieux	pluvieux
<i>P1111i</i>	pluvieux	pluvieux	pluvieux	pluvieux

Pour calculer tous ces paramètres, la procédure demeure la même qu'avec une chaîne de 1^{er} ordre. Les probabilités de transition sont calculées pour des périodes de 14 jours. Une série de Fourier à un ou plusieurs harmoniques est appliquée aux probabilités pour décrire leur valeur journalière (voir chapitre 1). Une fois les paramètres calculés, les trois premiers jours simulés sont considérés comme étant secs et, par la suite, un nombre aléatoire entre 0 et 1 est généré comme probabilité pour déterminer quel paramètre devra

être utilisé pour le jour suivant. Le même processus est répété pour la totalité des jours des années simulées.

3.1.4 Les températures minimales

Avec la méthode utilisée par WGEN pour simuler les températures minimales et maximales, il peut arriver que certaines erreurs surviennent à l'intérieur du processus et produisent, pour une même journée, une température minimale supérieure à la température maximale. Cette erreur a pu être temporairement corrigée en remplaçant, pour les jours problématiques, la température minimale générée par la température maximale générée pour cette même journée en y soustrayant $0,1^{\circ}\text{C}$. Cette solution est qualifiée de temporaire puisque, comme il a été souligné dans plusieurs articles sur le sujet, la distribution normale n'est pas tout à fait adéquate pour la simulation des températures (Hayhoe, 2000). Il faudra donc, dans un avenir proche, étudier une nouvelle approche totalement différente pour la génération de cette variable climatique. La solution proposée ici n'est pas parfaite mais elle permet, au moins, de pouvoir utiliser les résultats de la simulation directement comme données d'entrée dans un modèle hydrologique sans produire de message d'erreur.

CHAPITRE 4

VALIDATION DIRECTE DE WEAGETS

La validation directe concerne l'analyse statistique des données simulées par le générateur stochastique de climat. Plusieurs tests statistiques peuvent être réalisés sur les données synthétiques elles-mêmes ou sur des indices calculés avec ces données. Ce type d'analyse permet de déterminer si les données simulées par le générateur stochastique de climat représentent adéquatement les statistiques des données observées. La façon de procéder est tout d'abord de calculer plusieurs indices concernant les précipitations, puis de sélectionner certains de ces indices pour procéder à une analyse statistique de leur moyenne et de leur variance. Un test statistique est aussi réalisé directement sur les distributions des précipitations journalières observées et simulées. Tous ces tests sont effectués sur la totalité des stations climatologiques sélectionnées avec des données simulées sur des périodes de trois cent années. Ainsi, il devient possible de déterminer si les changements apportés à WeaGETS ont servi à corriger de façon adéquate les erreurs produites avec la version de base de WGEN sur la génération des précipitations.

4.1 Description des stations climatologiques utilisées pour la validation

Pour s'assurer que WeaGETS génère correctement les variables climatiques de précipitations, une validation directe doit être réalisée en sélectionnant plusieurs stations climatologiques couvrant le maximum de territoire québécois. Le critère de base de cette sélection est ici le nombre d'années de données observées disponibles pour chacune des variables climatiques. Pour assurer une bonne analyse des données observées et l'obtention de paramètres de simulation exactes, il est important que les stations climatologiques utilisées pour l'analyse possèdent une série de données

suffisamment longue pour les variables de précipitations et de températures maximales et minimales. Plus le nombre d'années de données observées est important, plus l'évaluation des paramètres servant à la génération des données synthétiques sera précise. Les données climatiques utilisées ici ont été fournies par Environnement Canada. Une quinzaine de stations climatologiques ont été sélectionnées à travers la province de Québec et quelques unes à travers le Canada. D'autres critères ont été pris en considération lors de la sélection des stations climatologiques dont la situation géographique et le type de climat de la région. Le Tableau X montre les stations climatologiques utilisées pour la validation ainsi que leur situation géographique, leur période de données observées utilisée et leurs régions climatiques selon la classification de Thornthwaite (1948) (voir annexe 1).

Tableau X

Description des stations climatologiques utilisées

Stations	Province	Lat.	Long.	Alt. (m)	Période	Région hydrique	Région thermique
Alberni	Colombie-Britannique	49°22'	124°56'	91	1928-58 (31)	A, r perhumide	B ₁ , b ₃ mésothermique
Bagotville	Québec	48°20'	71°00'	159	1973-2003 (31)	B ₂ , r humide	C ₂ , b ₁ microthermique
Dorval	Québec	48°25'	71°03'	76	1971-2000 (30)	B ₁ , r humide	B ₁ , b ₁ mésothermique
Gaspé	Québec	48°47'	64°29'	33	1973-2003 (31)	B ₃ , r humide	C ₂ , b ₁ microthermique
Grande Prairie	Colombie-Britannique	55°11'	118°53'	669	1968-93 (26)	C ₁ , d sec	C ₂ , c ₂ microthermique
Inukjuak	Québec	58°28'	78°05'	26	1974-2003 (30)	C ₁ , d sec	C ₁ , c ₁ microthermique
Matagami	Québec	49°46'	77°49'	281	1974-2003 (30)	B ₂ , r humide	C ₂ , b ₁ microthermique
Mont-Joli	Québec	48°36'	68°13'	52	1973-2003 (31)	B ₃ , r humide	C ₂ , b ₁ microthermique
Okanagan	Colombie-Britannique	50°03'	119°28'	370	1926-99 (74)	D, d semi-aride	C ₂ , b ₁ microthermique
Ormstown	Québec	45°07'	74°03'	46	1971-2000 (30)	B ₂ , r humide	B ₁ , b ₁ mésothermique
Québec	Québec	46°48'	71°23'	74	1973-2003 (31)	B ₄ , r humide	C ₂ , b ₁ microthermique
Schefferville	Québec	54°48'	66°49'	522	1973-2003 (31)	B ₃ , r humide	C ₁ , c ₁ microthermique

Tableau IX (suite)

Stations	Province	Lat.	Long.	Alt. (m)	Période	Région hydrique	Région thermique
Sept-Îles	Québec	50°13'	66°15'	53	1973-2003 (31)	B ₄ , r humide	C ['] ₂ , b ['] ₁ microthermique
Sherbrooke	Québec	45°26'	71°41'	241	1973-2003 (31)	B ₄ , r humide	C ['] ₂ , b ['] ₁ microthermique
Ste-Clothilde	Québec	45°10'	73°41'	56	1971-2000 (30)	B ₃ , r humide	C ['] ₂ , b ['] ₁ microthermique
Ste-Martine	Québec	45°13'	73°51'	74	1971-2001 (31)	B ₃ , r humide	B ['] ₁ , b ['] ₁ mésothermique

La totalité des stations climatologiques utilisées pour la validation directe possède un minimum de vingt-six années de données observées pour les variables climatiques de précipitations et de températures minimale et maximale. Elles couvrent 5 des 6 régions hydriques présentes au Québec et 7 des 9 régions hydriques au Canada. Seules les régions humides à subhumides et les régions arides ne sont pas représentées. Les stations utilisées représentent la totalité des régions thermiques au Québec et 3 des 5 régions thermiques au Canada. Seules les régions des terres gelées et de la toundra ne sont pas représentées. Il est important d'analyser les résultats obtenus avec les stations climatologiques couvrant le maximum de régions climatiques pour s'assurer que le générateur fonctionne correctement pour tous les types de climats présents au Canada.

4.2 Résultats de la validation directe

La présentation des résultats se fera en 3 parties soit ; les résultats obtenus pour les indices de STARDEX (<http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardexStatistical>), les résultats des tests statistiques sur certains indices de STARDEX sélectionnés et, finalement, les résultats des tests statistiques sur les distributions des précipitations mensuelles ainsi que certains graphiques correspondants. Les résultats de seulement 3 stations représentatives sont présentés pour les 3 parties de l'analyse afin d'éviter d'alourdir le texte. Les résultats des autres stations sont disponibles à l'annexe 2. Les 3

stations sélectionnées pour la présentation des résultats sont les stations de Dorval, de Québec et de Mont-Joli. Ces trois stations ont été sélectionnées car elles représentent 3 des 5 régions hydriques et 2 des 3 régions thermiques présentes au Québec et que leurs résultats sont, somme toute, typiques des résultats obtenus avec les autres stations. Les résultats sont présentés pour WGEN et WeaGETS pour ainsi permettre de visualiser les effets des modifications apportées à la version de base de WGEN.

4.2.1 Résultats des indices de STARDEX

Les résultats obtenus avec les indices de STARDEX sont présentés selon les mêmes catégories que celles utilisées dans le chapitre 2, c'est-à-dire, la distribution des précipitations, les quantités de précipitations et les séries de jours secs et pluvieux. Pour la définition de ces indices se référer au Tableau II du chapitre 2. Comme aucune modification majeure n'a été apportée aux températures, leur analyse ne sera pas présentée dans ce chapitre. Les valeurs synthétiques représentées en rouge dans les tableaux signifient que ces valeurs sont considérées comme étant différentes des valeurs observées de façon importante. C'est-à-dire que la différence calculée entre la valeur simulée et la valeur observée est supérieure à 5%.

4.2.1.1 Distribution des précipitations

Le Tableau XI présente les résultats obtenus avec WGEN et WeaGETS pour les indices de STARDEX relatifs à la distribution des précipitations pour les 3 stations sélectionnées ; Dorval, Québec et Mont-Joli. Il est possible d'observer dans ce tableau que les modifications apportées à WGEN permettent d'améliorer considérablement la simulation de la distribution des précipitations pour l'ensemble des stations. Effectivement, dans WeaGETS une équation de correction a été appliquée régionalement pour ajuster les quantités de précipitations des jours pluvieux (voir

chapitre 3). Cette modification a pour effet de diminuer les valeurs des plus petits percentiles (de 20 à 60 ou de 20 à 80, dépendamment des stations) et d'augmenter la valeur des plus grands quantiles (de 80 à 99). Certaines différences notables peuvent néanmoins être constatées au niveau des valeurs des percentiles observées et simulées à l'hiver. Ces erreurs sont dues au fait que l'équation de correction appliquée aux précipitations simulées est une équation moyenne annuelle et l'hiver les corrections à apporter aux précipitations sont moins importantes que celles des 3 autres saisons. Ceci produit des corrections trop grandes pour l'hiver à certaines stations. Une option possible pour remédier à ce problème serait de modifier l'équation de correction régionale pour qu'elle tienne compte également de la saison pour laquelle les précipitations sont générées. L'équation de correction deviendrait donc régionale et saisonnière. Mais dans l'ensemble les résultats des indices de STARDEX démontrent que l'équation de correction appliquée régionalement permet d'améliorer considérablement la qualité des données synthétiques produites par WeaGETS en ce qui a trait à la distribution des précipitations.

Tableau XI

Résultats saisonniers des distribution de précipitations obtenus aux stations Dorval, Québec et Mont-Joli avec les données observées (O) et les données générées par WGEN (WG) et WeaGETS (We)

Indices	Dorval			Québec			Mont-Joli		
	O	WG	We	O	WG	We	O	WG	We
	<i>Été</i>								
<i>prec_perc20</i>	1,2363	1,6151	1,2280	1,4009	1,8104	1,3954	1,2421	1,5781	1,2893
<i>prec_perc40</i>	2,8587	3,7084	2,9861	3,6843	4,2156	3,5068	2,7395	3,5030	2,9520
<i>prec_perc50</i>	4,2883	5,1683	4,3781	5,1817	5,8782	5,1598	4,1967	4,8213	4,1857
<i>prec_perc60</i>	6,2064	7,0639	6,2824	7,5143	8,0002	7,3869	6,0703	6,4922	5,8410
<i>prec_perc80</i>	13,1950	13,4207	12,9841	14,0320	15,0860	14,8596	11,4220	12,0028	11,8827
<i>prec_perc90</i>	20,2910	20,2342	20,3146	23,4170	22,7137	22,9814	17,6750	17,8896	18,1333
<i>prec_perc95</i>	28,6750	27,6405	27,8431	31,7370	30,5500	31,0985	24,2910	24,2266	25,3745
<i>prec_perc99</i>	37,6530	37,4162	38,2391	43,5400	42,8813	43,4118	33,3400	32,8960	37,5107

Tableau XI (suite)

<i>Indices</i>	<i>Dorval</i>			<i>Québec</i>			<i>Mont-Joli</i>		
	<i>O</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>	<i>O</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>	<i>O</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>
<i>prec_quant20</i>	0,9847	0,9773	0,9815	0,9838	0,9780	0,9820	0,9803	0,9751	0,9788
<i>prec_quant40</i>	0,9349	0,9135	0,9290	0,9281	0,9138	0,9288	0,9256	0,9072	0,9211
<i>prec_quant50</i>	0,8905	0,8645	0,8858	0,8838	0,8637	0,8841	0,8804	0,8561	0,8759
<i>prec_quant60</i>	0,8232	0,7851	0,8136	0,8076	0,7843	0,8103	0,8056	0,7747	0,8026
<i>prec_quant80</i>	0,5813	0,5455	0,5790	0,5760	0,5437	0,5721	0,5625	0,5342	0,5697
<i>prec_quant90</i>	0,3762	0,3435	0,3684	0,3642	0,3420	0,3622	0,3602	0,3346	0,3655
<i>prec_quant95</i>	0,2220	0,1972	0,2221	0,2136	0,2063	0,2169	0,2074	0,1950	0,2250
<i>prec_quant99</i>	0,1458	0,1458	0,1450	0,1294	0,1298	0,1280	0,1432	0,1380	0,1474
<i>Automne</i>									
<i>prec_perc20</i>	1,0581	1,3870	1,0068	1,2423	1,6002	1,2598	1,0069	1,3136	1,0394
<i>prec_perc40</i>	2,4983	3,2089	2,4755	2,9641	3,6530	3,0064	2,3095	2,8897	2,3442
<i>prec_perc50</i>	3,6700	4,5057	3,6436	4,4117	5,0549	4,3584	3,4867	3,9707	3,3185
<i>prec_perc60</i>	5,4339	6,2014	5,2309	6,3416	6,8652	6,1579	4,7505	5,3660	4,6273
<i>prec_perc80</i>	10,6770	11,9287	11,1927	12,0420	12,8770	12,4970	9,1773	9,9445	9,4371
<i>prec_perc90</i>	18,2330	18,1474	17,9902	19,4290	19,3076	19,4379	14,6430	14,8106	14,6993
<i>prec_perc95</i>	25,7770	24,9265	25,0769	26,8480	26,2294	26,5509	21,1440	20,0252	20,5294
<i>prec_perc99</i>	40,2870	34,6105	35,5221	41,7730	37,5360	38,2239	33,1730	28,0896	31,0038
<i>prec_quant20</i>	0,9849	0,9777	0,9822	0,9819	0,9768	0,9804	0,9807	0,9745	0,9783
<i>prec_quant40</i>	0,9357	0,9158	0,9323	0,9318	0,9115	0,9254	0,9274	0,9070	0,9209
<i>prec_quant50</i>	0,8949	0,8677	0,8908	0,8844	0,8610	0,8805	0,8860	0,8557	0,8758
<i>prec_quant60</i>	0,8260	0,7900	0,8218	0,8112	0,7820	0,8077	0,8080	0,7753	0,8040
<i>prec_quant80</i>	0,5989	0,5523	0,5940	0,5818	0,5427	0,5732	0,5830	0,5357	0,5740
<i>prec_quant90</i>	0,3907	0,3504	0,3832	0,3717	0,3429	0,3653	0,3820	0,3371	0,3705
<i>prec_quant95</i>	0,2545	0,2075	0,2336	0,2228	0,2074	0,2182	0,2407	0,2032	0,2277
<i>prec_quant99</i>	0,1510	0,1435	0,1448	0,1311	0,1262	0,1268	0,1440	0,1299	0,1373
<i>Hiver</i>									
<i>prec_perc20</i>	0,7507	1,1273	0,8367	0,8604	1,1979	0,9143	0,7960	1,0518	0,8590
<i>prec_perc40</i>	1,7981	2,5085	1,8915	1,8541	2,6359	2,0506	1,7448	2,2458	1,8258
<i>prec_perc50</i>	2,6350	3,4960	2,7063	2,8450	3,6371	2,9149	2,4300	3,0571	2,5252
<i>prec_perc60</i>	3,8568	4,7539	3,7540	4,0935	4,9260	4,0173	3,4261	4,0896	3,4538
<i>prec_perc80</i>	8,7699	8,9991	7,9033	8,8869	9,1740	8,3062	7,0235	7,4841	6,8578
<i>prec_perc90</i>	14,3870	13,6329	13,0146	14,4770	13,6621	13,3944	10,9300	11,0663	10,7417
<i>prec_perc95</i>	19,5760	18,4957	18,3465	19,7090	18,4761	18,6545	15,4660	14,8491	14,7794
<i>prec_perc99</i>	26,8000	26,4827	27,4885	30,0960	27,0742	28,4954	25,7920	21,9732	23,6523
<i>prec_quant20</i>	0,9824	0,9753	0,9789	0,9826	0,9746	0,9784	0,9809	0,9720	0,9751
<i>prec_quant40</i>	0,9383	0,9110	0,9250	0,9335	0,9081	0,9222	0,9240	0,9023	0,9137
<i>prec_quant50</i>	0,8999	0,8612	0,8816	0,8895	0,8567	0,8771	0,8785	0,8491	0,8660

Tableau XI (suite)

<i>Indices</i>	<i>Dorval</i>			<i>Québec</i>			<i>Mont-Joli</i>		
	<i>O</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>	<i>O</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>	<i>O</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>
<i>prec_quant60</i>	0,8325	0,7831	0,8130	0,8290	0,7776	0,8070	0,8095	0,7690	0,7937
<i>prec_quant80</i>	0,6155	0,5459	0,5934	0,5957	0,5382	0,5839	0,5828	0,5298	0,5665
<i>prec_quant90</i>	0,3908	0,3460	0,3871	0,3878	0,3401	0,3791	0,3824	0,3334	0,3661
<i>prec_quant95</i>	0,2235	0,2105	0,2299	0,2195	0,2000	0,2218	0,2348	0,1927	0,2173
<i>prec_quant99</i>	0,1246	0,1278	0,1308	0,1199	0,1140	0,1167	0,1182	0,1065	0,1101
<i>Printemps</i>									
<i>prec_perc20</i>	1,0153	1,3804	1,0791	1,1029	1,4951	1,1893	1,0125	1,2816	1,0587
<i>prec_perc40</i>	2,4755	3,0605	2,4725	2,8173	3,3430	2,7347	2,3664	2,7536	2,2919
<i>prec_perc50</i>	3,5067	4,2072	3,5158	4,2417	4,6028	3,9137	3,4600	3,7448	3,1878
<i>prec_perc60</i>	4,9605	5,6865	4,8846	6,0059	6,2118	5,4537	4,8333	5,0085	4,3682
<i>prec_perc80</i>	10,3750	10,5466	9,9402	12,0520	11,5272	11,0004	8,7663	9,1322	8,6652
<i>prec_perc90</i>	16,3180	15,6759	15,6241	17,1290	17,1583	17,1614	14,0020	13,4245	13,3478
<i>prec_perc95</i>	21,9200	21,1857	21,4698	23,3920	23,1720	23,4897	18,6270	17,9732	18,3285
<i>prec_perc99</i>	28,6100	29,1880	30,3659	33,1230	32,4174	33,3099	26,6530	24,6030	26,8069
<i>prec_quant20</i>	0,9836	0,9747	0,9784	0,9826	0,9754	0,9788	0,9795	0,9725	0,9756
<i>prec_quant40</i>	0,9300	0,9073	0,9211	0,9276	0,9083	0,9215	0,9205	0,9017	0,9137
<i>prec_quant50</i>	0,8842	0,8559	0,8756	0,8826	0,8569	0,8757	0,8734	0,8489	0,8663
<i>prec_quant60</i>	0,8143	0,7751	0,8027	0,8050	0,7763	0,8021	0,7945	0,7665	0,7918
<i>prec_quant80</i>	0,5744	0,5346	0,5725	0,5627	0,5358	0,5693	0,5543	0,5248	0,5600
<i>prec_quant90</i>	0,3670	0,3355	0,3658	0,3511	0,3370	0,3630	0,3429	0,3274	0,3569
<i>prec_quant95</i>	0,2128	0,1985	0,2211	0,2019	0,2007	0,2164	0,2187	0,1930	0,2161
<i>prec_quant99</i>	0,1313	0,1337	0,1356	0,1254	0,1296	0,1303	0,1296	0,1278	0,1331

4.2.1.2 Quantité de précipitations

Le Tableau XII illustre les résultats saisonniers obtenus pour les indices relatifs aux quantités de précipitations pour les 3 stations sélectionnées. Encore une fois, les facteurs de correction régionaux incorporés à la version de WeaGETS ont servi à améliorer considérablement la génération des données synthétiques. Pour l'ensemble des saisons et des stations, les moyennes de précipitations (*prec_mean*) et les quantités de précipitations pour les jours pluvieux (*rains_per_rainday*) ont été corrigées de façon satisfaisante. Les valeurs de précipitations extrêmes (*max_rainfall*) simulées pour des

séries de 3, 5 et 10 jours sont augmentées mais une différence subsiste entre les données observées et simulées. C'est surtout pour la station de Mont-Joli et pour les saisons d'automne et d'hiver que ces différences sont observables. En hiver et au printemps, le nombre de jours dont les précipitations dépassent 10 mm ($prec > 10mm$) demeurent sous-estimés mais de façon moins importante. En général, les résultats de tous les indices calculés pour les quantités de précipitations ont été améliorés avec les équations de correction ajoutées à la version de WeaGETS, comme il est possible de le constater dans le Tableau XII.

Tableau XII

Résultats saisonniers des quantités de précipitations obtenus aux stations Dorval, Québec et Mont-Joli avec les données observées (O) et les données générées par WGEN (WG) et WeaGETS (We)

<i>Indices</i>	<i>Dorval</i>			<i>Québec</i>			<i>Mont-Joli</i>		
	<i>O</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>	<i>O</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>	<i>O</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>
	<i>Été</i>								
<i>prec_mean</i>	2,8976	2,8404	2,9237	3,7030	3,6510	3,7654	2,6703	2,6364	2,7772
<i>prec>10mm</i>	9,2000	8,9836	9,0286	11,433	11,707	11,730	8,5000	8,2155	8,4720
<i>max_rainfall_3d</i>	51,580	49,990	50,904	58,607	58,948	60,055	48,263	44,588	48,918
<i>max_rainfall_5d</i>	59,897	59,465	59,818	71,543	70,721	72,236	57,667	53,266	57,778
<i>max_rainfall_10d</i>	77,623	78,771	79,515	94,437	95,060	97,643	74,783	71,106	76,453
<i>rain_per_rainday</i>	7,7755	8,1663	7,7337	8,7722	9,1948	8,8366	6,9730	7,3617	7,2101
	<i>Automne</i>								
<i>prec_mean</i>	2,8947	2,6981	2,7461	3,5066	3,3119	3,3654	2,5859	2,4138	2,4938
<i>prec>10mm</i>	8,3000	8,2180	8,1815	10,767	10,324	10,236	7,0000	6,9311	7,1079
<i>max_rainfall_3d</i>	53,773	46,260	47,177	56,057	51,806	52,811	45,710	38,574	40,997
<i>max_rainfall_5d</i>	61,080	54,886	55,847	68,543	62,376	63,320	54,153	46,392	48,851
<i>max_rainfall_10d</i>	76,443	72,660	73,904	88,713	84,449	85,811	73,347	62,340	65,258
<i>rain_per_rainday</i>	6,9021	7,2794	6,7353	7,5938	7,8994	7,5191	5,8439	6,1146	5,7921
	<i>Hiver</i>								
<i>prec_mean</i>	2,4516	2,3337	2,3609	2,8879	2,6752	2,7448	2,4856	2,3212	2,3991
<i>prec>10mm</i>	7,3333	6,3190	6,2936	8,0667	7,2843	7,4216	6,0000	5,3377	5,6489
<i>max_rainfall_3d</i>	37,870	36,041	36,745	42,360	38,256	39,620	37,723	31,421	33,118
<i>max_rainfall_5d</i>	46,407	43,222	43,998	51,050	46,615	48,147	44,540	38,640	40,493
<i>max_rainfall_10d</i>	64,633	58,436	59,179	71,520	64,052	65,851	61,377	53,875	56,101

Tableau XII (suite)

<i>Indices</i>	<i>Dorval</i>			<i>Québec</i>			<i>Mont-Joli</i>		
	<i>O</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>	<i>O</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>	<i>O</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>
<i>rain_per_rainday</i>	5,1934	5,5354	4,9287	5,4339	5,6502	5,1527	4,3706	4,6429	4,2891
<i>Printemps</i>									
<i>prec_mean</i>	2,5118	2,4245	2,4819	2,9545	2,7727	2,8412	2,2770	2,1385	2,2189
<i>prec>10mm</i>	7,7000	7,2376	7,3100	9,4333	8,5137	8,5872	6,1667	5,9030	6,1358
<i>max_rainfall_3d</i>	40,170	40,490	41,659	46,083	45,386	46,356	40,473	34,749	36,754
<i>max_rainfall_5d</i>	48,003	48,615	49,542	55,790	54,778	56,030	48,550	41,899	44,060
<i>max_rainfall_10d</i>	63,577	65,122	66,173	78,520	73,245	75,170	62,457	56,443	58,968
<i>rain_per_rainday</i>	6,1321	6,4611	6,0397	6,8997	7,0689	6,6649	5,5225	5,6121	5,3216

4.2.1.3 Séries de jours secs et pluvieux

Le passage du 1^e degré au 3^{ième} degré de la chaîne de Markov dans la version de WeaGETS a permis d'augmenter la précision de la représentation des séries de jours secs et pluvieux. Le Tableau XIII montre les résultats obtenus pour les indices relatifs aux séries sèches et pluvieuses. Dans ce tableau, les valeurs des indices de persistance des jours pluvieux et secs (*wet_day_pers* et *dry_day_pers*), des durées moyennes des séries sèches et pluvieuses (*dry_spell_mean* et *wet_spell_mean*) et des probabilités d'occurrence (*P00* et *P10*) montrent que ces paramètres sont presque entièrement corrigés dans la version de WeaGETS par l'augmentation du degré de la chaîne de Markov. Ceci signifie que l'allongement de la mémoire du processus de génération de l'état pluvieux ou sec du jour suffit à reproduire les séries observées pour les climats présents au Québec. Par contre, quelques différences subsistent au niveau des statistiques observées et simulées de ces séries. Les écarts-type des séries sèches (*dry_spell_sd*) ont été sous-estimés à l'hiver et les écarts-type des séries pluvieuses (*wet_spell_sd*) ont été sous-estimés à l'automne. Ceci signifie que WeaGETS ne réussit pas à reproduire parfaitement la variabilité des durées des séries sèches et pluvieuses pour ces 2 saisons. De plus, les résultats obtenus pour le nombre maximum de jours

secs consécutifs (*consec_dry_day*) ont été sous-estimés pour les stations de Dorval et de Québec à l'hiver seulement.

Tableau XIII

Résultats saisonniers des séries de jours secs et pluvieux obtenus aux stations Dorval, Québec et Mont-Joli avec les données observées (O), et les données générées par WGEN (WG) et WeaGETS (We)

Indices	Dorval			Québec			Mont-Joli		
	O	WG	We	O	WG	We	O	WG	We
	<i>Été</i>								
<i>consec_dry_day</i>	8,4333	10,020	8,8588	8,3333	8,9361	8,4807	9,2000	9,6690	9,0511
<i>consec_wet_day</i>	4,5667	4,5838	4,6861	5,4000	5,2966	5,5841	4,9000	4,7108	5,0369
<i>wet_day_pers</i>	0,4401	0,4135	0,4543	0,4926	0,4695	0,5045	0,4439	0,4191	0,4549
<i>dry_day_pers</i>	0,6567	0,6882	0,6679	0,6311	0,6518	0,6317	0,6542	0,6767	0,6586
<i>corr_spell_lengths</i>	0,0968	0,1017	0,1222	0,1236	0,1213	0,1362	0,0981	0,0957	0,1135
<i>wet_spell_mean</i>	1,8293	1,7339	1,8560	1,9931	1,9156	2,0491	1,8141	1,7498	1,8618
<i>wet_spell_sd</i>	1,0632	1,0772	1,1017	1,2767	1,2660	1,3400	1,1183	1,1027	1,1772
<i>wet_spell_50thperc</i>	1,4667	1,2482	1,5053	1,6167	1,4133	1,6363	1,3000	1,2534	1,4478
<i>dry_spell_mean</i>	2,9939	3,2546	3,0441	2,7487	2,9148	2,7598	2,9513	3,1364	2,9693
<i>dry_spell_sd</i>	2,1635	2,5890	2,2433	2,0846	2,2683	2,1244	2,3127	2,4747	2,3045
<i>dry_spell_50thperc</i>	2,3667	2,4523	2,4229	2,1167	2,2147	2,0952	2,2667	2,3828	2,2634
<i>p00</i>	0,6633	0,6927	0,6722	0,6365	0,6571	0,6375	0,6615	0,6813	0,6634
<i>p10</i>	0,5532	0,5773	0,5384	0,5004	0,5221	0,4880	0,5497	0,5719	0,5372
	<i>Automne</i>								
<i>consec_dry_day</i>	8,7667	9,4349	8,7030	8,0000	8,3503	7,9839	7,5000	8,6167	8,1897
<i>consec_wet_day</i>	5,2667	4,8332	5,1907	5,6333	5,6024	5,4198	5,9000	5,1173	5,4779
<i>wet_day_pers</i>	0,4932	0,4355	0,4828	0,5461	0,4890	0,5248	0,5115	0,4496	0,4981
<i>dry_day_pers</i>	0,6394	0,6687	0,6437	0,6120	0,6321	0,6141	0,6109	0,6420	0,6195
<i>corr_spell_lengths</i>	0,1326	0,1042	0,1265	0,1581	0,1210	0,1389	0,1224	0,0917	0,1176
<i>wet_spell_mean</i>	2,0203	1,8016	1,9602	2,2250	1,9902	2,1291	2,0591	1,8475	2,0196
<i>wet_spell_sd</i>	1,2528	1,1430	1,2249	1,3837	1,3462	1,2997	1,3582	1,2045	1,2749
<i>wet_spell_50thperc</i>	1,6333	1,3093	1,5969	1,9000	1,4899	1,8187	1,7167	1,3430	1,7101
<i>dry_spell_mean</i>	2,7703	3,0672	2,8522	2,5735	2,7598	2,6347	2,6244	2,8296	2,6696
<i>dry_spell_sd</i>	2,1650	2,4164	2,1923	1,9441	2,1105	1,9835	1,9031	2,1797	2,0411
<i>dry_spell_50thperc</i>	1,9833	2,3260	2,1764	1,9500	2,1076	2,0332	2,0667	2,1513	2,0336
<i>p00</i>	0,6425	0,6733	0,6489	0,6180	0,6374	0,6200	0,6248	0,6464	0,6247
<i>p10</i>	0,4947	0,5545	0,5087	0,4469	0,5020	0,4679	0,4863	0,5412	0,4944

Tableau XIII (suite)

<i>Indices</i>	<i>Dorval</i>			<i>Québec</i>			<i>Mont-Joli</i>		
	<i>O</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>	<i>O</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>	<i>O</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>
	<i>Hiver</i>								
<i>consec_dry_day</i>	7,8000	7,7708	6,6890	7,7000	7,2970	6,7253	5,9667	6,9053	6,2341
<i>consec_wet_day</i>	5,7333	5,1561	5,7176	7,2000	6,3622	7,2859	8,5667	7,0216	8,2808
<i>wet_day_pers</i>	0,5229	0,4550	0,5214	0,6044	0,5367	0,6056	0,6380	0,5630	0,6345
<i>dry_day_pers</i>	0,5655	0,6050	0,5590	0,5518	0,5857	0,5484	0,5273	0,5652	0,5348
<i>corr_spell_lengths</i>	0,0884	0,0601	0,0804	0,1563	0,1224	0,1540	0,1653	0,1282	0,1694
<i>wet_spell_sd</i>	1,3636	1,2089	1,3357	1,7999	1,5540	1,7931	2,1219	1,7255	2,0806
<i>wet_spell_50thperc</i>	1,6833	1,3668	1,8016	1,9333	1,6848	2,0834	2,1667	1,7681	2,1752
<i>dry_spell_mean</i>	2,3903	2,5623	2,2955	2,3112	2,4478	2,2532	2,1763	2,3288	2,1795
<i>dry_spell_sd</i>	1,8483	1,9196	1,6191	1,8771	1,8118	1,6537	1,4899	1,7038	1,5358
<i>dry_spell_50thperc</i>	1,7333	1,9632	1,8046	1,6667	1,8695	1,7001	1,6833	1,7741	1,6807
<i>p00</i>	0,5744	0,6102	0,5650	0,5747	0,5922	0,5568	0,5549	0,5716	0,5426
<i>p10</i>	0,4696	0,5373	0,4728	0,3918	0,4555	0,3880	0,3546	0,4292	0,3587
<i>Printemps</i>									
<i>consec_dry_day</i>	9,7000	10,284	9,6549	9,4667	10,141	10,038	10,567	10,210	9,9893
<i>consec_wet_day</i>	5,3667	5,4040	5,3756	6,2667	5,8322	6,0256	5,5333	5,4979	5,7926
<i>wet_day_pers</i>	0,5340	0,4837	0,5314	0,5589	0,5177	0,5630	0,5372	0,4904	0,5376
<i>dry_day_pers</i>	0,6779	0,6916	0,6721	0,6751	0,6901	0,6740	0,6770	0,6885	0,6684
<i>corr_spell_lengths</i>	0,2118	0,1753	0,2034	0,2339	0,2078	0,2370	0,2142	0,1790	0,2060
<i>wet_spell_mean</i>	2,1630	1,9785	2,1650	2,3071	2,1172	2,3216	2,1881	2,0035	2,1984
<i>wet_spell_sd</i>	1,2916	1,3244	1,3106	1,5100	1,4557	1,4720	1,3654	1,3503	1,4160
<i>wet_spell_50thperc</i>	1,8167	1,4847	1,8613	2,0167	1,6124	1,9704	1,8500	1,5083	1,8366
<i>dry_spell_mean</i>	3,2218	3,3025	3,1136	3,2261	3,2963	3,1543	3,1986	3,2722	3,0924
<i>dry_spell_sd</i>	2,6226	2,6875	2,5175	2,5890	2,6731	2,6512	2,7138	2,6632	2,5999
<i>dry_spell_50thperc</i>	2,3833	2,4643	2,3129	2,2833	2,4634	2,2794	2,2833	2,4361	2,2267
<i>p00</i>	0,6864	0,6972	0,6788	0,6857	0,6964	0,6821	0,6846	0,6946	0,6760
<i>p10</i>	0,4571	0,5062	0,4612	0,4294	0,4721	0,4292	0,4516	0,4994	0,4546

4.2.2 Résultats des tests statistiques

Trois tests statistiques sont effectués pour déterminer si les données synthétiques font partie de la même population que les données observées. Tous les tests sont effectués avec un seuil significatif de 5%, c'est-à-dire une valeur critique de 2,5% à chaque extrémité de la distribution pour les tests de Student et de Fisher. Ces tests sont utilisés

pour analyser les moyennes et les variances des indices choisis et les distributions mensuelles des précipitations journalières. Les deux premiers tests comparant les données simulées aux données observées déterminent si les moyennes et les variances des indices calculés ne diffèrent pas significativement les unes des autres. Le troisième test examine les distributions des précipitations observées et simulées pour s'assurer qu'elles ne diffèrent pas significativement l'une par rapport à l'autre. Pour chaque test et chaque station, trente simulations de trois cents années chacune ont été générées.

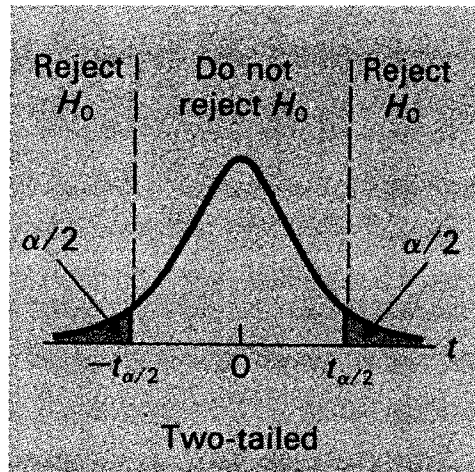
4.2.2.1 Description des indices choisis

Les indices choisis pour la comparaison des données observées et simulées touchent à toutes les catégories décrites plutôt, soit la distribution des précipitations, les quantités de précipitations et les séries de jours secs et pluvieux. Les distributions des précipitations sont analysées par le test de Kolmogorov-Smirnov et les autres catégories par les tests de Student et de Fisher. Pour ce qui est de la catégorie des séries de jours secs et pluvieux, les indices sélectionnés pour l'analyse sont ; les nombres maximum de jours pluvieux et secs consécutifs (`cons_dry_day` et `consec_wet_day`), les persistances des jours secs et pluvieux (`wet_day_pers` et `dry_day_pers`), et les durées moyennes des séries sèches et pluvieuses (`wet_spell_mean` et `dry_spell_mean`). Les indices choisis pour représenter la catégorie des quantités de précipitations sont ; l'intensité des précipitations (`rain_per_rainday`) et les précipitations moyennes (`prec_mean`). Tous ces indices recourent l'essentiel des aspects de la simulation des précipitations.

4.2.2.2 Tests sur les moyennes : test de Student

Le test de Student (t-test) est utilisé pour l'analyse des moyennes des indices calculés avec les données observées et les données simulées. Ce test suppose que les échantillons analysés proviennent de populations normales et possèdent des écarts-type inconnus

mais égaux (Weiss et Hasset, 1991). La façon de procéder au test est de déterminer le seuil significatif et la valeur critique ($t_{\alpha/2}$) à ne pas dépasser à partir de la table de distribution de t. Le seuil significatif représente le pourcentage de chance que l'hypothèse soit rejetée alors qu'elle est vraie. Étant donné que les deux extrémités de la distribution sont analysées, deux valeurs critiques doivent être considérées. Donc, la borne de la première zone de rejet devient la valeur négative de la valeur critique trouvée dans la table ($-t_{\alpha/2}$) et la deuxième borne la valeur positive. La Figure 10 illustre la distribution de t ainsi que les deux valeurs critiques, et la zone de rejet du test.



source : (Weiss et Hasset, 1991)

Figure 10 Distribution du test de Student avec valeurs critiques à chaque extrémitée de la distribution

Par la suite, la valeur du test statistique doit être calculée à l'aide des équations (4.1) et (4.2).

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{s_p \sqrt{(1/n_1) + (1/n_2)}} \quad (4.1)$$

$$s_p = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)s_1^2 + (n_2 - 1)s_2^2}{n_1 + n_2 - 2}} \quad (4.2)$$

Où t est la valeur du test statistique, \bar{x}_1 et \bar{x}_2 sont les moyennes des échantillons, n_1 et n_2 représentent le nombre d'éléments de chaque échantillon, et s_1^2 et s_2^2 sont les variances de chaque échantillon. Si la valeur du test statistique (t) calculé est inférieure à la première borne ou supérieure à la deuxième borne, l'hypothèse de base, étant que les moyennes des deux échantillons sont statistiquement équivalentes, est rejetée. Ce test est effectué avec chaque indice choisi pour les trente simulations de trois cent années. Les résultats de cette analyse sont présentés dans le Tableau XIV.

4.2.2.3 Tests sur les variances : test de Fisher

Le test de Fisher (F-test) est utilisé pour l'analyse des variances des indices calculés avec les données observées et les données simulées. Ce test suppose que les échantillons analysés proviennent de populations normales (Baillargeon, 1990). La façon d'effectuer le test est semblable à celle décrite pour le test de Student. Il faut d'abord déterminer le seuil significatif et la valeur critique ($F_{\alpha/2 ; n_1 ; n_2}$) à ne pas dépasser à partir de la table de la distribution de F. Les paramètres à considérer lors de l'évaluation de cette valeur critique sont le seuil significatif choisi et les degrés de liberté. Les degrés de liberté sont calculés en soustrayant 1 du nombre total d'éléments de chaque échantillon. Comme pour le test de Student, le test de Fisher doit tenir compte de deux valeurs critiques. La borne supérieure de la zone de rejet est la valeur trouvée dans la table de la distribution de F ($F_{\alpha/2 ; n_1 ; n_2}$) et la borne inférieure est l'inverse de la valeur de la borne supérieure (Baillargeon, 1990). Ensuite, la valeur du test statistique doit être calculée à l'aide de l'équation (4.3) :

$$F = s_2^2 / s_1^2 \quad (4.3)$$

Une fois que la valeur de F est calculée, elle est comparée aux deux bornes évaluées précédemment. Si la valeur de F est inférieure à la première borne ou supérieure à la deuxième, l'hypothèse de base, étant que les variances des deux échantillons sont statistiquement semblables, doit être rejetée. Si l'hypothèse de base est rejetée, la variance de l'indice calculé avec les données simulées est considérée comme étant différente de la variance de ce même indice calculé avec les données observées. Les résultats du test de Fisher effectué sur les trente simulations de trois cent années sont présentés dans le Tableau XIV.

Les valeurs représentées en rouge dans le Tableau XIV sont celles dont le nombre de rejets sur trente simulations dépassent la valeur limite de dix. Ceci ne représente pas un seuil significatif mais seulement un moyen rapide de repérer dans le tableau les saisons où le nombre de rejets est important. Il est important de noter que si un test effectué sur les variances d'un indice produit plusieurs rejets, les résultats pour le test des moyennes de ce même indice ne sont plus valides puisque ce test suppose que les variances des deux échantillons sont égales. Ainsi, en analysant les résultats présentés dans le Tableau XIV, il est possible de constater, que de façon générale, les résultats obtenus avec les données simulées par WeaGETS sont meilleurs que ceux obtenus avec les données simulées avec WGEN.

À la station de Dorval, le test sur les moyennes ne produit aucun rejet pour WeaGETS excepté pour les jours secs consécutifs (`consec_dry_day`) à l'hiver. Tandis qu'avec WGEN plusieurs rejets sont observés au niveau des indices relatifs aux séries sèches et pluvieuses pour l'ensemble des saisons. Pour cette même station, le test sur les variances produit, dans le cas des 2 générateurs, des rejets pour les indices concernant les séries de jours secs (`consec_dry_day`, `dry_day_pers` et `dry_spell_mean`) pour toutes les saisons excepté le printemps où aucun rejet n'est observé.

À la station de Québec, les tests ne produisent pratiquement aucun rejet à l'été, à l'automne et au printemps pour WeaGETS. Par contre, à l'hiver, les tests effectués sur les variance des indices relatifs aux séries de jours secs (`consec_dry_day`, `dry_day_pers` et `dry_spell_mean`) et aux quantités de précipitations (`prec_mean` et `rain_per_rainday`) produisent plusieurs rejets. Avec WGEN, plusieurs rejets sont observés à l'hiver autant avec les moyennes que les variances pour l'ensemble des indices. Pour l'automne et le printemps, les rejets se situent au niveau des moyennes et des variances des indices des séries pluvieuses (`consec_wet_day`, `wet_day_pers` et `wet_spell_mean`) et pour l'été aucun rejet n'est observé.

À la station de Mont-Joli, le nombre de rejets des tests effectués sur les variances et les moyennes pour tous les indices calculés n'atteint jamais le cap des dix rejets pour WeaGETS. Au niveau de WGEN, le test sur les variances produit des rejets seulement pour les précipitations moyennes (`prec_mean`) à l'hiver, cependant le test sur les moyennes produit plusieurs rejets pour les séries sèches et pluvieuses à l'automne et à l'hiver.

Dans l'ensemble, les moyennes des indices sont mieux reproduites que les variances autant au niveau de WGEN que de WeaGETS. Aussi, avec les deux générateurs, la saison produisant le plus grand nombre de rejets est l'hiver surtout au niveau des séries sèches. Les quantités de précipitations sont bien reproduites pour les 3 stations et la totalité des saisons. En général, les indices calculés avec les données simulées par WeaGETS représentent plus fidèlement ceux calculés avec les données observées que ceux simulés avec WGEN. Il est donc possible d'avancer que les modifications apportées à la version de WeaGETS ont servi à améliorer la qualité de la génération des précipitations autant au niveau des séries sèches et pluvieuses qu'au niveau des quantités de précipitations.

Tableau XIV

Nombre de rejets obtenus avec les tests statistiques de Fisher et de Student respectivement effectués sur les variances (F) et les moyennes (t) des indices calculés aux stations Dorval, Québec et Mont-Joli avec les données générées par WGEN (WG) et WeaGETS (WE)

Indices	Dorval				Québec				Mont-Joli			
	F		t		F		t		F		t	
	WG	We	WG	We	WG	We	WG	We	WG	We	WG	We
<i>Été</i>												
<i>consec_dry_day</i>	0	0	29	0	0	0	0	0	1	0	0	0
<i>consec_wet_day</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
<i>wet_day_pers</i>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
<i>dry_day_pers</i>	15	23	29	0	0	0	3	0	0	0	8	0
<i>wet_spell_mean</i>	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>dry_spell_mean</i>	0	0	16	0	0	0	2	0	0	0	0	0
<i>rain_per_rainday</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	0
<i>prec_mean</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Automne</i>												
<i>consec_dry_day</i>	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0
<i>consec_wet_day</i>	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	27	1
<i>wet_day_pers</i>	0	0	30	0	7	0	30	0	0	0	30	0
<i>dry_day_pers</i>	2	7	26	0	0	1	1	0	0	0	28	0
<i>wet_spell_mean</i>	1	0	30	0	0	0	30	0	0	0	30	0
<i>dry_spell_mean</i>	30	28	30	0	15	7	13	0	0	0	18	0
<i>rain_per_rainday</i>	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
<i>prec_mean</i>	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0
<i>Hiver</i>												
<i>consec_dry_day</i>	28	30	0	28	30	30	0	14	0	0	18	0
<i>consec_wet_day</i>	0	0	8	0	0	0	14	0	3	0	30	0
<i>wet_day_pers</i>	0	0	30	0	14	0	30	0	0	0	30	0
<i>dry_day_pers</i>	28	18	30	0	26	5	24	0	0	0	28	0
<i>wet_spell_mean</i>	19	2	30	0	0	0	30	0	0	0	30	0
<i>dry_spell_mean</i>	22	30	12	0	21	28	2	0	0	0	9	0
<i>rain_per_rainday</i>	0	6	0	2	6	20	0	3	0	0	9	0
<i>prec_mean</i>	0	0	0	0	30	30	5	1	12	3	5	0
<i>Printemps</i>												
<i>consec_dry_day</i>	0	0	0	0	2	8	0	0	0	0	0	0
<i>consec_wet_day</i>	0	0	0	0	21	19	0	0	3	1	0	0
<i>wet_day_pers</i>	0	0	30	0	0	1	28	0	0	0	30	0
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau XIV (suite)

<i>Indices</i>	<i>Dorval</i>				<i>Québec</i>				<i>Mont-Joli</i>			
	<i>F</i>		<i>t</i>		<i>F</i>		<i>t</i>		<i>F</i>		<i>t</i>	
	<i>WG</i>	<i>We</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>
<i>wet_spell_mean</i>	0	0	30	0	1	1	27	0	0	0	30	0
<i>dry_spell_mean</i>	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
<i>rain_per_rainday</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>prec_mean</i>	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0

4.2.2.4 Tests sur les distributions : test de Kolmogorov-Smirnov

Le test de Kolmogorov-Smirnov est un test qui compare deux distributions dans le but de déterminer si elles font partie de la même population selon un seuil significatif choisi. La façon de fonctionner du test est de calculer la distance maximale entre la courbe de distribution cumulative des données observées et celle des données simulées. Si cette valeur dépasse une certaine valeur critique obtenue à l'aide d'un tableau ou d'une équation, l'hypothèse de base, étant que les deux distributions font partie de la même population, est rejetée. Sinon, on peut considérer que la distribution des données simulées représente bien la distribution des données observées. L'avantage de ce test, comparativement aux autres tests analysant des distributions, est qu'il ne demande pas de déterminer d'intervalles. Cette façon de procéder diminue considérablement le risque d'erreur surtout lorsque la qualité des résultats obtenus dépend en grande partie du choix de ces intervalles.

La façon de procéder est, tout d'abord, de tracer la fonction de distribution cumulative des deux échantillons, dans le cas présent, les précipitations journalières observées et simulées au dessus de 0,25 mm. Pour calculer les fonctions de distribution cumulatives, tous les éléments de chaque distribution sont triés en ordre croissant. Ensuite, la fraction de la totalité des éléments de l'échantillon situé au dessus de chaque valeur est évaluée. C'est avec ces valeurs que, sur un même graphique, les deux courbes de distribution

cumulative sont tracées. La Figure 11 montre un exemple de fonction de distribution cumulative des données observées et simulées avec WGEN et WeaGETS. Une fois ces courbes tracées, la distance maximale entre la courbe observée et simulée est calculée. Cette distance est comparée à la valeur critique sélectionnée à l'aide de la table appropriée ou calculée à l'aide de l'équation (4.4) pour un seuil significatif de 5%.

$$D = \frac{1.36}{\sqrt{nb.d'éléments}} \quad (4.4)$$

Si la distance maximale calculée est supérieure à la valeur de D, l'hypothèse de base est rejetée et la distribution des données simulées est considérée comme différente de la distribution des données observées. Ce processus est appliqué à l'ensemble des précipitations journalières des trente simulations effectuées avec WGEN et WeaGETS pour chaque mois. Le nombre de rejets mensuels aux stations de Dorval, Québec et Mont-Joli est présenté dans le Tableau XV.

Dans ce tableau, tout comme dans le Tableau XIV, les valeurs représentées en rouge sont celles dont le nombre de rejets sur trente simulations dépassent la valeur limite de dix. Ainsi, il est possible de constater que WeaGETS réussit considérablement mieux à représenter la distribution des précipitations que WGEN. La Figure 11 donne un exemple des distributions cumulatives des précipitations observées et simulées par WGEN et WeaGETS pour la station de Dorval au mois de février et mars. Dans cette figure, les courbes tracées avec les données simulées par WeaGETS suivent plus exactement les points tracés avec les données observées que la courbe des données simulées avec WGEN. WGEN a tendance à sous-estimer la quantité d'événements pluvieux de forte intensité et de légèrement surestimer le nombre de précipitations d'intensité moyenne. À la station de Dorval, WGEN franchit le cap des dix rejets onze mois sur douze, tandis que WeaGETS dépasse le cap des dix rejets seulement une fois sur douze, au mois de janvier. Pour les stations de Québec et de Mont-Joli, le même

scénario se répète mais de façon un peu moins dramatique pour WGEN. Il est aussi possible de remarquer que c'est à l'hiver, aux mois de janvier et décembre surtout, que les distributions simulées sont le plus souvent rejetées pour les deux générateurs de climat. Il reste à découvrir pourquoi les précipitations hivernales sont plus difficilement reproductibles par les deux générateurs de climat que les précipitations des trois autres saisons. Est-ce dû à la complexité du patron atmosphérique à l'hiver ou simplement à l'imprécision des instruments de mesure lorsque les précipitations deviennent de la neige ?

Dans l'ensemble, les équations de correction régionale appliquées dans WeaGETS ont servi à améliorer considérablement les distributions des précipitations. Ceci peut être observé autant avec les résultats des indices de STARDEX qu'avec les résultats du test statistique effectué sur les distributions des précipitations journalières. Dans le cas des occurrences des jours secs et pluvieux, l'augmentation du degré de la chaîne de Markov dans WeaGETS a servi à corriger une grande partie des erreurs produites auparavant par WGEN. Ceci peut être constaté autant avec les résultats des indices de STARDEX qu'avec les résultats des tests statistiques.

Tableau XV

Nombre de rejets obtenus avec le test de Kolmogorov-Smirnov effectué sur les distributions de précipitations aux stations Dorval, Québec et Mont-Joli avec les données générées par WGEN (WG) et WeaGETS (WE)

<i>Mois</i>	<i>Dorval</i>		<i>Québec</i>		<i>Mont-Joli</i>	
	<i>WG</i>	<i>We</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>
<i>Janvier</i>	30	14	30	27	30	28
<i>Février</i>	30	0	30	0	30	0
<i>Mars</i>	29	0	23	0	18	0
<i>Avril</i>	19	2	1	0	1	0

Tableau XV (suite)

<i>Mois</i>	<i>Dorval</i>		<i>Québec</i>		<i>Mont-Joli</i>	
	<i>WG</i>	<i>We</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>	<i>WG</i>	<i>We</i>
<i>Mai</i>	28	0	11	0	0	5
<i>Juin</i>	11	0	0	0	0	0
<i>Juillet</i>	28	0	29	0	2	0
<i>Août</i>	23	0	1	0	26	0
<i>Septembre</i>	0	0	0	8	17	0
<i>Octobre</i>	30	0	30	0	29	0
<i>Novembre</i>	24	0	2	0	0	2
<i>Décembre</i>	30	0	30	0	30	22

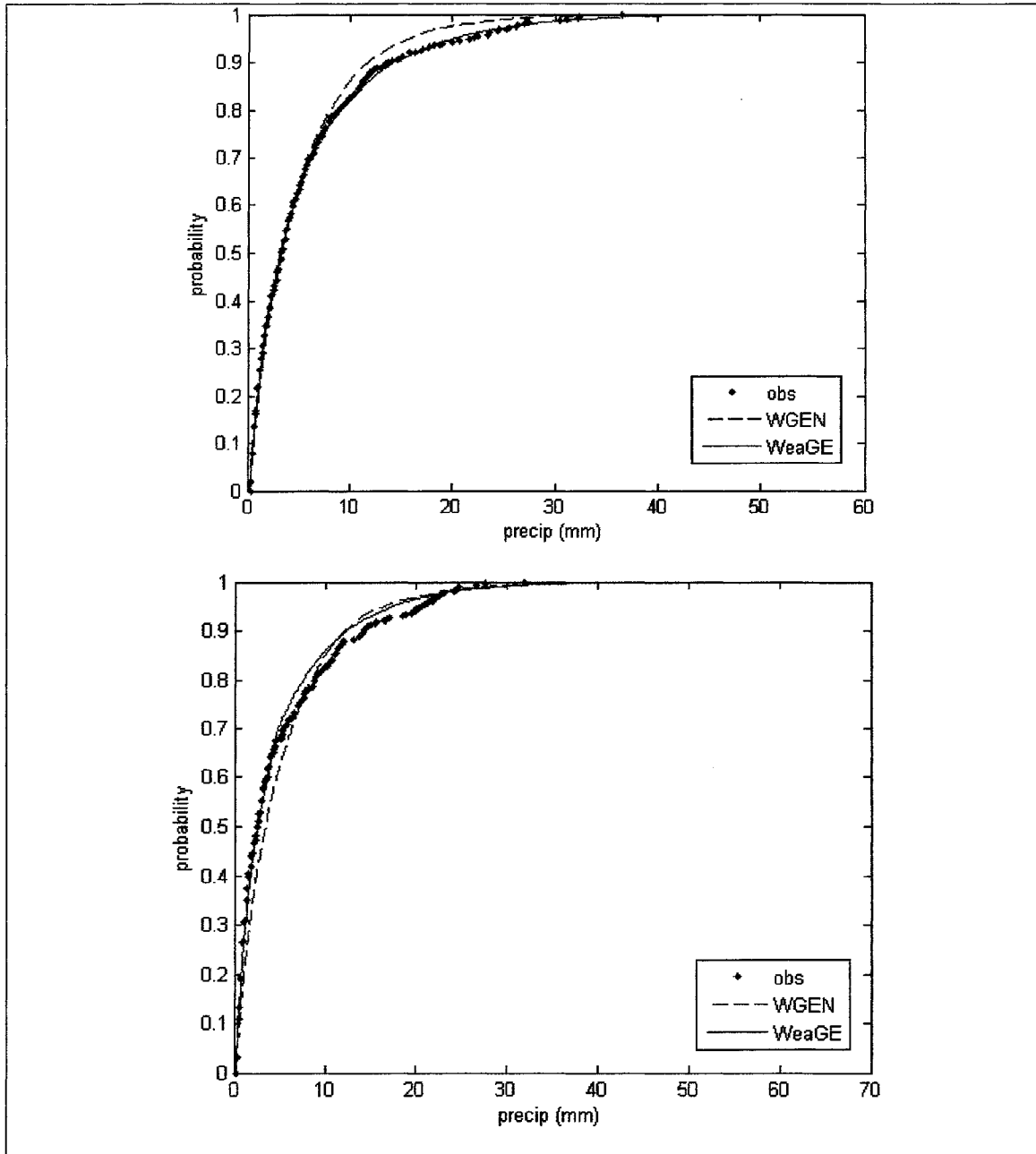


Figure 11 Exemple du test de Kolmogorov-Smirnov effectué sur les distributions cumulatives des précipitations journalières observées et simulées pour la station de Dorval aux mois de mars (haut) et de février (bas).

CHAPITRE 5

VALIDATION INDIRECTE DE WEAGETS

La validation indirecte concerne l'analyse visuelle et statistique de certains critères tirés des résultats de la modélisation hydrologique. Pour ce faire, les données de précipitations et de température simulées par le générateur de climat WeaGETS sont utilisées comme données d'entrée dans un modèle hydrologique. Les résultats obtenus avec ces données simulées sont comparés aux résultats obtenus avec les données observées. Pour procéder aux analyses, un choix de bassin versant, de modèle hydrologique et de critères d'analyse a été fait.

5.1 Présentation du bassin versant

Le bassin versant utilisé pour la validation indirecte est celui de la rivière Châteauguay. Ce bassin versant a été choisi du fait qu'il regroupe plusieurs des stations utilisées dans la validation directe du générateur de climat et qu'il représente bien le type de petits bassins versants présents dans le sud du Québec. Les stations climatologiques présentes sur le bassin versant et utilisées pour la validation directe sont les stations de Dorval, Ormstown, Ste-Clothilde et Ste-Martine. De plus, le bassin versant de la rivière Châteauguay a déjà fait l'objet de plusieurs études dans différents domaines, augmentant ainsi les informations disponibles à son sujet.

Le bassin versant de la rivière Châteauguay possède une superficie de 2543 km² et s'étend du sud-ouest de Montréal, sur la rive sud du fleuve St-Laurent, jusque dans l'État de New York aux États-Unis. Approximativement 60% du bassin se trouve au Québec, et 40% en territoire américain. Il est délimité par les bassins versants des rivières Richelieu à l'est, Saumon, de la Guerre et St-Louis à l'ouest et par le lac St-

Louis au nord (Roy, 2000). Ses eaux se déversent par la rivière Châteauguay dans le fleuve St-Laurent au niveau de la ville de Châteauguay. Le climat de ce bassin versant est considéré humide et mésothermique selon la classification de Thornthwaite (1948), c'est-à-dire l'un des plus chauds et humides du Québec. Sa topographie varie fortement d'une extrémité à l'autre. Au nord, on retrouve la partie canadienne appelée les Basses-Terres-du-St-Laurent dont l'altitude est inférieure à 30 mètres et, au sud, c'est la partie américaine qui s'étend jusqu'aux Appalaches et dont l'altitude maximale atteint les 335 mètres (Roy, 2000).

Le débit moyen annuel de la rivière Châteauguay est de 40 m³/s (Awadallah et al., 1999). La crue printanière contribue à environ 40% de ce débit (Roy, 2000). Deux périodes d'étiage surviennent au cours d'une année, la plus importante en été et une deuxième, moins importante, en hiver. Le débit de pointe maximal observé, pour la période étudiée soit de 1945 à 1998, est de 740 m³/s. Les Appalaches sont la source de la recharge de plusieurs tributaires de la rivière Châteauguay. Les principaux tributaires sont ceux des rivières de l'Esturgeon, des Fèves, des Anglais, aux Outardes et à la Truite. La Figure 12 présente le bassin versant.

L'occupation du territoire du bassin versant de la rivière Châteauguay varie entre les terres agricoles, les zones forestières et quelques zones urbaines. La vocation de la partie canadienne du bassin versant est majoritairement agricole, couvrant 75% de la superficie du territoire avec plusieurs villages situés aux abords des cours d'eau et particulièrement aux abords de la rivière Châteauguay. Au sud, dans la partie américaine du bassin, on retrouve surtout une couverture forestière qui occupe près de 88% du territoire. Dans la partie américaine, quelques zones urbaines sont présentes mais de façon moins importante que dans la partie canadienne.

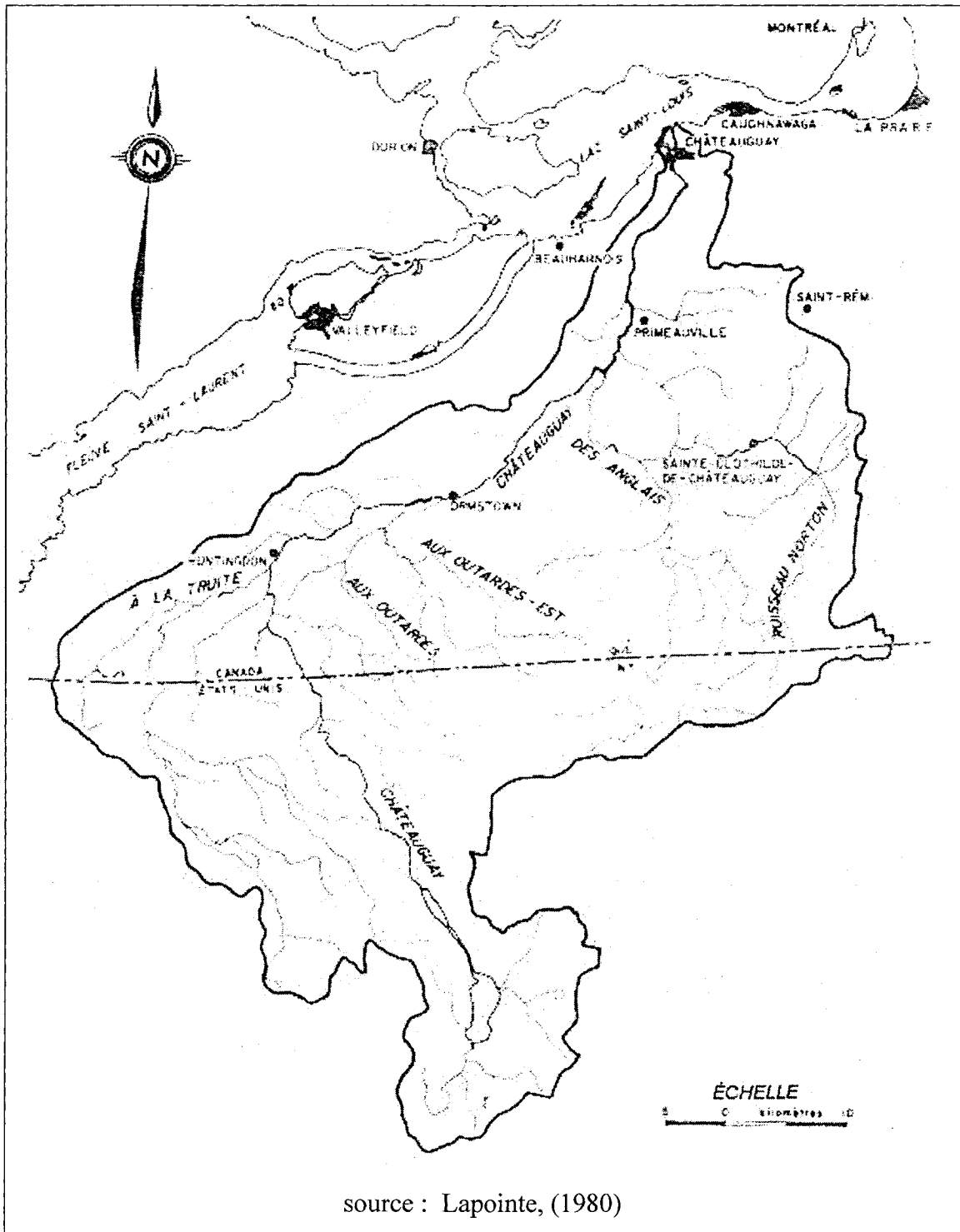


Figure 12 Situation géographique du bassin versant de la rivière Châteauguay.

5.2 Description du modèle hydrologique

Le modèle hydrologique choisi pour la validation indirecte est le modèle HSAMI (Bisson et Roberge, 1983), développé chez Hydro-Québec. Ce modèle est utilisé depuis une quinzaine d'années par Hydro-Québec pour la prévision des apports hydrologiques pour la gestion de leurs réservoirs. HSAMI permet deux types de simulations, soit celui des apports naturels à un réservoir et celui du débit à l'exutoire d'un bassin versant. « HSAMI est un modèle conceptuel en temps discret, à base de trois réservoirs linéaires en cascade qui génèrent des impulsions filtrées par deux hydrogrammes unitaires. » (Bisson et Roberge, 1983). Les simulations sont effectuées à partir des observations des variables climatiques de précipitations liquides et neigeuses, des températures maximales et minimales, de l'ensoleillement et de l'équivalent en eau de la couverture de neige. La version de HSAMI utilisé dans ce projet est la version programmée en langage MATLAB.

Dans ce modèle, l'apport en eau du bassin versant est calculé à partir de la somme des contributions du ruissellement de surface, de la vidange de la réserve intermédiaire et de la vidange de la zone saturée. Pour calculer ces contributions, le modèle regroupe les phénomènes naturels en trois processus. Le premier processus est celui de l'interception qui englobe l'accumulation de la neige au sol et de la pluie sur la neige, la fonte du couvert de neige et le gel et le dégel. Le deuxième processus est celui de l'écoulement vertical comprenant les interactions entre l'eau de surface, la zone non-saturée et la zone saturée (nappe). Et finalement, le troisième processus est celui de l'écoulement horizontal vers l'exutoire. L'écoulement horizontal représente l'eau qui ruisselle en surface ou l'eau quittant la colonne de sol (processus de l'écoulement vertical). Ces trois processus sont représentés à l'aide d'un hydrogramme de surface, d'un hydrogramme intermédiaire ainsi que trois réservoirs (réservoir de surface, réservoir intermédiaire et réservoir modélisant la zone non saturée du sol).

Plusieurs étapes sont nécessaires au calcul de l'apport en eau du bassin versant aussi appelé lame d'eau. Tout d'abord, le modèle procède à l'évaluation de l'évapotranspiration potentielle et l'interception de la pluie et de la neige. Puis, l'eau disponible en surface est divisée en deux parties: l'eau qui ruisselle et l'eau qui s'infiltré. Ensuite, le modèle simule l'écoulement vertical en considérant l'infiltration et le cheminement de l'eau dans les zones saturée et non-saturée. Puis, le modèle simule l'écoulement horizontal de l'eau vers l'exutoire. Pour calculer le débit à l'exutoire, le modèle utilise les précipitations directes ainsi que la lame d'eau laminée générée par le processus de simulation de l'écoulement horizontal pour un pas de temps donné et multiplie ces valeurs par la superficie du bassin versant. La Figure 13 illustre de façon schématique le modèle conceptuel de HSAMI. Comme il n'existe aucun réservoir sur le bassin versant de la rivière Châteauguay, il faut inscrire 0 Km² comme superficie de réservoir pour que le modèle n'en tienne pas compte dans ses simulations et que le débit obtenu soit celui à l'exutoire du bassin versant.

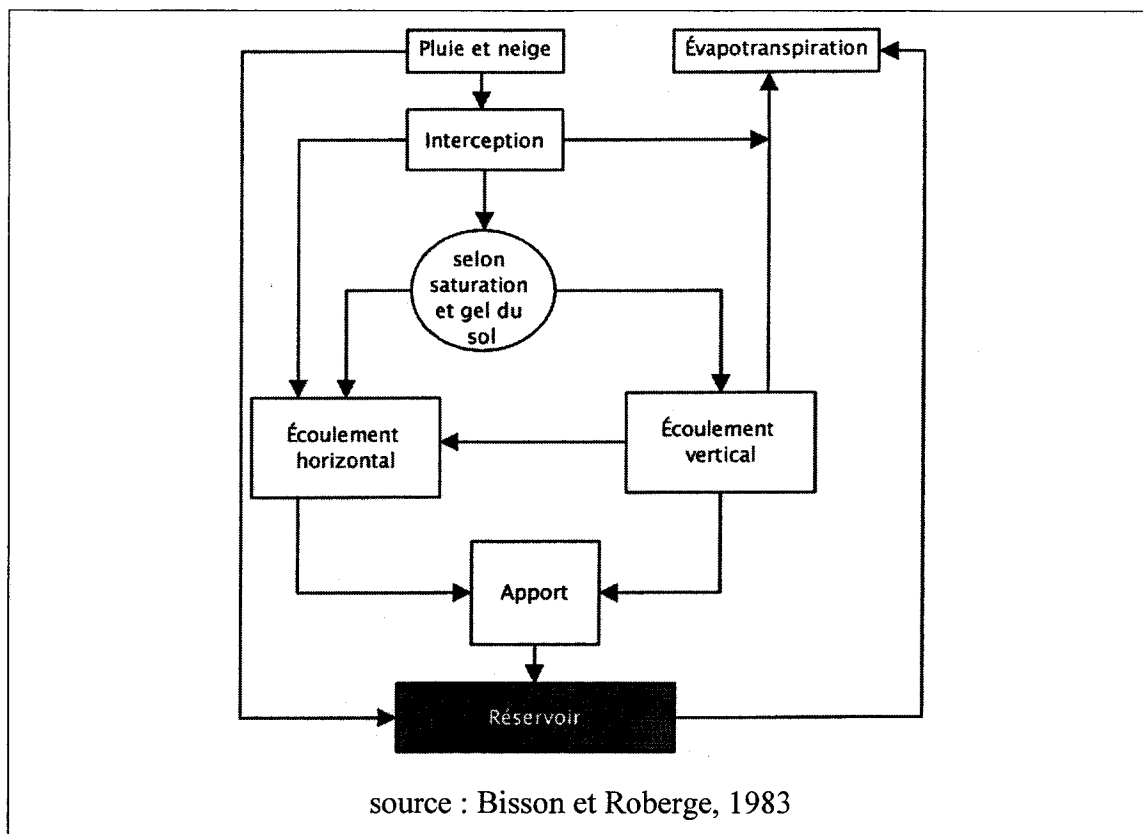


Figure 13 Schéma simplifié du modèle conceptuel HSAMI

Avant toute simulation, le modèle doit être calibré pour le bassin versant de la rivière Châteauguay. Plusieurs paramètres doivent être évalués lors de cet étalonnage. En tout, vingt-trois paramètres liés à l'évapotranspiration, à la fonte de la neige, au ruissellement de surface, à l'écoulement vertical et à l'écoulement horizontal doivent être calibrés. L'étalonnage de HSAMI pour le bassin versant de la rivière Châteauguay a fait l'objet d'un projet de recherche récent (Mareuil, 2005). Son étalonnage a été axé sur la simulation des extrêmes dans le contexte des changements climatiques. Les paramètres obtenus avec son étalonnage seront donc utilisés dans ce projet pour la validation indirecte. Étant donné que le but de ce projet est de comparer les résultats de la modélisation hydrologique avec les données observées et celles générées par WeaGETS, l'étalonnage des paramètres joue un rôle de moindre importance dans l'analyse des résultats obtenus.

5.3 Description des données d'entrée du modèle

Plusieurs données météorologiques observées et simulées sont nécessaires pour permettre au modèle HSAMI de procéder aux calculs des apports au bassin versant. Ces données météorologiques comprennent les températures maximales et minimales, les quantités de pluie et l'équivalent en eau de la neige tombée. Étant donné que WeaGETS ne sépare pas les précipitations générées en pluie et en neige, cette opération doit être faite manuellement avant de procéder à la modélisation. Donc, lorsque pour une journée pluvieuse les températures minimale et maximale sont supérieures à 2°C, la totalité des précipitations journalières est considérée comme liquide. Lorsque les températures minimale et maximale sont inférieures à -2°C, la totalité des précipitations est considérée comme solide. Si les températures minimale et maximale se retrouvent à l'intérieur de l'intervalle [-2 et 2°C], une régression linéaire est appliquée aux précipitations pour déterminer les proportions liquide et solide. Finalement, si la température minimale est inférieure à -2°C et que la température maximale est supérieure à 2°C, une règle de trois est appliquée aux précipitations pour déterminer les proportions liquide et solide. Les données d'ensoleillement moyen pour chaque journée (variant entre 0 et 1) et d'équivalent en eau du stock de neige au sol sont utilisées seulement pour l'étalonnage des paramètres du modèle puisque WeaGETS ne génère pas ces variables. Toutes les variables météorologiques doivent être fournies pour le pas de temps choisi. Dans cette étude, le pas de temps sera de 24 heures. Puisque les données observées d'ensoleillement ne sont pas disponibles pour les stations utilisées, elles seront remplacées par la valeur 0,5 pour l'étalonnage. Pour son étalonnage, le modèle nécessite aussi les données d'apports naturels au bassin versant ou le débit à l'exutoire. Les apports fournis pour l'étalonnage des paramètres du bassin de la rivière Châteauguay sont les débits recueillis à la station hydrométrique située à son exutoire. Ces données couvrent la période de 1945 à 1998.

Sept stations climatologiques sont utilisées pour la modélisation. Quatre des sept stations se trouvent sur le bassin versant, il s'agit des stations de Ormstown, Ste-Martine, Ste-Clotilde et Chasm Falls, cette dernière étant située aux États-Unis. Les trois autres stations se trouvent à proximité du bassin versant, il s'agit des stations de Dorval, Ste-Anne-de-Bellevue et St-Anicet. Toutes les données des stations en territoire canadien ont été fournies par Environnement Canada et les données de la station américaine ont été trouvées sur le site du National Climatic Data Center (<http://www.ncdc.noaa.gov/oa/ncdc>). L'ensemble des données observées pour les variables météorologiques couvre la période de 1959 à 1995, soit trente-sept années.

Les données d'entrée doivent être fournies au modèle en matrice de dimension $n \times m$, n étant le nombre de jours de la période analysée et m le nombre de variables météorologiques (6 pour l'étalonnage et 4 pour la simulation). Les matrices auront donc une dimension de 13 505 (37 années de 365 jours) par 4 pour la simulation et 6 pour l'étalonnage. Les deux premières colonnes de la matrice sont les températures minimales et maximales, les colonnes 3 et 4 sont les précipitations liquides et solides, et dans le cas de l'étalonnage, la colonne 5 comprend les données d'ensoleillement et la colonne 5 celles de l'équivalent en eau de la neige au sol. Les données recueillies aux 7 stations doivent être regroupées pour ne fournir au modèle qu'une seule matrice de la météorologie moyenne. Pour procéder à l'estimation de la météorologie moyenne, un programme développé par Georges Desrochers de l'IREQ et adapté par Marie Minville de l'ETS a été utilisé. Ce programme se sert de la méthode des polygones de Thiessen pour déterminer le poids de chaque station. Si, pour une journée spécifique, une des stations ne possède pas de données observées, le programme utilisera seulement les données des six autres stations pour produire la météorologie moyenne de cette journée. Ainsi, plusieurs patrons sont obtenus et utilisés dépendamment des journées pour calculer la météorologie moyenne. La météorologie moyenne est utilisée directement comme série de données d'entrée lors de la modélisation hydrologique. Elle est aussi

utilisée comme série de données observées fournit à WeaGETS pour la production des séries de données générées qui serviront à la modélisation hydrologique.

5.4 Choix des critères d'analyse

Lors d'une validation indirecte, il est inutile de comparer les hydrogrammes produits avec les données climatologiques simulées aux débits mesurés à l'exutoire. Comme les données simulées sont générées de façon stochastique, elles ne reproduisent pas exactement les séries de données observées. Chaque routine de génération n'est qu'une réalisation possible du climat. Les débits enregistrés à l'exutoire sont les résultats directs des précipitations et des températures observées et ne peuvent être comparés aux hydrogrammes produits avec les données générées. Par conséquent, les critères choisis pour l'analyse de la validation indirecte sont orientés vers les aspects suivants de la modélisation hydrologique : les durées d'étiage, les quantités de ruissellement, les débits de pointe ainsi que l'analyse des périodes de récurrence des différentes crues et l'analyse des fréquences. Pour chaque critère, les résultats obtenus suite à la modélisation hydrologique effectuée avec les données observées seront comparés aux résultats obtenus suite à la modélisation hydrologique effectuée avec les données générées par WeaGETS.. Ces aspects seront analysés à l'aide de graphiques. Les tests statistiques de Fisher et de Student seront aussi effectués sur les moyennes et les écarts type des durées d'étiage, des quantités de ruissellement et des débits de pointe. Ainsi, il sera possible de déterminer si ces différents paramètres de la modélisation hydrologique sont correctement reproduits par le modèle lorsque l'on utilise les données météorologiques générées à l'aide de WeaGETS comme données d'entrée du modèle. Dans le but d'alléger le texte, les termes « observé » et « simulé » seront utilisés respectivement pour représenter les modélisations hydrologiques effectuées avec les données climatologiques observées et celles simulées par WeaGETS.

5.5 Résultats de la validation indirecte

La validation indirecte a été effectuée en comparant les résultats de la modélisation hydrologique pour les critères choisis, obtenus avec les données observées et les données simulées par WeaGETS. Comme pour la validation directe, trente simulations ont été produites pour l'analyse. Par contre, étant donné que dans le modèle hydrologique le nombre d'année de données d'entrée de météorologie moyenne doit être le même que le nombre d'années de données d'apports, seulement trente-sept années ont été simulées avec WeaGETS pour chacune des trente simulations. La présentation des résultats se fera en deux parties, la première étant les graphiques servant à illustrer les résultats pour la totalité des critères d'analyse. Puis, les résultats des tests statistiques pour les critères concernant les périodes d'étiages, les quantités de ruissellement et les débits de pointes seront présentés. La définition et les résultats de chaque critère d'analyse sont maintenant abordés.

5.5.1 Les durées d'étiage

Une durée d'étiage est ici définie comme étant le nombre de jours consécutifs où le débit est inférieur à une certaine valeur prédéfinie. Comme il a été mentionné plus tôt, le débit moyen annuel de la rivière Châteauguay est de 40 m³/s. Pour déterminer la durée des périodes d'étiage, un seuil critique de 12 m³/s a été utilisé. Ce seuil critique a été déterminé à partir des données de débits moyens observés pour la rivière Châteauguay pour la période de 1970 à 2001 présentés sur le site du ministère de l'environnement du Canada (<http://www.wsc.ec.gc.ca/statflo>). La période d'étiage la plus marquée sur la rivière Châteauguay survient habituellement au mois d'août et la valeur de 12 m³/s sélectionnée représente le débit moyen mensuel pour ce mois. Cela signifie que pour comptabiliser les jours faisant partie d'une période d'étiage, le débit devra être consécutivement inférieur au seuil de 12 m³/s. La Figure 14 et la Figure 15 illustrent les

résultats de l'analyse des durées des périodes d'étiage obtenues suite à la modélisation faite avec les données observées et simulées à l'été. Dans la première figure, les périodes d'étiage simulées et observées sont représentées en fonction des durées, triées en ordre croissant. Dans le cas des résultats simulés, les durées maximales annuelles des périodes d'étiages sont la moyenne des 30 simulations. Dans la Figure 14, les durées des périodes d'étiage simulées et observées suivent généralement une même tendance. Bien que les données simulées semblent sous-estimer l'extrémité supérieure de la courbe, c'est-à-dire les plus grandes durées, dans l'ensemble elles suivent bien la courbe des données observées.

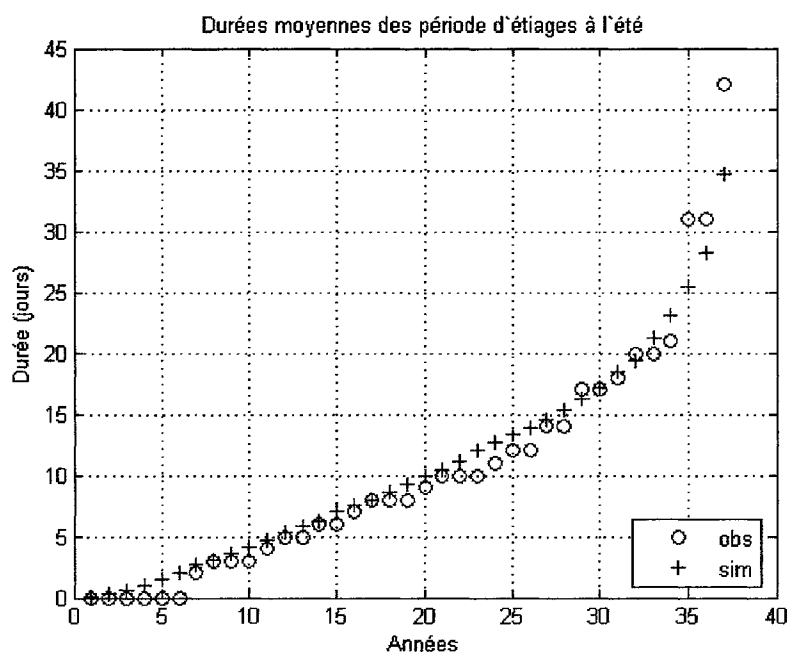


Figure 14 Durées moyennes des périodes d'étiage observées et simulées à l'été pour le bassin versant de la rivière Châteauguay avec un seuil de 12 m³/s

Dans la Figure 15, les résultats simulés et observés sont représentés l'un par rapport à l'autre en tenant compte de l'écart-type des valeurs simulées. La droite en vert représente la droite que les résultats devraient suivre si les données simulées collaient

exactement aux données observées. Encore une fois les données simulées sont le résultat de la moyenne des valeurs maximales à l'été des 30 simulations. Cette figure montre que l'ensemble de la courbe estimée comme idéale est englobée par l'écart-type des données simulées. Cela signifie que dans l'ensemble, les durées des périodes d'étiages simulées reproduisent assez bien les durées des périodes d'étiages observées même si les plus longues durées simulées sont légèrement sous-estimées. Il est aussi observable que les données simulées de l'extrémité supérieure possèdent un écart-type important. Cela démontre que ces données varient considérablement d'une simulation à l'autre. C'est donc dire que pour certaines séries de données générées avec WeaGETS, les durées des séries de jours sans précipitations importantes sont sous-estimées.

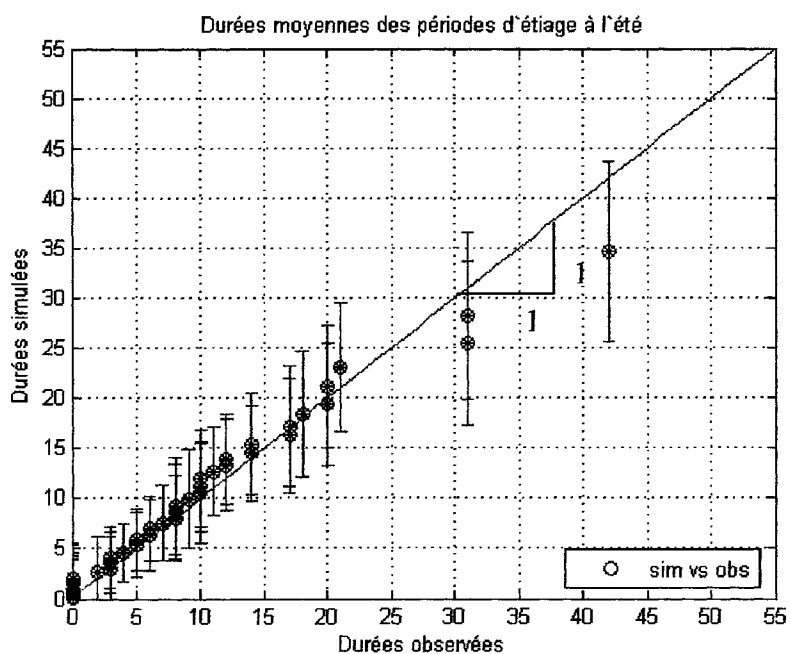


Figure 15 Durées moyennes des périodes d'étiage simulées vs observées à l'été pour le bassin versant de la rivière Châteauguay avec un seuil de $12 \text{ m}^3/\text{s}$

5.5.2 Les quantités de ruissellement direct

Le ruissellement direct est défini comme étant la lame d'eau s'écoulant à la surface du bassin versant suite à un évènement pluvieux. Le ruissellement direct ne comprend pas l'eau qui s'infiltré dans le sol et qui s'écoule ensuite vers l'exutoire. Dans le cas du bassin versant de la rivière Châteauguay, le ruissellement direct représente environ 40% de la lame d'eau totale qui produit le débit à l'exutoire. La Figure 16 et la Figure 17 illustrent la comparaison entre le ruissellement total annuel observé et le ruissellement total annuel simulé. Dans la Figure 16, les quantités de ruissellement simulées sont obtenues en faisant la moyenne des trente simulations et chaque point est tracé avec son écart-type en fonction du ruissellement observé. Dans cette figure, les points tracés suivent relativement bien la droite considérée comme idéale, c'est-à-dire, les données simulées sont très semblables aux données observées. Seuls quelques points ne comprennent pas la droite à l'intérieur de leur écart-type. Il en est ainsi pour les plus petites quantités de ruissellement simulées qui tendent à être surestimées et pour les quelques points se situant environ entre 20 cm et 23 cm de ruissellement qui sont sous-estimés par rapport aux valeurs observées.

La Figure 17 montre les quantités de ruissellement observées et simulées pour les 37 années de la modélisation. Les valeurs simulées sont représentées par une droite et celles observées par des points. L'effet de plateau des valeurs observées s'explique par le fait qu'elles ne sont pas obtenues par une moyenne et donc qu'il ne peut y avoir de décimale entre chaque valeur contrairement aux valeurs simulées qui sont le résultat de la moyenne des 30 simulations. Les résultats de ruissellement annuel moyen fourni par HSAMI ne possèdent pas de décimale. De façon générale, la Figure 17 représente les mêmes résultats que la Figure 16. Autrement dit, les données simulées semblent bien reproduire celles observées sauf pour quelques points inférieurs à 10 cm de ruissellement annuel et quelques autres entre 20 et 23 cm de ruissellement annuel.

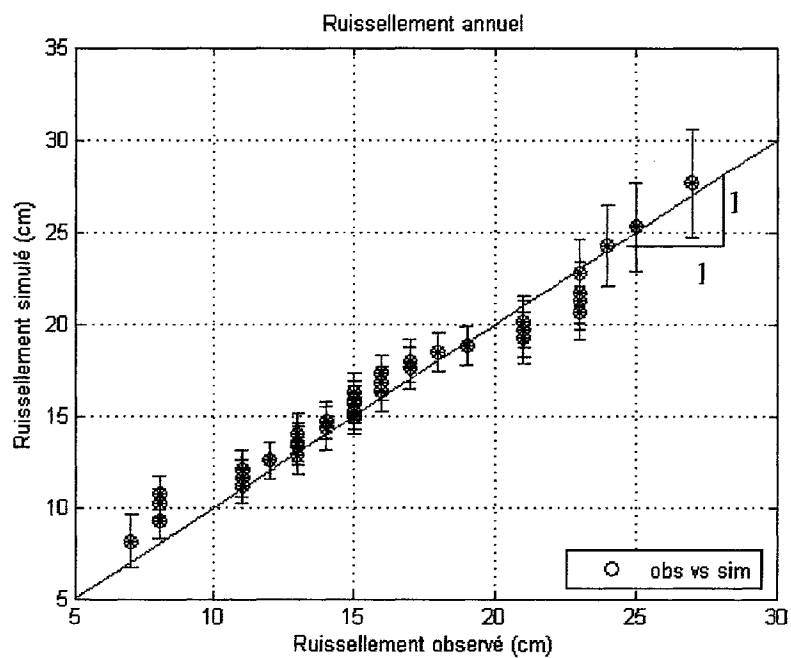


Figure 16 Ruissellement moyen annuel simulé vs observé pour le bassin versant de la rivière Châteauguay

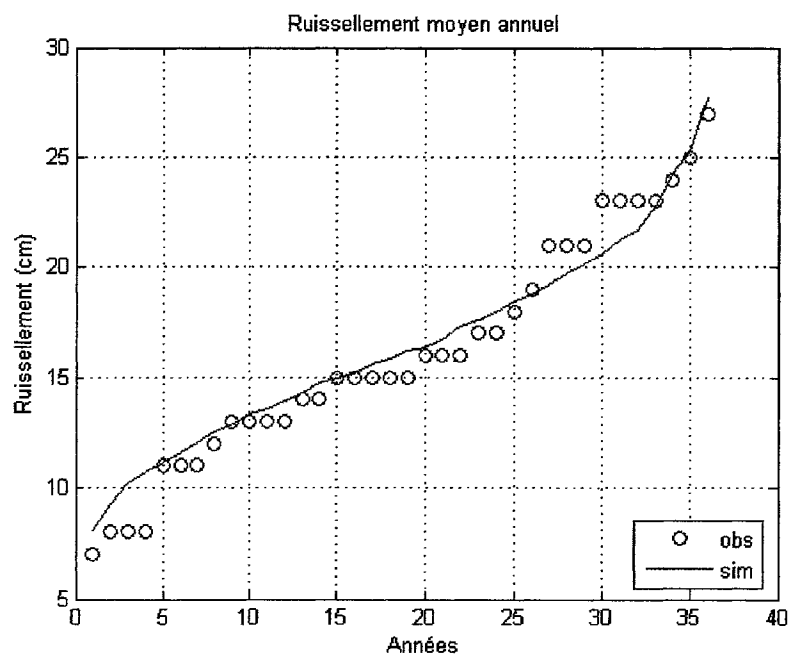


Figure 17 Ruissellement moyen annuel observé et simulé pour le bassin versant de la rivière Châteauguay

5.5.3 Les débits de pointe

Le débit de pointe est le débit le plus élevé pour une année donnée. Il existe deux types de débits de pointe, celui de la crue printanière et celui généré par un orage en période estivale. Au Québec, le débit de pointe annuel est principalement obtenu suite à la fonte printanière. Donc, dans la plupart des cas, lorsque le terme débit de pointe est utilisé, il s'agit du débit maximal de la crue printanière. Les caractéristiques à considérer lors de l'analyse du débit de pointe sont l'intensité et l'occurrence. Pour comparer l'intensité des débits de pointe observés et simulés il faut tout d'abord obtenir le débit maximal pour chaque année. L'analyse de ce paramètre de la modélisation est importante puisqu'il est directement lié à la génération des événements extrêmes qui sont d'intérêts dans l'étude des changements climatiques. Si WeaGETS réussit à bien reproduire les événements pluvieux extrêmes, cela se traduira dans la modélisation hydrologique par un débit de pointe obtenu avec les données générées près de la valeur de débit de pointe obtenu avec les données observées.

La Figure 18 illustre les débits annuels moyens pour les 37 années de la modélisation. Dans cette figure, chaque point de la courbe des données simulées est le résultat de la moyenne des 30 simulations. L'aspect important à considérer dans cette figure est l'occurrence de la crue de printemps. Puisque les points des deux courbes sont des moyennes, les valeurs de débits de pointe estivales ne sont pas représentatives. Par contre, il est possible d'observer le moment auquel les crues de printemps surviennent. Comme les deux courbes sont pratiquement superposées au moment de la crue de printemps, il est possible d'en conclure que l'occurrence de cette dernière est bien reproduite par la modélisation effectuée avec les données générées avec WeaGETS. WeaGETS réussit donc à recréer le contexte saisonnier du cycle de la fonte de la neige. La crue de printemps est due à la fonte de la neige accumulée au cours de l'hiver, aux précipitations printanières et aux températures. Ainsi, il est possible d'avancer que, dans

l'ensemble, WeaGETS génère correctement les conditions hivernales et printanières qui gèrent l'occurrence de la crue de printemps.

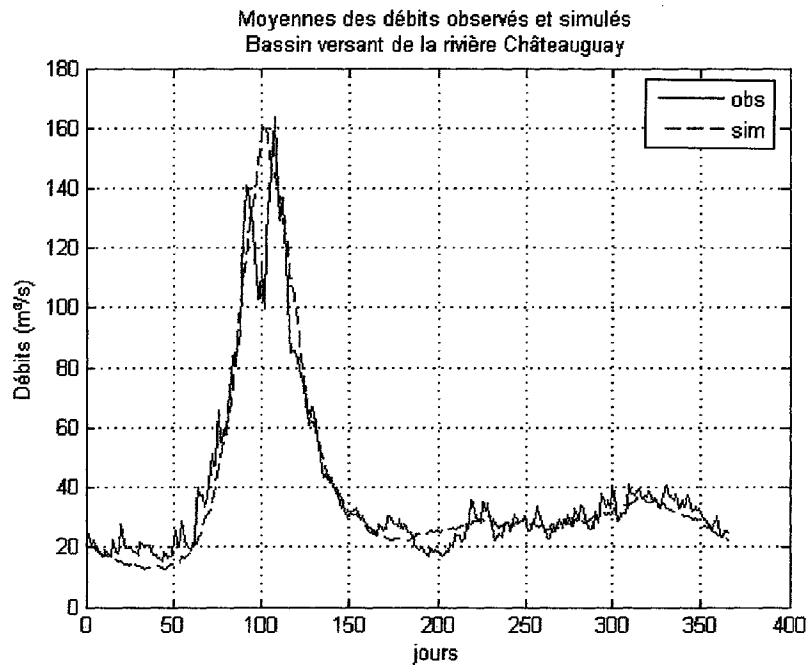


Figure 18 Moyennes des débits observés et simulés pour le bassin versant de la rivière Châteauguay

La Figure 19 montre les débits de pointe annuels simulés en fonction des débits de pointe observés. Dans cette figure, il est possible d'observer que les données simulées surestiment, la majeure partie du temps, la valeur de débit de pointe annuel. Le débit le plus élevé observé pour la période étudiée de 37 années est de $740 \text{ m}^3/\text{s}$ tandis que celui simulé est de $865 \text{ m}^3/\text{s}$ avec un écart-type de $138 \text{ m}^3/\text{s}$. Comme la plupart du temps le débit de pointe annuel survient lors de la crue de printemps, les résultats obtenus permettent de supposer soit que WeaGETS ne réussit pas à correctement générer les quantités de précipitations neigeuses ou bien qu'il surestime les précipitations printanières. Comme il a été démontré dans le chapitre 4 sur la validation directe des données de précipitations générées par WeaGETS, les premiers percentiles de la distribution des précipitations hivernales pour la région de Dorval (station située à

proximité du bassin versant de la rivière Châteauguay et compris dans la météorologie moyenne) sont surestimés par rapport aux données observées. Ce phénomène peut se traduire par de plus grandes accumulations de neige en hiver. De plus, toujours pour la station de Dorval, le 99^e percentile de la distribution des précipitations printanières est surestimé démontrant que WeaGETS génère des précipitations extrêmes plus importantes que celles observées pour le printemps. Ces deux facteurs pourraient expliquer pourquoi, lors de la modélisation hydrologique, les débits de pointe simulés sont plus grands que ceux observés.

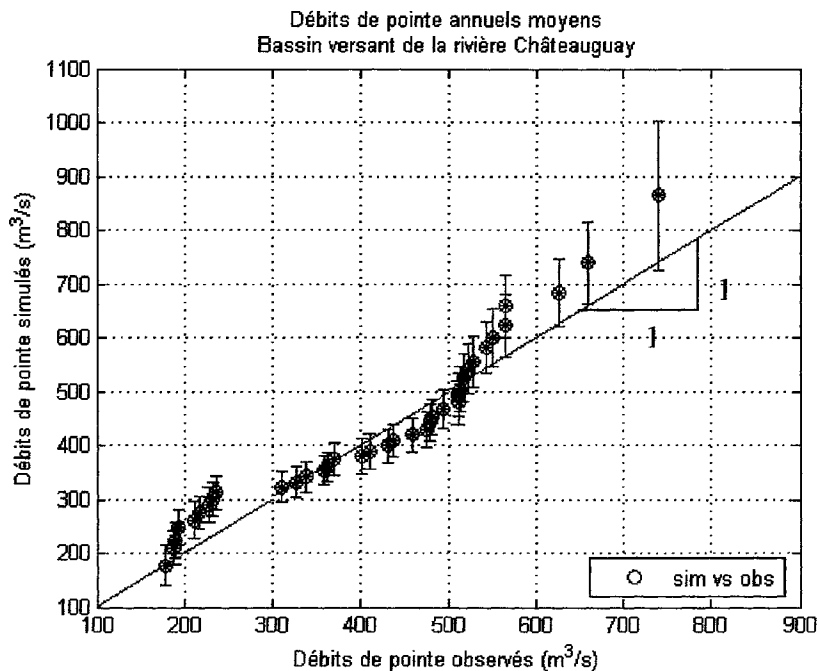


Figure 19 Débits de pointe annuel moyens simulés vs observés pour le bassin versant de la rivière Châteauguay (30 simulations de 37 années)

La Figure 20, la Figure 21 et le Tableau XVI illustrent les différentes périodes de récurrences pour les crues de printemps, et celles d'été et automne séparément. Ces périodes de récurrence ont été obtenues en ajustant les débits de pointe selon une loi de Log Pearson avec un intervalle de confiance de 95%. Dans le Tableau XVI, la

différence entre les données observées et simulées a été calculée pour permettre la comparaison des valeurs observées et simulées des différentes crues. Avec ce tableau et les deux figures, il est possible d'observer que les débits de pointe les plus élevés se retrouvent effectivement au printemps. Il est aussi possible de constater que les débits de pointe simulés des crues de printemps sont plus près des valeurs observées que les débits de pointe simulés des crues d'été et d'automne. Les évènements extrêmes se produisent surtout à l'été et à l'automne et ce sont en général ces évènements que WeaGETS a le plus de difficulté à reproduire. Dans la météorologie moyenne employée lors de la modélisation hydrologique, certaines séries de données générées de précipitations contiennent des précipitations journalières de 135 mm. Cependant, les précipitations journalières maximales de la série de données observée sont d'environ 100 mm. Cet écart important entre certains évènements pluvieux extrêmes est probablement la cause des grandes différences observées au niveau des valeurs de débit ayant une période de récurrence supérieure à 50 ans. Aussi les bornes inférieure et supérieure des débits de pointe des crues d'été et d'automne sont beaucoup plus étalées que celles des crues de printemps. Comme c'est en été et en automne que les évènements pluvieux extrêmes se produisent, et que ces derniers ne sont pas constants d'une année à l'autre, cela produit des bornes d'intervalle de confiance plus distancées l'une par rapport à l'autre. Tandis que les crues printanières sont surtout le résultat d'un phénomène plus stable dans le temps qu'est la fonte de la neige accumulée lors de l'hiver. Puisque que l'accumulation de neige est plus constante au cours des années, cela se traduit par des débits de pointe plus constants pour cette saison d'une année à l'autre.

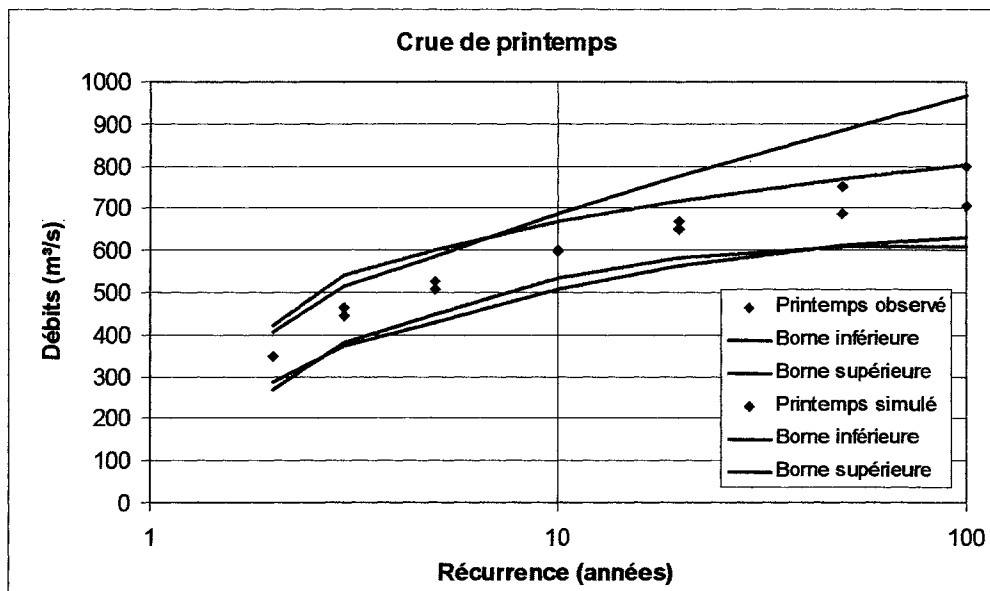


Figure 20 Périodes de récurrence des crues printanières selon la loi de Log Pearson

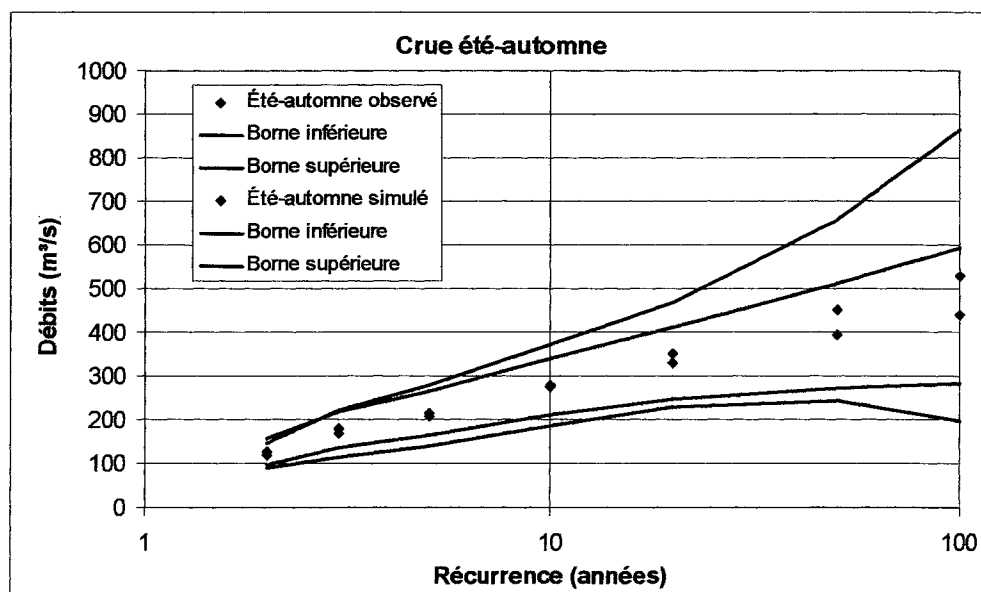


Figure 21 Périodes de récurrence des crues d'été et automne selon la loi de Log Pearson

Tableau XVI

Résumé des débits de pointe des crues de printemps et des crues d'été et d'automne pour différentes périodes de récurrence

<i>Périodes de récurrence</i>	<i>Printemps</i>			<i>Été-automne</i>		
	<i>observé</i>	<i>simulé</i>	<i>diff</i>	<i>observé</i>	<i>simulé</i>	<i>diff</i>
100	706,93	798,27	13%	438,29	529,7	21%
50	687,89	748,58	9%	393,39	449,14	14%
20	648,44	669,6	3%	328,39	348,71	6%
10	600,61	596,57	-1%	274,35	276,98	1%
5	525,73	507,47	-3%	215,34	208,16	-3%
3	461,81	444,66	-4%	177,84	168,63	-5%
2	346,72	346,87	0%	125,57	118,02	-6%

5.5.4 L'analyse de fréquence

L'analyse de fréquence est effectuée sur l'ensemble des débits journaliers des 37 années modélisées avec les données observées et celles générées pour les 30 simulations. Les débits de la série observée et de chaque série simulée sont triés en ordre croissant et par la suite le rang de chaque élément de la série est déterminé. La Figure 22 illustre deux exemples d'analyse de fréquence, celui dont les données simulées représentent le moins bien les données observées et un autre dont la représentation des données observées est quasiment parfaite. Dans ces deux exemples, la fréquence des débits générés avec les données d'une des 30 simulations est comparée aux débits obtenus avec les données observées. Dans cette figure, les périodes de retour sont exprimées en jours.

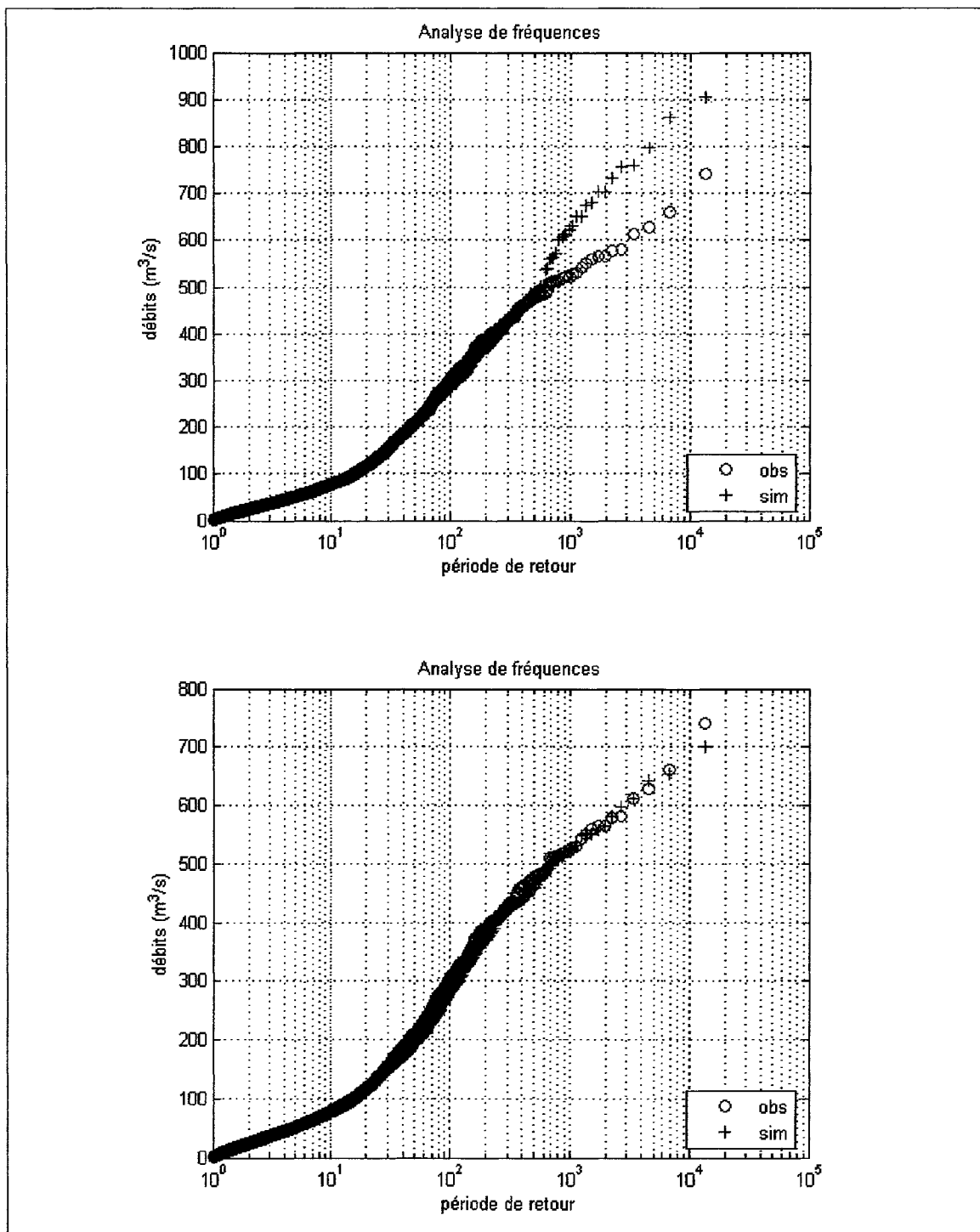


Figure 22 Exemple d'analyse de fréquence pour 2 simulations des 30 effectuées pour le bassin versant de la rivière Châteauguay

L'observation de ces deux exemples représentatifs de la variété de résultats obtenus permet de constater que chaque simulation est indépendante. Elles peuvent être considérées, tout comme les données observées, comme une seule réalisation possible du climat. Dans l'ensemble des cas de simulations, les débits avec une période de retour inférieure à 100 ans, sont la plupart du temps dans le même ordre de grandeur que les valeurs observées. C'est-à-dire que la courbe simulée suit presque exactement la courbe observée. Ce ne sont donc, encore une fois, que les débits extrêmes qui posent problème au niveau de la modélisation hydrologique.

5.5.5 Résultats des tests statistiques

Tout comme lors de la validation directe, les tests statistiques sur les moyennes et les variances ont été effectués. Ces tests ont été exécutés sur les critères de durée de périodes d'étiages, sur les quantités de ruissellement et sur les débits de pointe. Ainsi les 30 simulations ont été comparées aux données observées pour ces critères avec comme hypothèse que les moyennes et les variances des deux échantillons ne diffèrent pas significativement les unes des autres selon un seuil significatif de 5%. Le Tableau XVII montre les résultats de ces tests statistiques. D'une manière plus spécifique, il présente le nombre de simulations où les hypothèses ont été rejetées. Au niveau du test sur les moyennes (test de Student), aucune des simulations n'a été considérée comme significativement différente des données observées pour les trois critères. Pour ce qui est du test statistique effectué sur les variances (test de Fisher), les trois critères présentent des rejets de l'hypothèse de base. Par contre, le nombre de rejets est faible et il est difficile d'en conclure que les données simulées ne représentent pas les données observées.

Tableau XVII

Résultats des tests statistiques de Fisher (F-test) et de Student (t-test) respectivement effectués sur les variances et les moyennes des critères d'analyse

<i>Critères d'analyse</i>	<i>F-test</i>	<i>t-test</i>
<i>Durée des périodes d'étiage</i>	5	0
<i>Quantité de ruissellement</i>	1	0
<i>Débits de pointe</i>	1	0

CHAPITRE 6

ANALYSE ET DISCUSSION DES RÉSULTATS

Dans ce mémoire, plusieurs aspects de la génération de données climatologiques ont été abordés. Dans un premier temps, la comparaison entre les deux principaux types de générateur de climat a été faite. Par la suite, des modifications ont été apportées à un générateur déjà existant dans le but d'améliorer son efficacité. Pour s'assurer de l'exactitude des résultats obtenus suite aux modifications apportées, deux validations ont été exécutées, une première directe et une deuxième indirecte. L'objectif du présent chapitre est donc d'analyser les résultats obtenus et de discuter de l'évolution future du nouveau générateur de climat développé dans le contexte des changements climatiques. Le chapitre se divisera selon différents thèmes. Les deux premiers thèmes toucheront le caractère saisonnier et régional de la génération des données climatologiques. Suivront ensuite les études futures à réaliser sur le générateur de climat et l'évolution du domaine de la génération de données climatologiques dans le contexte des changements climatiques. Mais tout d'abord, réitérons la raison du choix d'un générateur de climat de type Richardson (1981) pour étudier les effets des changements climatiques.

6.1 Types de générateurs

Comme il a été vu dans le chapitre 1, deux types de générateurs de climat sont largement répandus. Les deux principaux représentants de chacune des catégories sont Lars-WG (Racsko et al., 1991a) et WGEN (Richardson, 1981). Dans le chapitre 2, une comparaison de ces deux types de générateur a été présentée. Bien que dans l'ensemble les résultats obtenus avec Lars-WG soient plus justes que ceux obtenus avec WGEN, le choix s'est tout de même arrêté sur WGEN puisque la décision d'employer un générateur de climat dépend souvent de l'utilisation qui sera faite de ce dernier. Dans le

contexte qui nous intéresse tout particulièrement dans ce mémoire, l'utilisation des générateurs de type WGEN est plus pertinente puisqu'elle nous permet théoriquement de modifier les paramètres de la simulation pour tenir compte des effets produits par les changements climatiques. La façon de procéder est d'utiliser le lien existant entre les données statistiques des quantités mensuelles obtenues avec un modèle de circulation générale et les paramètres des processus journaliers du générateur stochastique. Ce lien peut être utilisé pour ajuster les paramètres journaliers décrivant le climat présent pour un site spécifique de façon consistante avec les données statistiques mensuelles produites avec le modèle de circulation générale pour le climat futur (Wilks, 1992). Avec un générateur de type Lars-WG, en contrepartie, il n'y a seulement que la modification des valeurs des différentes séries qui est possible. Comme les effets des changements climatiques se feront sentir non seulement sur la durée et la quantité des précipitations mais également sur le schéma de leurs occurrences, il est important de pouvoir modifier ces paramètres pour pouvoir bien représenter les effets qu'auront de tels changements. Comme il a été mentionné au chapitre 1, il existe aussi un outil appelé SDSM qui permet de « downscaler » les données provenant d'un modèle de circulation générale en utilisant une méthode combinant l'approche stochastique et des techniques de régression linéaire. Plusieurs études ont démontré que cet outil est peu performant pour la génération des précipitations.

6.2 Caractère saisonnier des données générées

Lors de la comparaison des deux types de générateur et de la validation directe et indirecte, il a été souligné que, pour certains critères d'analyse, les résultats obtenus variaient considérablement d'une saison à l'autre, la saison la plus problématique étant l'hiver. L'analyse du caractère saisonnier des résultats obtenus se fera sous les aspects suivants : distribution et quantité des précipitations, analyse des séries sèches et

pluvieuses, influence sur la modélisation hydrologique de chacun de ces paramètres lors de la validation indirecte.

6.2.1 Distribution et quantité de précipitations

Dans le chapitre 4, l'analyse des percentiles et des quantiles des précipitations pour les données générées avec WGEN et WeaGETS démontre une marge d'erreur plus importante à l'hiver comparativement aux autres saisons. En fait, l'erreur est surtout due à la distribution des percentiles pour cette saison. L'équation de correction appliquée aux précipitations est une équation régionale annuelle divisée en deux parties. La première partie concerne les plus petits percentiles, c'est-à-dire ceux surestimés et la deuxième concerne les plus grands percentiles, donc ceux dont la valeur est sous-estimée. Lors de l'application de cette équation de correction aux précipitations, les distributions pour chaque région sont divisées en deux parties selon leur distribution annuelle. La séparation et l'application de l'équation de correction entre ces deux parties sont donc basées sur une approche annuelle et non saisonnière. La distribution des précipitations de la saison hivernale ne semble pas suivre la tendance annuelle. La séparation entre les deux parties de la distribution pour l'hiver est au même endroit que celle des autres saisons mais les corrections à apporter au percentile juste au dessus de cette séparation est plus importante que celles à apporter aux trois autres saisons. Par exemple, si pour une station donnée la séparation entre les percentiles surestimés et ceux sous-estimés se trouve entre les 80^{ième} et le 90^{ième} percentiles, pour l'hiver la correction à apporter au 90^{ième} percentile sera plus importante que celle à apporter à ce même percentile pour les trois autres saisons. Cet effet se répercute également sur les quantités de précipitations générées. Le nombre de jours ayant des précipitations au-dessus de 10 mm à l'hiver est sous-estimé de façon plus importante que celui des autres saisons. Comme la valeur de 10 mm se retrouve justement entre les percentiles problématiques

de l'hiver, cela se traduit par une sous-estimation relativement importante du nombre de précipitations au dessus de 10 mm.

Pour la majorité des stations étudiées, l'hiver est une saison qui ne se comporte pas exactement de la même façon que l'été, l'automne et le printemps. La façon de corriger les précipitations est dans l'ensemble efficace, mais si le facteur possédait aussi un aspect saisonnier les résultats obtenus en hiver seraient considérablement améliorés.

6.2.2 Séries de jours secs et pluvieux

Le problème majeur concernant la génération des séries de jours secs et pluvieux se produit à l'hiver lors de la génération des séries sèches. Ce problème est identifiable autant au niveau de la génération des précipitations avec WGEN qu'avec WeaGETS. Plusieurs causes peuvent expliquer la génération inadéquate des séries de jours secs à l'hiver. Pour ce qui est de WGEN, le problème de génération des différentes séries est généralement dû à la chaîne de Markov qui n'est pas suffisamment longue pour permettre une bonne représentation des séries sèches et pluvieuses pour les quatre saisons confondues. Par contre, dans WeaGETS, les modifications apportées à la chaîne de Markov ont permis d'améliorer considérablement les séries sèches et pluvieuses pour l'été, l'automne et le printemps, bien qu'à l'hiver la durée des séries sèches soit restée problématique. La Figure 23 montre l'estimation du paramètre d'occurrence d'une série de jours secs avec une chaîne de Markov de 3^e ordre dans WeaGETS. Il est possible d'observer dans cette figure que le paramètre d'occurrence est mal évalué par la série de Fourier à quatre harmoniques (voir chapitre 1) au début de l'année soit au mois de janvier. Effectivement, les deux premiers points sont surestimés tandis que le troisième est sous-estimé. Ce phénomène peut expliquer en partie pourquoi les séries sèches sont moins bien représentées à l'hiver qu'à l'intérieur des trois autres saisons, où les

paramètres d'occurrence semblent mieux estimés par la série de Fourier à quatre harmoniques.

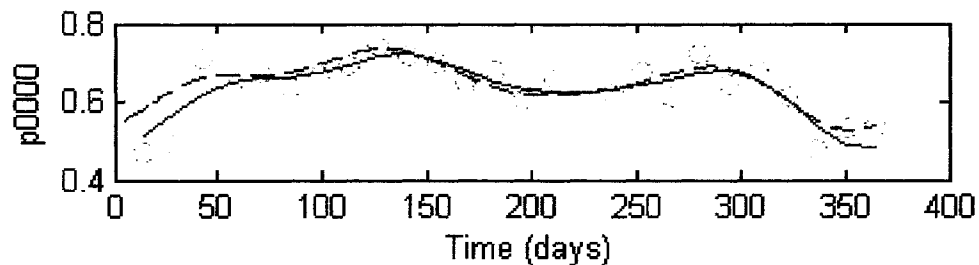


Figure 23 Exemple de séries de Fourier à 4 harmoniques appliquées aux probabilités d'occurrence des séries sèches calculées pour des périodes de 14 jours

Lors du test statistique effectué sur les distributions des précipitations (voir chapitre 4), il a pu être constaté que le mois produisant le plus de rejets de l'hypothèse de base, à savoir que la distribution des données simulées fait partie de la même population que les données observées, est le mois de janvier. Combinant les problèmes liés à l'application de l'équation de correction pour certains percentiles et celui relié à l'estimation inadéquate des probabilités d'occurrence à l'hiver, il est possible d'expliquer les résultats obtenus lors des différents tests statistiques.

6.2.3 Effets sur la modélisation hydrologique

Ces problèmes persistants au niveau de la génération des précipitations se répercutent lors de la modélisation hydrologique avec ces données comme entrées au modèle. Dans le chapitre 5, une validation indirecte a été effectuée avec le modèle hydrologique HSAMI et les données de températures et de précipitations générées avec WeaGETS. Lors de cette validation, plusieurs aspects de la modélisation ont été analysés. Dans l'ensemble, les résultats de la validation indirecte sont satisfaisants. Les périodes

d'étiage, les quantités de ruissellement direct, ainsi que l'occurrence de la crue de printemps, sont relativement bien modélisés. Autrement dit, la modélisation effectuée avec les données générées par WeaGETS pour ces paramètres reproduit bien ces mêmes paramètres obtenus suite à la modélisation effectuée avec les données observées. Les principales différences entre les deux modélisations se situent au niveau des débits de pointe annuels, des crues d'été-automne et de celles de printemps.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer la surestimation des débits de pointe des crues d'été-automne et de printemps. Tout d'abord, il faut souligner que c'est lors de la crue d'été-automne que le débit de pointe est le plus surestimé par la modélisation hydrologique effectuée avec les données générées par WeaGETS. Les crues d'été-automne sont les conséquences d'événements pluvieux importants. Étant donné que ces crues ne dépendent souvent que d'un seul événement, il est attendu que cette valeur sera surestimée ou sous-estimée si le générateur de climat utilisé ne génère pas parfaitement les événements extrêmes. Par contre, la crue de printemps est le résultat d'une accumulation de neige résultant d'une série de chutes de neige sur plusieurs mois. Par conséquent, même si quelques unes de ces chutes de neige ont été surestimées, cela ne se traduira pas par un écart aussi marqué entre les débits printaniers extrêmes simulés et observés. Les erreurs observées lors de la modélisation hydrologique pour ce qui concerne les débits de pointe des crues printanières pourraient plutôt être attribuables à différentes causes telles que la valeur des précipitations extrêmes au printemps, la répartition neige-pluie effectuée manuellement (voir chapitre 5) et la simulation des redoux. La première de ces causes est une erreur provenant de la génération faite avec WeaGETS. Comme WeaGETS ne réussit pas encore parfaitement à recréer les précipitations extrêmes, cela se répercute au niveau de la modélisation des différentes crues. La répartition neige-pluie lors de la préparation des données d'entrée du modèle peut aussi être problématique. Cette répartition a été effectuée de manière empirique et peut ne pas être la façon adéquate d'effectuer la séparation entre les précipitations liquides et solides. Cette façon de procéder pourrait être la cause d'une mauvaise

estimation des débits de pointe des crues printanières puisqu'il peut en découler une surestimation ou une sous-estimation de la quantité de neige accumulée à l'hiver. Au niveau des températures, aucune modification majeure n'a été apportée au générateur, sauf lorsque la température minimale journalière se trouve à être plus élevée que la température maximale. Quand cette situation se produit, la température maximale est remplacée par la température minimale plus 0.1 °C. Comme il a été discuté dans le chapitre 2, les températures maximales et minimales générés par WGEN (donc WeaGETS également) ne réussissent pas à reproduire la variabilité mensuelle des températures maximales et minimales observées. Ce phénomène est identifiable plus particulièrement à l'hiver et au printemps où la variance des données générées est sous-estimée (chapitre 2, figure 8). Cet aspect de la génération des températures peut expliquer en partie la simulation incorrecte des débits de pointe des crues printanières puisqu'il peut être à l'origine d'une reproduction incorrecte des périodes de redoux.

6.3 Caractère régional

Avant l'application de l'équation de correction régionale et l'augmentation du degré de la chaîne de Markov, la qualité des résultats obtenus aux différentes stations différait grandement. Étant donné le peu de mémoire du processus de génération des jours pluvieux et secs avec une chaîne de Markov de 1^{ière} ordre, les résultats aux stations situées à l'intérieur des zones climatiques désertiques ou maritimes démontraient une certaine faiblesse du processus de génération. L'augmentation du degré de la chaîne de Markov ainsi que l'ajout de l'équation de correction régionale ont permis d'améliorer la génération des données climatologiques d'une région à l'autre. Ainsi, la chaîne de Markov avec un degré augmenté a permis de tenir compte des climats dont les séries de jours secs ou pluvieux étaient plus longues que celles des climats plus tempérés. Aussi, l'équation de correction régionale a servi à mieux étaler la distribution des précipitations et à ajuster la valeur des extrêmes selon la région concernée.

Un autre volet de la génération régionale de données climatologiques est à explorer. Dans cette étude, une approche uni-site, générant les données de chaque station indépendamment les unes des autres, a été utilisée. Cette approche n'est pas recommandée pour générer des données à l'échelle du bassin versant car elles ne seront pas consistantes entre elles. En effet, elle risque d'entraîner une sous-estimation des débits simulés lors d'orages, puisque la répartition spatiale des précipitations, interpolée à partir des données générées aux stations, risque d'être très variable. En particulier, on peut se retrouver avec des précipitations « mesurées » en certaines stations, alors que le générateur pourrait avoir produit des journées sèches à des stations voisines. Un tel comportement est également susceptible de produire une sous-estimation de la fonte printanière, mais moins prononcée, en raison du caractère « cumulatif » des précipitations sous forme de neige. Un lien est donc à conserver entre la génération des variables climatologiques pour des stations avoisinantes. La corrélation spatiale des données devient des plus importantes lorsque l'on procède à la modélisation hydrologique à partir de ces données de précipitations générées. C'est pourquoi une approche multi-site est à privilégier dans ce type d'opération.

6.4 Études futures

Les aspects de la génération de données climatologiques abordées dans ce mémoire ne sont qu'une partie du travail à accomplir dans le domaine. Une analyse des différents types de générateur a été réalisée et des améliorations ont été apportées au générateur stochastique de climat de type Richardson (1981). Même si, dans l'ensemble, la performance du générateur de climat a été améliorée, il reste encore des facettes à explorer. Certains problèmes ont été observés au niveau de la génération des températures minimales et maximales. Pour remédier à ces problèmes, il pourrait être envisagé de développer une nouvelle fonction de distribution représentant mieux le comportement de cette variable climatique. De plus, un certain manque au niveau de la

corrélation spatiale des données est remarqué lors de la génération de données climatologiques avec un générateur de type uni-site. Une approche multi-site améliorerait considérablement la consistance régionale des données générées. Cette méthode a déjà fait, et continue de faire présentement l'objet d'études (Khalili et al., 2004). Cette façon de procéder est une avenue prometteuse dans la génération de données climatologiques à des fins de génération de scénarios de changements climatiques.

Concernant plus précisément le générateur décrit dans ce mémoire, un aspect important qu'il faudrait rectifier est l'équation de correction régionale des précipitations. Ce facteur a déjà prouvé son efficacité mais l'ajout d'un volet saisonnier en plus de la régionalité déjà introduite servirait à améliorer grandement sa performance. Cela pourrait régler définitivement les erreurs remarquées lors de la génération des précipitations à l'hiver et lors de la simulation de la crue printanière avec le modèle hydrologique. Finalement, le sujet de ce mémoire étant l'étalonnage et la validation d'un générateur de climat, la prochaine étape à franchir pour que ce générateur de climat devienne utile dans l'étude des changements climatiques serait d'y inclure un module permettant de modifier les différents paramètres qui ont fait l'objet de la validation. Cela pourrait se faire en modifiant les probabilités d'occurrence des jours secs et pluvieux et les paramètres de la fonction de distribution des quantités de précipitations pour les jours pluvieux, incluant l'équation de correction régionale, en fonction de variations d'indices climatiques calculés à partir de sorties de MCG ou de modèles régionaux de climat. Il importe par ailleurs que ces indices soient véritablement sensibles au changement climatique. Avec ces ajouts, WeaGETS pourrait devenir un outil très utile dans la gestion des ressources hydriques dans un contexte de changements climatiques, pour ensuite devenir, par le fait même, un outil majeur d'aide à la décision dans plusieurs domaines touchés par la ressource en eau.

CONCLUSION

Les changements climatiques sont un phénomène qui doit de plus en plus être considéré lors des analyses de risque reliées aux ressources hydriques. Même si l'effet exact qu'auront ces changements n'est pas connu, il est certain qu'ils toucheront notre environnement. Que ce soit au niveau de la température moyenne globale, des occurrences des précipitations et de leurs quantités ou bien au niveau des interactions atmosphériques plus complexes, il sera nécessaire de considérer ces changements dans la façon actuelle de procéder à la gestion hydrologique.

Le contenu de ce mémoire concerne donc la validation et l'étalonnage d'un générateur de climat dans le contexte des changements climatiques. Le but visé était de mettre au point un générateur de climat capable de reproduire adéquatement les différentes variables climatiques observées et ainsi obtenir une base fiable à la simulation de ces variables dans le futur. Une fois que le générateur reproduit correctement les données dans un climat présent, il peut être modifié pour tenir compte de l'effet des changements climatiques. Les différents éléments abordés dans ce mémoire touchaient donc l'ensemble de l'étalonnage et de la validation du générateur de climat.

Les principaux objectifs de ce projet étaient de procéder à des modifications d'un générateur de climat déjà existant pour en améliorer la performance aux niveaux des événements extrêmes et de la régionalisation. Une partie de cet objectif était de sélectionner un générateur de climat déjà existant, compatible avec le but à atteindre, pour servir de base au nouveau générateur à mettre au point. Aussi, ce nouveau générateur de climat devait être calibré pour s'assurer de sa performance. Dans cet optique, plusieurs régions québécoises et d'autres à l'extérieur de la province ont été choisies pour l'étalonnage du générateur de climat. Les aspects les plus sensibles de cet étalonnage étaient la représentation des événements extrêmes et la reproduction des

occurrences de précipitations. Un autre objectif de l'étude était la validation directe et indirecte du générateur modifié. Cette étape s'est effectuée selon certains critères d'analyse et en effectuant la modélisation hydrologique du bassin versant de la rivière Châteauguay.

Pour atteindre ces objectifs, une revue de la littérature portant sur les différents types de générateurs de climat a tout d'abord été faite. Puis, suite à l'analyse et à la comparaison approfondie des différents types de générateurs disponibles, le choix s'est arrêté sur le générateur stochastique de climat de type Richardson (1981) comme base d'un nouveau générateur. Le générateur choisi a ensuite été modifié pour qu'il puisse mieux représenter les variables climatiques pour les différents climats présents au Canada. Les modifications apportées à ce nouveau générateur, nommé WeaGETS, se sont situées au niveau de la génération des occurrences de précipitations et de leur quantité. Pour améliorer la génération des occurrences de précipitations, le degré de la chaîne de Markov du générateur a été augmenté. Puis, pour améliorer la génération des quantités de précipitations, une équation régionale de correction a été appliquée aux données générées. Une fois les modifications effectuées, différents indices d'analyse ont été sélectionnés pour procéder à la validation directe. La validation directe consistait en la comparaison entre les indices calculés avec les données climatiques générées et ceux calculés avec les données climatiques observées. Une validation indirecte a aussi été effectuée en utilisant les données générées comme données d'entrée dans un modèle hydrologique. Pour la modélisation hydrologique, le modèle sélectionné a été HSAMI et le bassin versant, celui de la rivière Châteauguay. Différents paramètres de la modélisation hydrologique ont été calculés avec les données observées et générées comme données d'entrée et ont ensuite été comparés entre eux. Toutes les analyses de performance du générateur ont été exécutées en utilisant une période moyenne d'environ 30 années de données climatiques observées pour l'ensemble des stations climatologiques. Les stations climatologiques choisies pour ces comparaisons couvraient la majorité des climats présents au Canada. L'évolution de la génération de

données climatiques dans un climat futur a aussi été abordée ainsi que les travaux futurs à effectuer sur le générateur.

Les différents résultats obtenus avec le générateur stochastique de climat, WeaGETS, développé dans le cadre de cette étude sont, somme toute, satisfaisants. Pour l'ensemble des régions analysées et des paramètres étudiés, WeaGETS réussit à relativement bien reproduire les données observées. Toutefois, il a été souligné que certains aspects de la génération ne semblaient pas encore tout à fait au point. C'est au niveau du caractère saisonnier de la génération des occurrences et des quantités de précipitations qu'une certaine marge d'erreur a pu être remarquée. En fait, c'est l'hiver qui demeure problématique en ce qui concerne la génération des occurrences des séries de jours sans précipitations et la distribution des précipitations. L'hiver ne se comporte pas exactement comme les trois autres saisons. C'est pourquoi les modifications apportées ne réussissent pas entièrement à corriger les erreurs remarquées pour cette saison. Les erreurs à l'hiver sont aussi la cause des problèmes rencontrés lors de la modélisation hydrologique des débits de pointe des crues printanières. Puisque les précipitations à l'hiver ne sont pas parfaitement générées, cela se répercute sur l'accumulation de neige et, par conséquent, sur les débits observés lors de la fonte printanière. Cependant, le caractère régional de la génération des précipitations a pu être corrigé grâce à l'équation de correction régionale. La génération des températures n'a pas été modifiée ici mais une certaine déficience a pu être remarquée au niveau de leur variabilité mensuelle.

Pour conclure, certaines recommandations peuvent être formulées. Tout d'abord, il serait intéressant d'explorer une nouvelle approche dans la génération des températures telle qu'une nouvelle fonction de distribution pour en améliorer la performance de la génération. Le type de générateur utilisé dans cette étude est de type uni-site mais l'emploi d'un générateur de type multi-site améliorerait la corrélation spatiale des données générées. Cette façon de procéder serait plus adéquate lors de la modélisation hydrologique avec des données générées. Aussi, l'efficacité de l'équation de correction

régionale a pu être observé mais l'ajout d'un caractère saisonnier à ce facteur permettrait de remédier aux problèmes rencontrés lors de la génération des précipitations à l'hiver. Finalement, les étapes à venir seraient d'inclure à WeaGETS un module permettant la perturbation des paramètres de la génération des variables climatiques pour procéder à la génération de ces variables dans le futur. L'incorporation de tous ces éléments fournirait un outil performant dans l'analyse du risque hydrologique dans un contexte de changements climatiques.

ANNEXE 1

Régions climatiques

Régions thermiques

	Régions thermiques	PE annuel (cm)
E	Terres gelées	0 à 14,2
D	Toundra	14,3 à 28,5
C ₁		28,6 à 42,7
	Microthermiques	
C ₂		42,8 à 57,0
B ₁		57,1 à 71,2
B ₂		71,3 à 85,5
	Mésothermiques	
B ₃		85,6 à 99,7
B ₄		99,8 à 114,0
A	Mégathermiques	> 114,0

Source : Thornthwaite, (1948)

Régions hydriques

	Zones d'humidité	Indice d'humidité (Im)
A	Perhumide	100 et au-dessus
B ₄		80 à 99,9
B ₃		60 à 79,9
	Humide	
B ₂		40 à 59,9
B ₁		20 à 39,9
C ₂	Humide subhumide	0 à 19,9
C ₁	Sec subhumide	- 19,9 à 0
D	Semi-aride	- 39,9 à - 20
E	Aride	- 60 à - 40

Source : Thornthwaite, (1948)

ANNEXE 2

Résultats des indices STARDEX pour l'ensemble des stations

Station de Bagotville

Indices	Été		Automne		Hiver		Printemps	
	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim
prec_mean	3.2611	3.4496	2.7840	2.7989	2.0331	1.9899	2.2019	2.2265
prec_perc20	1.1836	1.2302	0.9273	0.9410	0.7121	0.7448	0.9233	0.9786
prec_perc40	2.7123	2.8959	2.0467	2.1066	1.4717	1.5065	2.2759	2.0913
prec_perc50	3.8800	4.1816	2.9300	2.9922	2.0817	2.0669	3.0183	2.9198
prec_perc60	5.5272	5.9687	4.1588	4.2414	2.8843	2.8429	4.1629	4.0484
prec_perc80	11.0360	11.9426	8.2603	8.7081	5.7353	5.6679	7.6908	8.0183
prec_perc90	17.5810	18.2066	12.6950	13.4861	9.1379	8.7086	11.6650	12.2081
prec_perc95	24.5210	24.9610	17.9600	18.6114	12.0400	11.9236	16.2300	16.6650
prec_perc99	35.9270	37.3130	29.2070	29.0615	20.2260	18.7389	25.1300	24.5827
prec_quant20	0.9810	0.9798	0.9805	0.9783	0.9773	0.9724	0.9780	0.9751
prec_quant40	0.9234	0.9242	0.9260	0.9223	0.9195	0.9094	0.9156	0.9135
prec_quant50	0.8775	0.8787	0.8830	0.8774	0.8716	0.8616	0.8673	0.8661
prec_quant60	0.8041	0.8057	0.8130	0.8070	0.8021	0.7893	0.7900	0.7920
prec_quant80	0.5764	0.5679	0.5777	0.5751	0.5742	0.5593	0.5521	0.5570
prec_quant90	0.3740	0.3622	0.3770	0.3708	0.3784	0.3590	0.3570	0.3543
prec_quant95	0.2143	0.2117	0.2296	0.2174	0.2276	0.2135	0.2110	0.2097
prec_quant99	0.1194	0.1188	0.1176	0.1150	0.1172	0.1053	0.1263	0.1217
prec>10mm	9.9000	10.8198	7.7000	7.7467	3.9000	3.7022	5.1333	5.8125
consec_dry_day	7.1667	7.1414	6.8667	6.6620	6.3000	6.3338	9.0000	9.0701
consec_wet_day	6.1667	6.2251	7.1000	6.8412	7.0333	7.6992	6.2000	6.3212
wet_day_pers	0.5350	0.5438	0.5992	0.5833	0.6169	0.6248	0.5661	0.5604
dry_day_pers	0.5747	0.5793	0.5250	0.5325	0.5122	0.5073	0.6398	0.6318
corr_spell_lengths	0.1096	0.1231	0.1242	0.1158	0.1291	0.1322	0.2059	0.1922
wet_spell_mean	2.1617	2.2253	2.5256	2.4284	2.6481	2.7023	2.3234	2.3087
wet_spell_sd	1.4666	1.5117	1.7800	1.6675	1.7968	1.9222	1.5650	1.5456
wet_spell_50thperc	1.7667	1.7706	1.9833	1.9752	2.1833	2.1737	1.8167	1.8968
dry_spell_mean	2.3866	2.4116	2.1446	2.1827	2.1114	2.0702	2.9138	2.7906
dry_spell_sd	1.7702	1.7578	1.6653	1.6279	1.5501	1.5336	2.3391	2.3350
dry_spell_50thperc	1.7667	1.8745	1.4833	1.5763	1.5333	1.4674	2.0333	1.9676
max_rainfall_3d	50.2970	51.8286	40.4270	40.4310	29.1800	26.6568	38.4130	34.7983
max_rainfall_5d	58.8930	62.9222	50.6370	49.2595	35.7330	32.7366	44.2570	42.3371
max_rainfall_10d	78.8700	85.9303	68.2800	67.7807	50.3400	45.5222	58.0800	57.5246
rain_per_rainday	6.7925	7.1928	5.1338	5.3050	3.6012	3.5131	4.8336	4.8919
temp_max	23.1300	22.9142	9.1382	9.1988	-8.1300	-8.0434	7.7304	7.6620
temp_min	10.7100	10.3323	0.0779	0.1005	-18.8920	-18.6356	-3.9013	-3.9547
p00	0.5815	0.5856	0.5327	0.5405	0.5396	0.5171	0.6520	0.6403
p10	0.4589	0.4488	0.3958	0.4101	0.3771	0.3700	0.4262	0.4322
p000	0.5782	0.5816	0.5673	0.5624	0.5734	0.5442	0.6715	0.6661
p010	0.4416	0.4311	0.3613	0.3704	0.3468	0.3345	0.3809	0.3830
p100	0.5881	0.5889	0.4895	0.5135	0.4991	0.4887	0.6127	0.5959
p110	0.4726	0.4638	0.4170	0.4370	0.3987	0.3907	0.4604	0.4700
p0000	0.5920	0.5864	0.5831	0.5767	0.6122	0.5710	0.9371	0.9336
p0010	0.4331	0.4304	0.3865	0.3990	0.3470	0.3398	0.3846	0.3844
p0100	0.6216	0.6150	0.4781	0.5024	0.5106	0.4899	0.6218	0.6011
p0110	0.4540	0.4473	0.4365	0.4330	0.3887	0.3736	0.4760	0.4831
p1000	0.5594	0.5727	0.5396	0.5430	0.5314	0.5126	0.6349	0.6379
p1010	0.4542	0.4317	0.3380	0.3385	0.3469	0.3298	0.3687	0.3813
p1100	0.5604	0.5676	0.4986	0.5186	0.4944	0.4883	0.6069	0.5939
p1110	0.4833	0.4785	0.3984	0.4397	0.4093	0.4012	0.4405	0.4582

Station de Dorval

Indices	Été		Automne		Hiver		Printemps	
	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim
prec_mean	2.8976	2.9237	2.8947	2.9053	2.4516	2.3609	2.5118	2.4819
prec_perc20	1.2363	1.2280	1.0581	1.1741	0.7507	0.8367	1.0153	1.0791
prec_perc40	2.8587	2.9861	2.4983	2.7810	1.7981	1.8915	2.4755	2.4725
prec_perc50	4.2883	4.3781	3.6700	4.1121	2.6350	2.7063	3.5067	3.5158
prec_perc60	6.2064	6.2824	5.4339	3.5845	3.8568	3.7540	4.9605	4.8846
prec_perc80	13.1950	12.9841	10.6770	3.4408	8.7699	7.9033	10.3750	9.9402
prec_perc90	20.2910	20.3146	18.2330	3.3078	14.3870	13.0146	16.3180	15.6241
prec_perc95	28.6750	27.8431	25.7770	5.2347	19.5760	18.3465	21.9200	21.4698
prec_perc99	37.6530	38.2391	40.2870	7.3888	26.8000	27.4885	28.6100	30.3659
prec_quant20	0.9847	0.9815	0.9849	3.7606	0.9824	0.9789	0.9836	0.9784
prec_quant40	0.9349	0.9290	0.9357	7.9041	0.9383	0.9250	0.9300	0.9211
prec_quant50	0.8905	0.8858	0.8949	12.6699	0.8999	0.8816	0.8842	0.8756
prec_quant60	0.8232	0.8136	0.8260	18.9934	0.8325	0.8130	0.8143	0.8027
prec_quant80	0.5813	0.5790	0.5989	31.4559	0.6155	0.5934	0.5744	0.5725
prec_quant90	0.3762	0.3684	0.3907	0.8660	0.3908	0.3871	0.3670	0.3658
prec_quant95	0.2220	0.2221	0.2545	0.8067	0.2235	0.2299	0.2128	0.2211
prec_quant99	0.1458	0.1450	0.1510	1.2892	0.1246	0.1308	0.1313	0.1356
prec>10mm	9.2000	9.0286	8.3000	1.7211	7.3333	6.2936	7.7000	7.3100
consec_dry_day	8.4333	8.8588	8.7667	1.5243	7.8000	6.6890	9.7000	9.6549
consec_wet_day	4.5667	4.6861	5.2667	0.9789	5.7333	5.7176	5.3667	5.3756
wet_day_pers	0.4401	0.4543	0.4932	0.2525	0.5229	0.5214	0.5340	0.5314
dry_day_pers	0.6567	0.6679	0.6394	0.1257	0.5655	0.5590	0.6779	0.6721
corr_spell_lengths	0.0968	0.1222	0.1326	24.6811	0.0884	0.0804	0.2118	0.2034
wet_spell_mean	1.8293	1.8560	2.0203	9.9308	2.1337	2.1123	2.1630	2.1650
wet_spell_sd	1.0632	1.1017	1.2528	5.7595	1.3636	1.3357	1.2916	1.3106
wet_spell_50thperc	1.4667	1.5053	1.6333	0.5880	1.6833	1.8016	1.8167	1.8613
dry_spell_mean	2.9939	3.0441	2.7703	0.8670	2.3903	2.2955	3.2218	3.1136
dry_spell_sd	2.1635	2.2433	2.1650	0.3813	1.8483	1.6191	2.6226	2.5175
dry_spell_50thperc	2.3667	2.4229	1.9833	1.9676	1.7333	1.8046	2.3833	2.3129
max_rainfall_3d	51.5800	50.9040	53.7730	7.5837	37.8700	36.7452	40.1700	41.6591
max_rainfall_5d	59.8970	59.8187	61.0800	9.0692	46.4070	43.9986	48.0030	49.5422
max_rainfall_10d	77.6230	79.5156	76.4430	12.0802	64.6330	59.1795	63.5770	66.1731
rain_per_rainday	7.7755	7.7337	6.9021	2.8234	5.1934	4.9287	6.1321	6.0397
temp_max	24.8890	24.8682	12.5700	4.3140	-3.9151	-3.8979	10.6310	10.5979
temp_min	14.2370	14.0158	3.5528	52.0418	-12.6810	-12.4106	0.5319	0.4699
p00	0.6633	0.6722	0.6425	59.8206	0.5744	0.5650	0.6864	0.6788
p10	0.5532	0.5384	0.4947	78.9518	0.4696	0.4728	0.4571	0.4612
p000	0.6484	0.6593	0.6383	5.3169	0.5809	0.5575	0.6916	0.6861
p010	0.5124	0.4970	0.4549	9.3312	0.4186	0.4111	0.3828	0.3904
p100	0.6933	0.6974	0.6474	1.3120	0.5695	0.5743	0.6760	0.6658
p110	0.6022	0.5882	0.5363	0.6091	0.5128	0.5281	0.5203	0.5213
p0000	0.6345	0.6464	0.6456	0.4916	0.5925	0.5534	0.9466	0.9438
p0010	0.4832	0.4742	0.4598	0.5948	0.4299	0.4174	0.3680	0.3759
p0100	0.6597	0.6700	0.6480	0.4510	0.6041	0.5808	0.6508	0.6479
p0110	0.5985	0.5863	0.5467	0.6120	0.5357	0.5422	0.5133	0.5015
p1000	0.6753	0.6826	0.6211	0.5355	0.5672	0.5614	0.6805	0.6763
p1010	0.5824	0.5526	0.4546	0.6036	0.4087	0.4024	0.3949	0.4178
p1100	0.7289	0.7244	0.6433	0.4526	0.5503	0.5694	0.6941	0.6791
p1110	0.6044	0.5920	0.5212	0.6036	0.4907	0.5118	0.5231	0.5424

Station de Gaspé

Indices	Été		Automne		Hiver		Printemps	
	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim
prec_mean	2.9123	2.8880	3.0370	3.0907	2.9202	2.9577	3.1360	2.9886
prec_perc20	1.2127	1.1546	1.0236	1.0784	0.9640	1.0013	1.0779	1.1500
prec_perc40	2.6197	2.6820	2.4134	2.6383	2.3487	2.4422	2.6214	2.7792
prec_perc50	3.8017	3.8356	3.3983	3.8729	3.4879	3.5927	4.0069	4.0648
prec_perc60	5.4909	5.4268	5.0018	5.6287	5.0721	5.2324	6.1033	5.8617
prec_perc80	11.1750	11.3206	10.9740	12.4139	12.1770	11.5271	12.7170	12.6406
prec_perc90	17.9540	18.0030	20.5380	20.2849	20.1710	18.9334	20.4740	20.4092
prec_perc95	28.4160	25.6167	30.6780	29.6489	28.4820	27.6636	30.5200	29.4329
prec_perc99	42.4590	39.1061	46.1340	45.4611	42.1070	42.5705	47.8690	43.9699
prec_quant20	0.9810	0.9805	0.9856	0.9834	0.9849	0.9834	0.9834	0.9826
prec_quant40	0.9319	0.9268	0.9404	0.9360	0.9433	0.9363	0.9395	0.9330
prec_quant50	0.8896	0.8839	0.9070	0.8970	0.9055	0.8975	0.9019	0.8928
prec_quant60	0.8210	0.8143	0.8470	0.8317	0.8525	0.8325	0.8329	0.8255
prec_quant80	0.5984	0.5877	0.6433	0.6109	0.6310	0.6123	0.6202	0.6007
prec_quant90	0.3931	0.3836	0.4289	0.4035	0.4056	0.4054	0.4161	0.3941
prec_quant95	0.2564	0.2384	0.2698	0.2532	0.2582	0.2541	0.2490	0.2423
prec_quant99	0.1573	0.1482	0.1712	0.1625	0.1665	0.1610	0.1698	0.1619
prec>10mm	8.0345	8.5931	8.3448	8.9444	8.4483	8.4763	9.2069	8.8778
consec_dry_day	8.6207	8.5393	8.7241	8.8087	8.9655	8.4391	10.4140	10.3201
consec_wet_day	4.9310	5.2458	5.3793	5.0069	5.2069	5.5054	5.6897	5.4818
wet_day_pers	0.4655	0.4833	0.4853	0.4801	0.4964	0.5126	0.5210	0.5164
dry_day_pers	0.6337	0.6360	0.6429	0.6485	0.6633	0.6555	0.6845	0.6967
corr_spell_lengths	0.0992	0.1193	0.1283	0.1286	0.1597	0.1680	0.2055	0.2131
wet_spell_mean	1.9243	1.9652	1.9844	1.9483	2.0496	2.0861	2.1564	2.1061
wet_spell_sd	1.1640	1.2601	1.2830	1.1824	1.2378	1.3203	1.3749	1.3284
wet_spell_50thperc	1.5345	1.5263	1.5862	1.6207	1.7069	1.7589	1.7586	1.7791
dry_spell_mean	2.7937	2.7845	2.8908	2.8896	3.0235	2.9364	3.3265	3.3592
dry_spell_sd	2.1721	2.1433	2.1748	2.2287	2.2756	2.1466	2.6754	2.7252
dry_spell_50thperc	2.2069	2.1210	2.3448	2.1983	2.4138	2.3397	2.5517	2.4929
max_rainfall_3d	56.5310	51.0450	61.5550	58.2865	60.0550	54.5667	73.5760	57.0716
max_rainfall_5d	62.7410	59.8266	69.1210	68.0347	69.0140	63.5969	87.1070	66.8092
max_rainfall_10d	81.2720	78.6511	90.7140	88.6111	89.2550	82.6865	104.9400	86.7598
rain_per_rainday	7.1499	6.9899	7.3777	7.6625	7.2709	7.1364	7.8986	7.7565
temp_max	21.7120	21.6128	10.5020	10.4988	-4.3495	-4.3551	6.8031	6.6700
temp_min	8.7441	8.4678	0.0742	0.3166	-15.3420	-14.9424	-4.0469	-4.2080
p00	0.6520	0.6413	0.6574	0.6536	0.6806	0.6613	0.7008	0.7022
p10	0.5187	0.5091	0.5009	0.5116	0.4892	0.4794	0.4586	0.4738
p000	0.6561	0.6373	0.6478	0.6464	0.6810	0.6478	0.7021	0.7038
p010	0.4991	0.4938	0.4697	0.4626	0.4242	0.4196	0.4123	0.4094
p100	0.6438	0.6461	0.6730	0.6668	0.6815	0.6880	0.6943	0.6974
p110	0.5371	0.5254	0.5326	0.5619	0.5532	0.5343	0.5027	0.5313
p0000	0.6744	0.6481	0.6631	0.6561	0.6633	0.6355	0.9502	0.9504
p0010	0.4927	0.4817	0.4915	0.4866	0.4169	0.4101	0.4404	0.4240
p0100	0.6567	0.6427	0.6816	0.6652	0.6971	0.7143	0.7031	0.7086
p0110	0.5206	0.5088	0.5435	0.5583	0.5775	0.5636	0.5200	0.5609
p1000	0.6178	0.6158	0.6138	0.6282	0.7190	0.6709	0.6615	0.6865
p1010	0.5128	0.5164	0.4269	0.4110	0.4459	0.4385	0.3521	0.3753
p1100	0.6423	0.6485	0.6630	0.6686	0.6655	0.6699	0.6859	0.6891
p1110	0.5570	0.5442	0.5187	0.5654	0.5198	0.5027	0.4890	0.4960

Station d'Inukjuak

Indices	Été		Automne		Hiver		Printemps	
	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim
prec_mean	1.6155	1.8177	2.0003	1.8873	0.7384	0.7846	0.8731	0.8637
prec_perc20	0.6530	0.7265	0.6879	0.7095	0.5207	0.6017	0.5067	0.5797
prec_perc40	1.3446	1.5079	1.3036	1.2722	0.9063	0.9717	0.9569	1.0440
prec_perc50	2.1500	2.1594	1.7054	1.6904	1.0893	1.2283	1.3125	1.4080
prec_perc60	3.2050	3.1435	2.2223	2.2677	1.4781	1.5709	1.8027	1.9277
prec_perc80	6.5366	7.4520	4.7123	4.5956	2.8957	2.8744	3.5960	4.0992
prec_perc90	10.3660	12.6385	7.9195	7.4290	4.4919	4.5075	6.3851	6.7946
prec_perc95	16.3260	18.8119	12.1420	10.6071	6.5007	6.3100	10.5950	10.0050
prec_perc99	25.0820	30.2304	21.1990	19.7494	9.2786	9.2877	20.3960	14.1766
prec_quant20	0.9879	0.9794	0.9812	0.9689	0.9814	0.9560	0.9870	0.9688
prec_quant40	0.9442	0.9319	0.9200	0.9038	0.9052	0.8735	0.9412	0.9060
prec_quant50	0.9027	0.8958	0.8746	0.8573	0.8664	0.8203	0.8874	0.8636
prec_quant60	0.8312	0.8361	0.8167	0.7897	0.7776	0.7429	0.8181	0.7955
prec_quant80	0.6083	0.6282	0.6090	0.5768	0.5479	0.5240	0.6229	0.5819
prec_quant90	0.4119	0.4213	0.4139	0.3845	0.3503	0.3376	0.4253	0.3818
prec_quant95	0.2515	0.2633	0.2533	0.2415	0.2068	0.2042	0.2629	0.2240
prec_quant99	0.1802	0.1803	0.1186	0.1144	0.1560	0.1321	0.2234	0.1801
prec>10mm	3.5357	4.9100	3.7143	2.9952	0.5000	0.4009	1.2500	1.2846
consec_dry_day	10.8930	10.8731	6.4643	6.8866	11.9640	11.6010	12.9640	13.2737
consec_wet_day	5.5714	5.5902	11.5000	11.1389	6.8929	7.7446	4.4643	4.9568
wet_day_pers	0.5267	0.5185	0.7165	0.7128	0.5374	0.5751	0.4437	0.4775
dry_day_pers	0.6931	0.6974	0.4941	0.5252	0.7186	0.7097	0.7321	0.7453
corr_spell_lengths	0.2197	0.2160	0.2106	0.2381	0.2560	0.2848	0.1758	0.2229
wet_spell_mean	2.1608	2.1109	3.6486	3.5696	2.2595	2.4289	1.8496	1.9547
wet_spell_sd	1.4161	1.3825	3.0992	2.9787	1.8427	2.0508	1.1066	1.2345
wet_spell_50thperc	1.7500	1.6948	2.5357	2.6261	1.5714	1.6738	1.4464	1.5489
dry_spell_mean	3.3623	3.4060	2.1819	2.1802	3.9631	3.5688	3.9859	4.0442
dry_spell_sd	2.8685	2.9156	1.6834	1.7554	3.3087	3.1705	3.5661	3.6533
dry_spell_50thperc	2.5357	2.4567	1.6250	1.4937	3.1429	2.5020	2.7679	2.8518
max_rainfall_3d	30.9040	39.9439	32.3640	27.5211	13.4640	12.8899	24.9430	18.2028
max_rainfall_5d	35.6110	47.1671	38.9930	33.4171	16.3710	15.7013	28.6540	21.1469
max_rainfall_10d	46.0110	61.7046	51.5500	45.7232	21.0860	21.3729	34.9000	27.0421
rain_per_rainday	4.1598	4.7078	3.1806	3.0386	1.8923	1.9261	2.6478	2.6346
temp_max	12.1630	12.0252	2.1947	2.3043	-18.4390	-18.0609	-6.9596	-7.0925
temp_min	4.5575	4.6027	-3.1915	-3.1432	-26.2580	-26.1463	-15.3130	-15.4127
p00	0.7027	0.7037	0.5382	0.5383	0.7489	0.7199	0.7478	0.7508
p10	0.4588	0.4709	0.2757	0.2798	0.4399	0.4156	0.5286	0.5100
p000	0.7247	0.7245	0.5694	0.5787	0.7586	0.7372	0.7696	0.7678
p010	0.4396	0.4449	0.2864	0.2828	0.4897	0.4676	0.5047	0.4847
p100	0.6459	0.6537	0.4988	0.4881	0.7289	0.6811	0.6821	0.6991
p110	0.4736	0.4937	0.2704	0.2777	0.4121	0.3852	0.5457	0.5359
p0000	0.7245	0.7234	0.6084	0.6148	0.7635	0.7477	0.9642	0.9640
p0010	0.4335	0.4546	0.3194	0.3155	0.5018	0.4991	0.5017	0.4882
p0100	0.6650	0.6825	0.5738	0.5604	0.7382	0.7020	0.7130	0.7290
p0110	0.4661	0.4863	0.2990	0.2943	0.5051	0.4771	0.5455	0.5397
p1000	0.7247	0.7275	0.5213	0.5240	0.7491	0.7125	0.7457	0.7498
p1010	0.4430	0.4252	0.2535	0.2504	0.4815	0.4093	0.5185	0.4752
p1100	0.6356	0.6295	0.4649	0.4583	0.7150	0.6665	0.6456	0.6700
p1110	0.4873	0.5003	0.2598	0.2703	0.3603	0.3364	0.5491	0.5326

Station de Matagami

Indices	Été		Automne		Hiver		Printemps	
	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim
prec_mean	3.2591	3.3820	2.8125	2.7265	1.5735	1.5366	1.8693	1.8225
prec_perc20	0.8331	0.8443	0.7309	0.7870	0.6574	0.6317	0.7458	0.6426
prec_perc40	2.1971	2.1254	1.7189	1.7363	1.2256	1.1951	1.4704	1.3800
prec_perc50	3.3080	3.2028	2.3400	2.4685	1.5780	1.5964	2.2740	1.9656
prec_perc60	4.8429	4.7771	3.3106	3.5226	2.1350	2.1313	3.1058	2.8107
prec_perc80	9.9730	10.5863	7.6843	7.4697	4.6120	4.1808	6.3230	6.1840
prec_perc90	16.9750	17.0100	12.4600	11.8786	6.7351	6.4842	10.9720	10.1474
prec_perc95	23.7380	23.9831	17.5610	16.7818	9.8836	8.9075	15.4170	14.7225
prec_perc99	36.5410	38.2756	30.5160	28.2675	15.7370	14.0668	24.6610	23.7545
prec_quant20	0.9895	0.9841	0.9859	0.9786	0.9799	0.9677	0.9851	0.9779
prec_quant40	0.9445	0.9393	0.9349	0.9255	0.9126	0.8996	0.9434	0.9266
prec_quant50	0.9035	0.9005	0.8937	0.8828	0.8732	0.8499	0.8884	0.8866
prec_quant60	0.8420	0.8363	0.8324	0.8162	0.8020	0.7769	0.8245	0.8224
prec_quant80	0.6152	0.6092	0.6171	0.5918	0.5745	0.5518	0.6223	0.6054
prec_quant90	0.4053	0.3988	0.4088	0.3888	0.3782	0.3556	0.4097	0.4008
prec_quant95	0.2429	0.2372	0.2509	0.2398	0.2375	0.2129	0.2649	0.2451
prec_quant99	0.1311	0.1243	0.1223	0.1142	0.1156	0.1023	0.1547	0.1428
prec>10mm	9.7600	10.2022	7.3600	6.9271	2.2000	1.7890	4.4800	4.2380
consec_dry_day	6.5200	6.6586	5.7600	6.2181	6.3200	5.8219	9.0400	9.6358
consec_wet_day	7.6000	7.9752	8.5600	8.4359	8.8000	8.8180	6.8000	7.0485
wet_day_pers	0.5865	0.5941	0.6549	0.6562	0.6174	0.6393	0.5734	0.5837
dry_day_pers	0.5285	0.5432	0.4833	0.5066	0.4896	0.5024	0.6082	0.6317
corr_spell_lengths	0.1150	0.1372	0.1383	0.1627	0.1071	0.1417	0.1815	0.2154
wet_spell_mean	2.4937	2.5192	2.9475	2.9435	2.6921	2.8235	2.4405	2.4472
wet_spell_sd	1.8976	1.9802	2.1033	2.1204	2.2147	2.2228	1.6750	1.7632
wet_spell_50thperc	1.8600	1.8612	2.3200	2.3234	1.9600	2.1115	1.9400	1.9310
dry_spell_mean	2.1855	2.2290	2.0223	2.0745	2.1126	2.0431	2.7872	2.8000
dry_spell_sd	1.5859	1.6295	1.4244	1.5189	1.4577	1.3963	2.3167	2.4548
dry_spell_50thperc	1.7400	1.6767	1.5000	1.5008	1.5600	1.5688	1.9000	1.9349
max_rainfall_3d	52.8640	52.2842	43.5240	39.7113	23.2160	20.1510	34.1720	32.2919
max_rainfall_5d	63.6560	63.0418	52.0280	48.4560	28.0840	24.9349	42.2000	38.6481
max_rainfall_10d	85.6240	85.3235	70.8440	66.9595	37.5040	34.8822	55.3640	51.2781
rain_per_rainday	6.3063	6.3816	4.7362	4.6387	2.8258	2.6501	4.1237	3.8832
temp_max	21.4630	21.4829	6.9949	6.8811	-10.9480	-10.7655	5.5941	5.7714
temp_min	7.8156	7.6730	-2.1989	-2.3441	-23.6010	-23.3506	-8.3166	-8.1764
p00	0.5477	0.5506	0.5300	0.5160	0.5340	0.5114	0.6407	0.6411
p10	0.4000	0.3980	0.3366	0.3384	0.3710	0.3552	0.4086	0.4084
p000	0.5491	0.5568	0.5706	0.5326	0.5413	0.5025	0.6776	0.6725
p010	0.4226	0.4126	0.2700	0.2803	0.3451	0.3354	0.3605	0.3792
p100	0.5430	0.5408	0.4852	0.4981	0.5286	0.5217	0.5797	0.5880
p110	0.3852	0.3880	0.3709	0.3672	0.3855	0.3664	0.4428	0.4284
p0000	0.5651	0.5733	0.6223	0.5670	0.5668	0.5129	0.9340	0.9332
p0010	0.4275	0.4139	0.2679	0.2917	0.3390	0.3507	0.3577	0.3814
p0100	0.5025	0.5125	0.3846	0.4148	0.5455	0.5206	0.6065	0.6264
p0110	0.4234	0.4248	0.3778	0.3737	0.4330	0.4199	0.4719	0.4603
p1000	0.5310	0.5323	0.4952	0.4932	0.5167	0.4930	0.6586	0.6484
p1010	0.4198	0.4113	0.2756	0.2653	0.3619	0.3208	0.3631	0.3751
p1100	0.5683	0.5611	0.5158	0.5305	0.5170	0.5232	0.5552	0.5662
p1110	0.3565	0.3641	0.3590	0.3628	0.3594	0.3361	0.4215	0.4050

Station de Mont-Joli

Indices	Été		Automne		Hiver		Printemps	
	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim
prec_mean	2.6703	2.7772	2.5859	2.4938	2.4856	2.3991	2.2770	2.2189
prec_perc20	1.2421	1.2893	1.0069	1.0394	0.7960	0.8590	1.0125	1.0587
prec_perc40	2.7395	2.9520	2.3095	2.3442	1.7448	1.8258	2.3664	2.2919
prec_perc50	4.1967	4.1857	3.4867	3.3185	2.4300	2.5252	3.4600	3.1878
prec_perc60	6.0703	5.8410	4.7505	4.6273	3.4261	3.4538	4.8333	4.3682
prec_perc80	11.4220	11.8827	9.1773	9.4371	7.0235	6.8578	8.7663	8.6652
prec_perc90	17.6750	18.1333	14.6430	14.6993	10.9300	10.7417	14.0020	13.3478
prec_perc95	24.2910	25.3745	21.1440	20.5294	15.4660	14.7794	18.6270	18.3285
prec_perc99	33.3400	37.5107	33.1730	31.0038	25.7920	23.6523	26.6530	26.8069
prec_quant20	0.9803	0.9788	0.9807	0.9783	0.9809	0.9751	0.9795	0.9756
prec_quant40	0.9256	0.9211	0.9274	0.9209	0.9240	0.9137	0.9205	0.9137
prec_quant50	0.8804	0.8759	0.8860	0.8758	0.8785	0.8660	0.8734	0.8663
prec_quant60	0.8056	0.8026	0.8080	0.8040	0.8095	0.7937	0.7945	0.7918
prec_quant80	0.5625	0.5697	0.5830	0.5740	0.5828	0.5665	0.5543	0.5600
prec_quant90	0.3602	0.3655	0.3820	0.3705	0.3824	0.3661	0.3429	0.3569
prec_quant95	0.2074	0.2250	0.2407	0.2277	0.2348	0.2173	0.2187	0.2161
prec_quant99	0.1432	0.1474	0.1440	0.1373	0.1182	0.1101	0.1296	0.1331
prec>10mm	8.5000	8.4720	7.0000	7.1079	6.0000	5.6489	6.1667	6.1358
consec_dry_day	9.2000	9.0511	7.5000	8.1897	5.9667	6.2341	10.5670	9.9893
consec_wet_day	4.9000	5.0369	5.9000	5.4779	8.5667	8.2808	5.5333	5.7926
wet_day_pers	0.4439	0.4549	0.5115	0.4981	0.6380	0.6345	0.5372	0.5376
dry_day_pers	0.6542	0.6586	0.6109	0.6195	0.5273	0.5348	0.6770	0.6684
corr_spell_lengths	0.0981	0.1135	0.1224	0.1176	0.1653	0.1694	0.2142	0.2060
wet_spell_mean	1.8141	1.8618	2.0591	2.0196	2.8144	2.7887	2.1881	2.1984
wet_spell_sd	1.1183	1.1772	1.3582	1.2749	2.1219	2.0806	1.3654	1.4160
wet_spell_50thperc	1.3000	1.4478	1.7167	1.7101	2.1667	2.1752	1.8500	1.8366
dry_spell_mean	2.9513	2.9693	2.6244	2.6696	2.1763	2.1795	3.1986	3.0924
dry_spell_sd	2.3127	2.3045	1.9031	2.0411	1.4899	1.5358	2.7138	2.5999
dry_spell_50thperc	2.2667	2.2634	2.0667	2.0336	1.6833	1.6807	2.2833	2.2267
max_rainfall_3d	48.2630	48.9183	45.7100	40.9970	37.7230	33.1187	40.4730	36.7548
max_rainfall_5d	57.6670	57.7784	54.1530	48.8512	44.5400	40.4935	48.5500	44.0602
max_rainfall_10d	74.7830	76.4538	73.3470	65.2585	61.3770	56.1016	62.4570	58.9684
rain_per_rainday	6.9730	7.2101	5.8439	5.7921	4.3706	4.2891	5.5225	5.3216
temp_max	21.3790	21.2179	9.2184	9.2604	-6.0687	-5.9124	6.1231	6.1099
temp_min	10.8880	10.5707	1.5538	1.6528	-14.3120	-13.9697	-2.5697	-2.6387
p00	0.6615	0.6634	0.6248	0.6247	0.5549	0.5426	0.6846	0.6760
p10	0.5497	0.5372	0.4863	0.4944	0.3546	0.3587	0.4516	0.4546
p000	0.6567	0.6615	0.6290	0.6192	0.5532	0.5385	0.6943	0.6885
p010	0.5186	0.5134	0.4336	0.4349	0.3340	0.3283	0.3944	0.3993
p100	0.6696	0.6657	0.6135	0.6328	0.5539	0.5450	0.6680	0.6527
p110	0.5914	0.5659	0.5361	0.5512	0.3652	0.3746	0.4983	0.4998
p0000	0.6685	0.6637	0.6435	0.6392	0.5921	0.5512	0.9470	0.9442
p0010	0.4987	0.5026	0.4191	0.4324	0.3404	0.3274	0.3804	0.3823
p0100	0.6471	0.6488	0.5959	0.6153	0.6213	0.6048	0.6769	0.6830
p0110	0.6217	0.5918	0.5615	0.5884	0.3634	0.3759	0.5000	0.5078
p1000	0.6330	0.6557	0.5994	0.5853	0.5140	0.5202	0.6577	0.6579
p1010	0.5591	0.5370	0.4533	0.4353	0.3246	0.3285	0.4146	0.4283
p1100	0.6960	0.6826	0.6274	0.6455	0.5188	0.5154	0.6578	0.6335
p1110	0.5556	0.5336	0.5055	0.5036	0.3650	0.3723	0.4966	0.4922

Station de Ormstown

Indices	Été		Automne		Hiver		Printemps	
	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim
prec_mean	2.9705	2.9815	2.8263	2.8747	2.2103	2.2089	2.4095	2.3579
prec_perc20	1.0674	1.1880	1.1017	1.0837	1.3159	1.2089	1.1843	1.2009
prec_perc40	2.7244	2.8600	2.6056	2.5846	2.3526	2.4535	2.7800	2.6056
prec_perc50	4.1107	4.1284	3.7429	3.7419	3.2071	3.3067	4.0143	3.6172
prec_perc60	6.0959	5.8942	5.4089	5.3230	4.1470	4.4129	5.4140	4.9749
prec_perc80	12.6190	12.3714	10.7690	11.2647	8.1843	8.2821	9.7151	9.7699
prec_perc90	18.6230	19.2960	16.2370	17.7472	13.3510	12.3948	14.6030	14.8940
prec_perc95	25.8370	27.1601	24.4160	25.1128	18.7070	16.6809	19.5400	20.4645
prec_perc99	41.1960	40.6431	37.3210	38.6025	24.5110	23.9900	26.6210	29.7698
prec_quant20	0.9850	0.9815	0.9838	0.9813	0.9790	0.9707	0.9783	0.9758
prec_quant40	0.9359	0.9287	0.9322	0.9292	0.9253	0.9002	0.9147	0.9132
prec_quant50	0.8955	0.8860	0.8858	0.8868	0.8568	0.8483	0.8652	0.8656
prec_quant60	0.8230	0.8158	0.8169	0.8176	0.7871	0.7695	0.7796	0.7900
prec_quant80	0.5831	0.5846	0.5832	0.5900	0.5668	0.5343	0.5305	0.5563
prec_quant90	0.3723	0.3779	0.3834	0.3833	0.3580	0.3367	0.3438	0.3543
prec_quant95	0.2319	0.2343	0.2438	0.2393	0.2156	0.2048	0.1970	0.2163
prec_quant99	0.1489	0.1490	0.1471	0.1478	0.1309	0.1215	0.1244	0.1385
prec>10mm	9.3571	9.0879	8.6071	8.5141	5.7143	5.7186	7.0714	6.8659
consec_dry_day	9.0000	8.7900	8.5714	8.3478	8.6429	7.4569	9.4643	9.4832
consec_wet_day	4.6071	4.6756	5.4643	5.0080	4.9643	4.8779	5.2143	5.0526
wet_day_pers	0.4672	0.4718	0.5136	0.5010	0.4756	0.4849	0.4927	0.4919
dry_day_pers	0.6453	0.6500	0.6422	0.6408	0.6157	0.6105	0.6613	0.6693
corr_spell_lengths	0.1125	0.1218	0.1558	0.1417	0.0913	0.0953	0.1540	0.1612
wet_spell_mean	1.8908	1.9127	2.0798	2.0265	1.9593	1.9595	2.0202	1.9932
wet_spell_sd	1.0937	1.1141	1.3270	1.2152	1.1082	1.1323	1.2362	1.2063
wet_spell_50thperc	1.6071	1.5884	1.7679	1.6809	1.6429	1.7123	1.6250	1.6762
dry_spell_mean	2.8955	2.8988	2.8074	2.8203	2.7004	2.5939	3.0229	3.0770
dry_spell_sd	2.2252	2.1965	2.1237	2.0842	2.1183	1.8406	2.3914	2.4250
dry_spell_50thperc	2.3036	2.2392	2.1429	2.2046	2.0357	2.0827	2.2321	2.3191
max_rainfall_3d	54.6570	52.9161	52.2540	50.5194	37.2890	32.7858	39.4250	40.0242
max_rainfall_5d	62.0070	61.9632	58.3890	58.9531	43.9110	39.4994	45.8460	47.4095
max_rainfall_10d	83.5460	81.6259	72.7500	77.7300	60.5710	53.6814	62.5320	62.9873
rain_per_rainday	7.4202	7.4861	6.6712	6.8722	5.2549	5.1358	5.9503	5.9869
temp_max	24.9900	25.0431	12.8170	12.8291	-3.4237	-3.3624	10.6910	10.7503
temp_min	14.0570	13.8745	3.5905	3.5833	-12.3030	-11.9479	0.5180	0.5170
p00	0.6522	0.6553	0.6453	0.6458	0.6244	0.6158	0.6669	0.6747
p10	0.5257	0.5212	0.4785	0.4918	0.5129	0.5091	0.4941	0.5003
p000	0.6332	0.6407	0.6332	0.6268	0.6218	0.5981	0.6571	0.6682
p010	0.4677	0.4739	0.4331	0.4493	0.4353	0.4343	0.4551	0.4471
p100	0.6864	0.6825	0.6706	0.6802	0.6379	0.6435	0.6841	0.6887
p110	0.5861	0.5743	0.5208	0.5318	0.5917	0.5874	0.5306	0.5529
p0000	0.6396	0.6476	0.6403	0.6336	0.6220	0.5905	0.9411	0.9431
p0010	0.4678	0.4751	0.4201	0.4576	0.4515	0.4504	0.4622	0.4526
p0100	0.7314	0.7153	0.6712	0.6795	0.6217	0.6484	0.6889	0.6914
p0110	0.5487	0.5367	0.4755	0.4730	0.5940	0.5854	0.5205	0.5418
p1000	0.6299	0.6275	0.6228	0.6165	0.6254	0.6078	0.6272	0.6448
p1010	0.4724	0.4735	0.4472	0.4300	0.4031	0.4065	0.4314	0.4349
p1100	0.6473	0.6531	0.6702	0.6799	0.6532	0.6397	0.6755	0.6871
p1110	0.6345	0.6262	0.5665	0.5972	0.5922	0.5920	0.5408	0.5638

Station de Québec

Indices	Été		Automne		Hiver		Printemps	
	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim
<i>prec_mean</i>	3.7030	3.7654	3.5066	3.3654	2.8879	2.7448	2.9545	2.8412
<i>prec_perc20</i>	1.4009	1.3954	1.2423	1.2598	0.8604	0.9143	1.1029	1.1893
<i>prec_perc40</i>	3.6843	3.5068	2.9641	3.0064	1.8541	2.0506	2.8173	2.7347
<i>prec_perc50</i>	5.1817	5.1598	4.4117	4.3584	2.8450	2.9149	4.2417	3.9137
<i>prec_perc60</i>	7.5143	7.3869	6.3416	6.1579	4.0935	4.0173	6.0059	5.4537
<i>prec_perc80</i>	14.0320	14.8596	12.0420	12.4970	8.8869	8.3062	12.0520	11.0004
<i>prec_perc90</i>	23.4170	22.9814	19.4290	19.4379	14.4770	13.3944	17.1290	17.1614
<i>prec_perc95</i>	31.7370	31.0985	26.8480	26.5509	19.7090	18.6545	23.3920	23.4897
<i>prec_perc99</i>	43.5400	43.4118	41.7730	38.2239	30.0960	28.4954	33.1230	33.3099
<i>prec_quant20</i>	0.9838	0.9820	0.9819	0.9804	0.9826	0.9784	0.9826	0.9788
<i>prec_quant40</i>	0.9281	0.9288	0.9318	0.9254	0.9335	0.9222	0.9276	0.9215
<i>prec_quant50</i>	0.8838	0.8841	0.8844	0.8805	0.8895	0.8771	0.8826	0.8757
<i>prec_quant60</i>	0.8076	0.8103	0.8112	0.8077	0.8290	0.8070	0.8050	0.8021
<i>prec_quant80</i>	0.5760	0.5721	0.5818	0.5732	0.5957	0.5839	0.5627	0.5693
<i>prec_quant90</i>	0.3642	0.3622	0.3717	0.3653	0.3878	0.3791	0.3511	0.3630
<i>prec_quant95</i>	0.2136	0.2169	0.2228	0.2182	0.2195	0.2218	0.2019	0.2164
<i>prec_quant99</i>	0.1294	0.1280	0.1311	0.1268	0.1199	0.1167	0.1254	0.1303
<i>prec>10mm</i>	11.4330	11.7300	10.7670	10.2364	8.0667	7.4216	9.4333	8.5872
<i>consec_dry_day</i>	8.3333	8.4807	8.0000	7.9839	7.7000	6.7253	9.4667	10.0383
<i>consec_wet_day</i>	5.4000	5.5841	5.6333	5.4198	7.2000	7.2859	6.2667	6.0256
<i>wet_day_pers</i>	0.4926	0.5045	0.5461	0.5248	0.6044	0.6056	0.5589	0.5630
<i>dry_day_pers</i>	0.6311	0.6317	0.6120	0.6141	0.5518	0.5484	0.6751	0.6740
<i>corr_spell_lengths</i>	0.1236	0.1362	0.1581	0.1389	0.1563	0.1540	0.2339	0.2370
<i>wet_spell_mean</i>	1.9931	2.0491	2.2250	2.1291	2.5677	2.5740	2.3071	2.3216
<i>wet_spell_sd</i>	1.2767	1.3400	1.3837	1.2997	1.7999	1.7931	1.5100	1.4720
<i>wet_spell_50thperc</i>	1.6167	1.6363	1.9000	1.8187	1.9333	2.0834	2.0167	1.9704
<i>dry_spell_mean</i>	2.7487	2.7598	2.5735	2.6347	2.3112	2.2532	3.2261	3.1543
<i>dry_spell_sd</i>	2.0846	2.1244	1.9441	1.9835	1.8771	1.6537	2.5890	2.6512
<i>dry_spell_50thperc</i>	2.1167	2.0952	1.9500	2.0332	1.6667	1.7001	2.2833	2.2794
<i>max_rainfall_3d</i>	58.6070	60.0554	56.0570	52.8112	42.3600	39.6207	46.0830	46.3565
<i>max_rainfall_5d</i>	71.5430	72.2366	68.5430	63.3208	51.0500	48.1478	55.7900	56.0303
<i>max_rainfall_10d</i>	94.4370	97.6435	88.7130	85.8119	71.5200	65.8513	78.5200	75.1703
<i>rain_per_rainday</i>	8.7722	8.8366	7.5938	7.5191	5.4339	5.1527	6.8997	6.6649
<i>temp_max</i>	23.6400	23.5707	10.5550	10.6027	-5.7573	-5.7605	8.5449	8.5108
<i>temp_min</i>	12.2930	11.9892	1.7444	1.7626	-15.0110	-14.7835	-1.5308	-1.6112
<i>p00</i>	0.6365	0.6375	0.6180	0.6200	0.5747	0.5568	0.6857	0.6821
<i>p10</i>	0.5004	0.4880	0.4469	0.4679	0.3918	0.3880	0.4294	0.4292
<i>p000</i>	0.6231	0.6302	0.6054	0.6091	0.6017	0.5636	0.7027	0.7000
<i>p010</i>	0.4754	0.4634	0.3829	0.4069	0.3606	0.3385	0.3538	0.3418
<i>p100</i>	0.6602	0.6495	0.6399	0.6369	0.5390	0.5473	0.6510	0.6454
<i>p110</i>	0.5255	0.5119	0.5015	0.5210	0.4126	0.4185	0.4892	0.4948
<i>p0000</i>	0.6432	0.6487	0.6201	0.6264	0.6370	0.5783	0.9463	0.9450
<i>p0010</i>	0.4582	0.4483	0.3686	0.4030	0.3909	0.3543	0.3608	0.3458
<i>p0100</i>	0.6654	0.6549	0.6459	0.6569	0.5833	0.5769	0.6784	0.6605
<i>p0110</i>	0.5272	0.5145	0.4955	0.4976	0.4018	0.4146	0.5161	0.5157
<i>p1000</i>	0.5882	0.5973	0.5785	0.5819	0.5525	0.5447	0.6887	0.6892
<i>p1010</i>	0.5183	0.4919	0.4042	0.4097	0.3333	0.3194	0.3333	0.3337
<i>p1100</i>	0.6509	0.6449	0.6328	0.6222	0.5175	0.5310	0.6326	0.6396
<i>p1110</i>	0.5261	0.5101	0.5104	0.5470	0.4228	0.4204	0.4632	0.4754

Station de Schefferville

Indices	Été		Automne		Hiver		Printemps	
	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim
prec_mean	2.8435	3.0223	2.6834	2.6329	1.6282	1.6166	1.9467	1.9780
prec_perc20	0.8837	0.9245	0.7042	0.7663	0.5894	0.6566	0.7757	0.7637
prec_perc40	1.9248	2.1269	1.5059	1.6665	1.2683	1.3093	1.5550	1.6504
prec_perc50	2.6760	3.0619	2.2840	2.3592	1.6920	1.7928	2.3300	2.3299
prec_perc60	3.7363	4.4082	3.2037	3.3463	2.3325	2.4700	3.2706	3.2988
prec_perc80	8.3763	9.1696	7.1029	7.0069	5.0470	5.0430	6.2494	6.8743
prec_perc90	13.7710	14.2623	10.9350	10.9812	8.3387	7.8689	10.1330	10.7753
prec_perc95	18.4960	19.7217	16.2930	15.1988	11.4320	10.9098	14.0120	14.9308
prec_perc99	28.7350	31.2569	25.6410	24.9584	19.1960	16.7672	23.1960	22.5725
prec_quant20	0.9834	0.9798	0.9844	0.9774	0.9855	0.9720	0.9804	0.9766
prec_quant40	0.9316	0.9266	0.9330	0.9221	0.9308	0.9100	0.9323	0.9202
prec_quant50	0.8865	0.8829	0.8893	0.8781	0.8860	0.8636	0.8800	0.8763
prec_quant60	0.8243	0.8138	0.8277	0.8100	0.8213	0.7931	0.8037	0.8067
prec_quant80	0.5970	0.5820	0.6016	0.5818	0.5992	0.5665	0.5778	0.5775
prec_quant90	0.3926	0.3760	0.3986	0.3777	0.3947	0.3655	0.3795	0.3718
prec_quant95	0.2306	0.2238	0.2492	0.2306	0.2461	0.2145	0.2338	0.2211
prec_quant99	0.1128	0.1135	0.1161	0.1051	0.1388	0.1162	0.1353	0.1259
prec>10mm	8.2800	8.7063	6.4400	6.3984	3.3600	2.6889	4.2800	4.7741
consec_dry_day	7.2000	7.2821	6.1200	6.3916	6.7600	7.1746	9.5600	9.5536
consec_wet_day	8.0400	8.4441	9.6800	10.2992	7.9200	7.7196	6.6800	7.2943
wet_day_pers	0.6360	0.6377	0.6866	0.6855	0.5989	0.6159	0.6164	0.6105
dry_day_pers	0.5528	0.5671	0.4780	0.5008	0.5895	0.5902	0.6429	0.6511
corr_spell_lengths	0.1889	0.2048	0.1646	0.1863	0.1884	0.2060	0.2593	0.2616
wet_spell_mean	2.8272	2.8207	3.2734	3.2568	2.5769	2.6535	2.6036	2.6248
wet_spell_sd	2.1239	2.1661	2.5816	2.6913	1.9612	1.9607	1.7768	1.8721
wet_spell_50thperc	2.0800	2.1544	2.3600	2.3863	1.9800	2.0654	2.1600	2.0879
dry_spell_mean	2.2954	2.3614	2.0463	2.0636	2.5308	2.4884	2.9384	2.9569
dry_spell_sd	1.7409	1.8168	1.4831	1.5825	1.7836	1.8194	2.4198	2.4870
dry_spell_50thperc	1.7800	1.7739	1.4400	1.4193	1.9200	1.9279	2.1400	2.1181
max_rainfall_3d	44.5920	43.9671	41.6160	35.8005	30.4240	23.5433	37.2160	31.4684
max_rainfall_5d	51.9600	53.8594	48.3520	44.2106	34.3680	28.6315	43.5920	38.0175
max_rainfall_10d	73.8680	74.2160	64.1360	61.6782	46.1520	39.0991	56.1320	51.6276
rain_per_rainday	5.1206	5.5614	4.3200	4.3013	3.2136	3.1311	4.0210	4.1972
temp_max	15.9920	15.6829	1.8492	1.8395	-16.4110	-16.0545	-1.0893	-1.2615
temp_min	6.1490	6.0311	-4.9160	-5.0320	-26.4120	-26.3247	-12.4420	-12.4886
p00	0.5673	0.5752	0.5454	0.5139	0.6134	0.5992	0.6538	0.6605
p10	0.3571	0.3543	0.3007	0.3078	0.3937	0.3775	0.3789	0.3807
p000	0.5804	0.5766	0.6096	0.5536	0.6177	0.6030	0.6572	0.6684
p010	0.3733	0.3544	0.2978	0.3124	0.3800	0.3546	0.3432	0.3519
p100	0.5531	0.5699	0.4703	0.4711	0.6107	0.5957	0.6444	0.6450
p110	0.3493	0.3536	0.3014	0.3053	0.4033	0.3923	0.4066	0.3980
p0000	0.6288	0.6184	0.6760	0.5974	0.6235	0.5857	0.9332	0.9354
p0010	0.3557	0.3478	0.3172	0.3262	0.3813	0.3676	0.3668	0.3642
p0100	0.5515	0.5537	0.5170	0.5050	0.5660	0.5758	0.6350	0.6330
p0110	0.3517	0.3539	0.3321	0.3343	0.4356	0.4184	0.3977	0.3956
p1000	0.5187	0.5149	0.5134	0.4989	0.6124	0.6304	0.6000	0.6081
p1010	0.3909	0.3615	0.2783	0.2992	0.3795	0.3367	0.2937	0.3282
p1100	0.5547	0.5776	0.4448	0.4550	0.6415	0.6073	0.6517	0.6502
p1110	0.3510	0.3533	0.2914	0.2921	0.3830	0.3769	0.4124	0.3992

Station de Sept-Îles

Indices	Été		Automne		Hiver		Printemps	
	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim
<i>prec_mean</i>	3.1221	3.0637	3.4983	3.5038	2.8651	2.6999	2.9948	2.9612
<i>prec_perc20</i>	1.0601	1.1426	1.2488	1.2271	1.0223	1.0282	1.1415	1.1706
<i>prec_perc40</i>	2.6192	2.6685	2.9979	2.9094	2.2981	2.2988	2.6484	2.7272
<i>prec_perc50</i>	3.8034	3.8334	4.1466	4.1963	3.4000	3.2534	3.8190	3.9292
<i>prec_perc60</i>	5.6437	5.4497	6.3080	5.9886	4.8066	4.5635	5.5415	5.6050
<i>prec_perc80</i>	12.2220	11.5104	12.7500	12.6203	9.6492	9.2937	12.1630	11.7835
<i>prec_perc90</i>	19.7500	18.2933	19.5010	19.9555	15.9890	14.7778	19.3990	18.7307
<i>prec_perc95</i>	25.8520	26.3071	28.0190	28.4724	22.1400	21.2747	25.7920	26.9298
<i>prec_perc99</i>	37.2070	40.7050	41.6070	44.3176	37.7760	33.7025	35.0930	40.9464
<i>prec_quant20</i>	0.9851	0.9811	0.9843	0.9816	0.9827	0.9787	0.9839	0.9810
<i>prec_quant40</i>	0.9360	0.9286	0.9331	0.9295	0.9281	0.9228	0.9338	0.9284
<i>prec_quant50</i>	0.8957	0.8863	0.8896	0.8870	0.8880	0.8787	0.8940	0.8863
<i>prec_quant60</i>	0.8283	0.8180	0.8183	0.8183	0.8154	0.8086	0.8252	0.8174
<i>prec_quant80</i>	0.5969	0.5923	0.5840	0.5912	0.5936	0.5835	0.5852	0.5910
<i>prec_quant90</i>	0.3754	0.3876	0.3855	0.3860	0.3961	0.3834	0.3699	0.3864
<i>prec_quant95</i>	0.2203	0.2406	0.2282	0.2357	0.2554	0.2346	0.2125	0.2393
<i>prec_quant99</i>	0.1331	0.1451	0.1339	0.1400	0.1584	0.1391	0.1312	0.1515
<i>prec>10mm</i>	9.2414	9.1264	10.9660	10.4322	7.4828	7.4376	9.4483	8.8359
<i>consec_dry_day</i>	8.4483	8.1081	8.0345	7.9863	8.0690	8.3239	9.6897	9.7398
<i>consec_wet_day</i>	5.5172	5.3234	5.8621	5.7299	5.5172	5.6347	5.8621	5.9488
<i>wet_day_pers</i>	0.4891	0.4992	0.5427	0.5318	0.5415	0.5416	0.5529	0.5424
<i>dry_day_pers</i>	0.6167	0.6188	0.6196	0.6125	0.5987	0.6040	0.6843	0.6851
<i>corr_spell_lengths</i>	0.1058	0.1180	0.1623	0.1443	0.1402	0.1456	0.2372	0.2275
<i>wet_spell_mean</i>	1.9806	2.0234	2.2406	2.1630	2.2179	2.2067	2.2704	2.2247
<i>wet_spell_sd</i>	1.2648	1.2704	1.3979	1.3687	1.3250	1.3404	1.4882	1.4554
<i>wet_spell_50thperc</i>	1.5690	1.6536	1.9138	1.8361	1.8966	1.9229	1.8966	1.8551
<i>dry_spell_mean</i>	2.6369	2.6638	2.6936	2.6233	2.5999	2.5777	3.3046	3.2424
<i>dry_spell_sd</i>	2.0502	2.0191	2.0406	1.9996	2.0221	2.0931	2.5345	2.5574
<i>dry_spell_50thperc</i>	2.0862	2.0388	2.1207	1.9981	1.8966	1.8560	2.6034	2.4728
<i>max_rainfall_3d</i>	49.4930	52.9454	57.2830	58.4434	48.3170	44.5393	55.8550	53.9594
<i>max_rainfall_5d</i>	62.2830	62.3532	67.8070	69.2696	56.3030	52.5579	62.8140	63.4948
<i>max_rainfall_10d</i>	82.2660	82.0199	90.8590	92.3628	76.3210	69.8658	83.6340	83.2173
<i>rain_per_rainday</i>	7.1884	7.1017	7.7220	7.7469	6.1596	5.8437	7.1430	7.2610
<i>temp_max</i>	18.3730	18.1201	7.3928	7.4469	-7.7723	-7.5009	4.1084	4.1856
<i>temp_min</i>	9.2240	8.8500	-0.7835	-0.6089	-18.3020	-17.8912	-4.7362	-4.7316
<i>p00</i>	0.6215	0.6244	0.6308	0.6187	0.6205	0.6114	0.6929	0.6915
<i>p10</i>	0.5049	0.4937	0.4512	0.4611	0.4521	0.4523	0.4365	0.4488
<i>p000</i>	0.6061	0.6159	0.6308	0.6159	0.6426	0.6310	0.6938	0.6908
<i>p010</i>	0.4700	0.4577	0.3779	0.4005	0.3705	0.3664	0.3863	0.3900
<i>p100</i>	0.6450	0.6361	0.6329	0.6232	0.5856	0.5804	0.6894	0.6947
<i>p110</i>	0.5354	0.5290	0.5101	0.5119	0.5204	0.5231	0.4802	0.4956
<i>p0000</i>	0.6347	0.6345	0.6467	0.6331	0.6783	0.6581	0.9459	0.9456
<i>p0010</i>	0.4448	0.4380	0.3902	0.4043	0.3158	0.3183	0.3801	0.3803
<i>p0100</i>	0.6528	0.6436	0.6103	0.5992	0.5928	0.5852	0.6667	0.6980
<i>p0110</i>	0.5306	0.5134	0.4985	0.5077	0.5198	0.5183	0.5089	0.5150
<i>p1000</i>	0.5635	0.5829	0.5976	0.5885	0.5836	0.5846	0.6988	0.6915
<i>p1010</i>	0.5200	0.4923	0.3617	0.3915	0.4450	0.4331	0.3830	0.4092
<i>p1100</i>	0.6382	0.6295	0.6440	0.6394	0.5810	0.5768	0.7038	0.6942
<i>p1110</i>	0.5397	0.5477	0.5143	0.5144	0.5199	0.5280	0.4522	0.4756

Station de Sherbrooke

Indices	Été		Automne		Hiver		Printemps	
	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim
prec_mean	3.7564	3.7975	3.0978	3.0626	2.5802	2.4668	2.7021	2.5458
prec_perc20	1.3350	1.2817	1.0121	1.0456	0.7128	0.7813	0.9542	0.9688
prec_perc40	3.2077	3.1595	2.3127	2.4492	1.4797	1.6741	2.3116	2.1485
prec_perc50	4.7603	4.6577	3.4448	3.5378	2.1534	2.3371	3.2500	3.0352
prec_perc60	6.7579	6.6525	5.0937	4.9753	2.9840	3.1348	4.8291	4.1699
prec_perc80	13.1590	13.5675	10.2960	10.4909	6.8514	6.4602	9.3052	8.5847
prec_perc90	20.0520	21.1453	16.9970	16.8633	12.1200	10.7070	14.7110	13.7888
prec_perc95	29.3350	28.9208	22.5800	23.5538	17.4930	15.0849	18.9270	19.1824
prec_perc99	45.3240	41.7675	33.1140	35.4932	28.1460	24.2825	28.8370	28.6444
prec_quant20	0.9842	0.9820	0.9844	0.9806	0.9828	0.9763	0.9838	0.9778
prec_quant40	0.9322	0.9293	0.9339	0.9278	0.9343	0.9182	0.9274	0.9205
prec_quant50	0.8874	0.8850	0.8889	0.8847	0.8954	0.8723	0.8838	0.8752
prec_quant60	0.8146	0.8128	0.8205	0.8156	0.8338	0.8032	0.8108	0.8044
prec_quant80	0.5798	0.5780	0.5918	0.5901	0.6245	0.5889	0.5764	0.5799
prec_quant90	0.3778	0.3693	0.3751	0.3830	0.4184	0.3876	0.3568	0.3755
prec_quant95	0.2313	0.2158	0.2195	0.2264	0.2537	0.2375	0.2099	0.2212
prec_quant99	0.1329	0.1216	0.1194	0.1290	0.1281	0.1104	0.1204	0.1244
prec>10mm	12.0340	11.7500	9.1379	8.9342	6.2414	5.8722	8.4483	7.1005
consec_dry_day	8.0000	7.9173	8.3103	7.8966	6.3793	5.6630	9.9310	8.8574
consec_wet_day	5.9310	6.2075	6.8966	6.1666	8.6552	8.4631	6.8621	6.7089
wet_day_pers	0.5359	0.5559	0.5755	0.5583	0.6347	0.6441	0.5893	0.5929
dry_day_pers	0.6067	0.6089	0.5929	0.5967	0.4890	0.4704	0.6210	0.6246
corr_spell_lengths	0.1426	0.1648	0.1684	0.1550	0.1237	0.1145	0.2102	0.2175
wet_spell_mean	2.2293	2.2855	2.4719	2.2911	2.7916	2.8545	2.4751	2.4887
wet_spell_sd	1.4047	1.5112	1.6650	1.5090	2.1082	2.1152	1.6934	1.6675
wet_spell_50thperc	1.8276	1.8928	1.9828	1.8887	2.1897	2.2217	2.0862	2.0480
dry_spell_mean	2.5930	2.6039	2.4833	2.5329	2.0045	1.9224	2.7799	2.7461
dry_spell_sd	1.9629	1.9938	2.0254	1.9625	1.5088	1.3450	2.4785	2.3066
dry_spell_50thperc	2.0690	1.9586	1.7586	1.9091	1.4138	1.3842	1.9483	1.8986
max_rainfall_3d	60.0140	58.3043	45.4860	48.9163	39.4170	33.8601	41.6660	40.0513
max_rainfall_5d	73.1280	70.3059	52.0720	58.9205	48.0450	41.2986	49.6970	48.2108
max_rainfall_10d	97.9240	95.7691	73.9590	79.4610	66.9690	57.0793	67.8410	65.3134
rain_per_rainday	8.2062	8.1208	6.3207	6.4274	4.4175	4.1309	5.6587	5.3203
temp_max	23.6200	23.5485	11.7880	11.8038	-3.6345	-3.7021	10.1560	10.1296
temp_min	10.3740	10.0733	0.6136	0.6669	-15.3250	-15.0954	-2.4103	-2.5485
p00	0.6139	0.6162	0.6024	0.6032	0.5160	0.4800	0.6359	0.6342
p10	0.4560	0.4374	0.4088	0.4347	0.3612	0.3505	0.3978	0.4007
p000	0.6172	0.6213	0.6103	0.6026	0.5637	0.4941	0.6693	0.6709
p010	0.4110	0.3910	0.3867	0.3961	0.3213	0.3104	0.3494	0.3407
p100	0.6131	0.6075	0.5884	0.6027	0.4688	0.4661	0.5807	0.5726
p110	0.4886	0.4736	0.4226	0.4637	0.3830	0.3717	0.4303	0.4403
p0000	0.6286	0.6317	0.6420	0.6308	0.6319	0.5369	0.9324	0.9304
p0010	0.4128	0.3897	0.3677	0.3836	0.3417	0.3308	0.3427	0.3378
p0100	0.6018	0.6050	0.5821	0.6079	0.4702	0.4742	0.5607	0.5390
p0110	0.4732	0.4683	0.3994	0.4402	0.3932	0.3846	0.4375	0.4404
p1000	0.5994	0.6036	0.5518	0.5583	0.4837	0.4524	0.6399	0.6601
p1010	0.3981	0.3939	0.4183	0.4152	0.3082	0.2918	0.3512	0.3445
p1100	0.6203	0.6093	0.5890	0.5980	0.4746	0.4618	0.5931	0.5919
p1110	0.5060	0.4792	0.4418	0.4834	0.3754	0.3638	0.4244	0.4404

Station de Ste-Clotilde

Indices	Été		Automne		Hiver		Printemps	
	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim
prec_mean	3.2097	3.3499	3.1466	3.1284	2.3732	2.3905	2.6046	2.5836
prec_perc20	1.4394	1.5095	1.3405	1.3461	1.3040	1.3949	1.4646	1.4312
prec_perc40	3.4558	3.4875	2.8265	3.1021	2.6275	2.7538	2.8988	3.0085
prec_perc50	5.0154	4.9292	3.8885	4.4125	3.4346	3.6552	4.1231	4.1113
prec_perc60	7.2189	6.8855	5.6335	6.1960	4.5600	4.8156	5.7220	5.5674
prec_perc80	12.9510	13.9468	12.1060	12.5888	8.6015	8.7374	10.8630	10.5580
prec_perc90	20.4410	21.1537	19.2800	19.3302	13.7430	12.7977	16.2590	15.7092
prec_perc95	28.5260	29.2713	26.4380	26.9853	18.9200	17.0851	20.7520	21.3670
prec_perc99	45.2380	43.6244	42.8730	40.2621	25.7040	24.6080	31.2150	30.4972
prec_quant20	0.9820	0.9792	0.9804	0.9794	0.9755	0.9681	0.9798	0.9733
prec_quant40	0.9238	0.9211	0.9278	0.9226	0.9071	0.8928	0.9085	0.9059
prec_quant50	0.8816	0.8754	0.8835	0.8775	0.8531	0.8385	0.8634	0.8555
prec_quant60	0.8097	0.8016	0.8190	0.8045	0.7780	0.7568	0.7895	0.7769
prec_quant80	0.5732	0.5671	0.6030	0.5718	0.5475	0.5189	0.5454	0.5396
prec_quant90	0.3678	0.3618	0.3798	0.3671	0.3535	0.3252	0.3518	0.3397
prec_quant95	0.2297	0.2225	0.2446	0.2267	0.2037	0.1960	0.2011	0.2056
prec_quant99	0.1583	0.1423	0.1497	0.1422	0.1306	0.1151	0.1304	0.1296
prec>10mm	10.2310	10.3602	9.0000	9.4856	5.9231	6.2751	8.2308	7.7401
consec_dry_day	8.7692	9.0099	8.3077	8.7750	8.1154	7.1118	10.1920	9.5706
consec_wet_day	5.2308	5.4757	5.6538	5.2680	4.8846	5.2792	5.3077	5.2884
wet_day_pers	0.4484	0.4668	0.5026	0.4954	0.4487	0.4680	0.4951	0.4875
dry_day_pers	0.6409	0.6488	0.6411	0.6510	0.5914	0.5848	0.6611	0.6597
corr_spell_lengths	0.0893	0.1155	0.1437	0.1464	0.0401	0.0528	0.1562	0.1472
wet_spell_mean	1.8447	1.9113	2.0503	2.0117	1.8636	1.9038	2.0139	1.9817
wet_spell_sd	1.1879	1.2857	1.3658	1.2852	1.1232	1.2017	1.2820	1.2555
wet_spell_50thperc	1.4423	1.4364	1.5962	1.5706	1.4615	1.5534	1.6731	1.6057
dry_spell_mean	2.8429	2.8913	2.8249	2.9092	2.4947	2.4329	3.0475	2.9969
dry_spell_sd	2.1547	2.2739	2.1273	2.2324	1.9254	1.7302	2.5660	2.4516
dry_spell_50thperc	2.2692	2.1672	2.1731	2.2468	1.9038	1.9234	2.1346	2.1893
max_rainfall_3d	58.2380	57.6358	58.4460	53.7502	37.1960	34.0228	44.0420	41.7978
max_rainfall_5d	65.7880	68.6930	66.5420	63.3355	44.5380	41.5610	51.4690	50.1403
max_rainfall_10d	86.0920	91.2836	84.6500	83.8192	62.8310	56.8935	67.6150	67.4757
rain_per_rainday	8.2863	8.4282	7.5140	7.6529	5.5605	5.4542	6.5735	6.4806
temp_max	24.9450	24.9433	12.8110	12.7742	-3.0680	-3.0228	11.0010	10.9908
temp_min	13.4760	13.2303	3.3229	3.2320	-12.3920	-12.0775	0.4042	0.4205
p00	0.6545	0.6542	0.6648	0.6561	0.6123	0.5899	0.6797	0.6655
p10	0.5419	0.5239	0.4889	0.4959	0.5406	0.5256	0.4936	0.5041
p000	0.6496	0.6502	0.6747	0.6559	0.6285	0.5850	0.6839	0.6731
p010	0.5285	0.5181	0.4849	0.4799	0.5010	0.4815	0.4561	0.4647
p100	0.6694	0.6609	0.6463	0.6566	0.5953	0.5966	0.6711	0.6518
p110	0.5537	0.5314	0.4958	0.5099	0.5849	0.5748	0.5292	0.5423
p0000	0.6656	0.6663	0.6672	0.6480	0.6365	0.5646	0.9467	0.9429
p0010	0.5387	0.5351	0.4597	0.4631	0.5101	0.4702	0.4422	0.4569
p0100	0.6434	0.6315	0.6471	0.6642	0.5922	0.6028	0.6845	0.6455
p0110	0.5826	0.5712	0.4726	0.4675	0.6196	0.6213	0.5451	0.5569
p1000	0.6319	0.6195	0.6871	0.6712	0.6131	0.6135	0.6445	0.6398
p1010	0.5125	0.4863	0.5287	0.5105	0.4976	0.4993	0.4730	0.4761
p1100	0.6987	0.6922	0.6426	0.6488	0.6024	0.5915	0.6598	0.6599
p1110	0.5187	0.4877	0.5127	0.5519	0.5307	0.5136	0.5140	0.5232

Station de Ste-Martine

Indices	Été		Automne		Hiver		Printemps	
	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim	Obs	Sim
<i>prec_mean</i>	3.1397	3.2011	2.9615	2.9893	2.1517	2.1983	2.4978	2.4292
<i>prec_perc20</i>	1.6827	1.7296	1.7001	1.5879	1.6759	1.5440	1.5299	1.6481
<i>prec_perc40</i>	3.6827	3.7644	3.2436	3.4257	3.0329	2.9870	3.2927	3.3395
<i>prec_perc50</i>	5.3143	5.2143	4.6393	4.7244	3.9929	3.9312	4.5018	4.4648
<i>prec_perc60</i>	7.4794	7.1338	6.3531	6.4295	5.0743	5.1436	6.0750	5.9300
<i>prec_perc80</i>	13.9830	13.7416	11.7480	12.3464	9.0630	9.2045	10.8570	10.8418
<i>prec_perc90</i>	20.0690	20.3259	17.7410	18.3598	13.9960	13.3659	15.5000	15.7649
<i>prec_perc95</i>	26.0650	27.7157	24.1140	24.9437	19.1510	17.7314	21.2750	21.0869
<i>prec_perc99</i>	36.7610	39.7379	38.4890	36.1878	23.4640	24.1776	26.7460	28.7685
<i>prec_quant20</i>	0.9772	0.9753	0.9742	0.9747	0.9718	0.9661	0.9726	0.9695
<i>prec_quant40</i>	0.9168	0.9106	0.9104	0.9093	0.9044	0.8878	0.9004	0.8957
<i>prec_quant50</i>	0.8664	0.8615	0.8596	0.8597	0.8462	0.8327	0.8516	0.8423
<i>prec_quant60</i>	0.7834	0.7835	0.7830	0.7819	0.7672	0.7493	0.7609	0.7597
<i>prec_quant80</i>	0.5393	0.5450	0.5500	0.5442	0.5350	0.5097	0.5195	0.5193
<i>prec_quant90</i>	0.3326	0.3429	0.3567	0.3439	0.3414	0.3158	0.3109	0.3223
<i>prec_quant95</i>	0.1902	0.2080	0.2244	0.2098	0.1835	0.1885	0.1869	0.1886
<i>prec_quant99</i>	0.1296	0.1362	0.1408	0.1340	0.1349	0.1235	0.1252	0.1307
<i>prec>10mm</i>	10.3570	10.1083	8.9286	9.1962	5.8929	5.9252	7.8929	7.3567
<i>consec_dry_day</i>	8.6429	8.9259	8.5357	8.8616	9.2143	8.5978	10.3930	10.4073
<i>consec_wet_day</i>	5.1071	5.0636	5.2857	4.9806	4.2143	4.5143	5.0000	4.8279
<i>wet_day_pers</i>	0.4376	0.4473	0.4958	0.4813	0.4237	0.4406	0.4808	0.4825
<i>dry_day_pers</i>	0.6513	0.6562	0.6646	0.6586	0.6552	0.6523	0.6928	0.7034
<i>corr_spell_lengths</i>	0.0889	0.1035	0.1604	0.1399	0.0789	0.0929	0.1735	0.1858
<i>wet_spell_mean</i>	1.7925	1.8384	2.0096	1.9538	1.7600	1.8081	1.9923	1.9637
<i>wet_spell_sd</i>	1.1596	1.1792	1.2464	1.2033	0.9769	1.0417	1.2088	1.1838
<i>wet_spell_50thperc</i>	1.3214	1.3865	1.5893	1.5636	1.4286	1.4897	1.6250	1.6030
<i>dry_spell_mean</i>	2.9096	2.9490	3.0200	2.9707	3.0092	2.9072	3.3315	3.4286
<i>dry_spell_sd</i>	2.1548	2.2351	2.2138	2.2356	2.3301	2.1595	2.6276	2.7229
<i>dry_spell_50thperc</i>	2.4107	2.2743	2.2500	2.2950	2.2679	2.3036	2.5893	2.5778
<i>max_rainfall_3d</i>	49.8210	53.0101	52.6140	48.9649	33.8710	33.3523	38.9500	40.1786
<i>max_rainfall_5d</i>	58.4570	63.3563	60.4860	58.3624	40.4680	40.1700	47.5460	47.8884
<i>max_rainfall_10d</i>	79.0540	84.3943	76.7710	78.2519	55.0390	54.3644	64.6680	64.1300
<i>rain_per_rainday</i>	8.2457	8.3403	7.4048	7.5342	5.8297	5.7382	6.6707	6.6688
<i>temp_max</i>	25.2900	25.3063	12.8530	12.7979	-3.6205	-3.6069	10.6620	10.6628
<i>temp_min</i>	14.1110	13.8648	3.6530	3.6333	-12.6120	-12.2886	0.4851	0.4700
<i>p00</i>	0.6567	0.6611	0.6697	0.6637	0.6699	0.6570	0.7093	0.7083
<i>p10</i>	0.5545	0.5442	0.4960	0.5106	0.5663	0.5528	0.5011	0.5078
<i>p000</i>	0.6406	0.6457	0.6544	0.6466	0.6683	0.6482	0.7008	0.7005
<i>p010</i>	0.5337	0.5308	0.4608	0.4797	0.5175	0.5008	0.4753	0.4695
<i>p100</i>	0.6899	0.6899	0.6992	0.6976	0.6816	0.6733	0.7227	0.7275
<i>p110</i>	0.5791	0.5614	0.5323	0.5414	0.6304	0.6185	0.5264	0.5462
<i>p0000</i>	0.6502	0.6550	0.6600	0.6551	0.6681	0.6369	0.9529	0.9521
<i>p0010</i>	0.5275	0.5144	0.4638	0.4875	0.4882	0.4765	0.4763	0.4687
<i>p0100</i>	0.7128	0.7088	0.6886	0.6907	0.6794	0.6874	0.7534	0.7450
<i>p0110</i>	0.6154	0.5921	0.5019	0.5124	0.6275	0.6287	0.4958	0.5133
<i>p1000</i>	0.6309	0.6275	0.6460	0.6313	0.6648	0.6683	0.6778	0.6817
<i>p1010</i>	0.5494	0.5707	0.4452	0.4599	0.5854	0.5530	0.4640	0.4696
<i>p1100</i>	0.6612	0.6685	0.7088	0.7036	0.6883	0.6595	0.6966	0.7131
<i>p1110</i>	0.5222	0.5235	0.5677	0.5745	0.6434	0.6039	0.5613	0.5841

BIBLIOGRAPHIE

Awadallah, A. G., Rousselle, J., et Leconte, R. (1999). Évolution du risque hydrologique sur la rivière Châteauguay,. *Revue Canadienne de Génie Civil*, 26(4), 510-523.

Bailey, N. T. J. (1964). *The Elements of Stochastic Processes*. New York: Wiley.

Baillargeon, G. (1990). *Méthodes statistiques de l'ingénieur* (Vol. 1).

Bisson, J. L., et Roberge, F. (1983). Prédiction des apports naturels: Expérience d'Hydro-Québec. *Compte-rendu de l'Atelier sur la prévision du débit*.

Cunnane, C. (1978). Unbiased plotting positions - a review. *Journal of Hydrology*, 37, 205-222.

Environnement Canada. *Relevés hydrologiques* [En ligne]. <http://www.wsc.ec.gc.ca/statflo/>, (Consulté en octobre 2005).

Gabriel, R., et Neumann, J. (1962). A Markov Chain Model for Daily Rainfall Occurrence in Tel Aviv, Israel. *Q.J.R.Met.Soc.*, 88, 90-95.

Hayhoe, H. N. (2000). Improvements of stochastic weather data generator for diverse climates. *Climate Research*, 14, 75-87.

Johnson, et al. (1996). Stochastic Weather Simulation: Overview and Analysis of Two Commonly Used Models. *Journal of applied meteorology*, 35, 1878-1896.

Johnson, G. L., Hanson, C. L., Hardegree, S. P., & Ballard, E. B. (1995). Stochastic Weather Simulation: Overview and Analysis of Two Commonly Used Models. *Journal of applied meteorology*, 35, 1878-1896.

Khalili, M., Leconte, R., et Brissette, F. (2004). Génération multisite des données de précipitations du bassin versant de la rivière Péribonka à des fins de génération des scénarios de changements climatiques.

Lapointe, D. (1980). Eaux de surface, bassin versant de la rivière Châteauguay Nord. *Programme de connaissances intégrées, E.F.-1, Québec, Qué.: Ministère des Richesses Naturelles, Direction des eaux*, 78 p.

Mareuil, A. (2005). *Impacts des changements climatiques sur les crues extrêmes des rivières*, École de technologie supérieure, Montréal, 122 p.

National Climatic Data Center [En ligne]. <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/ncdc>, (Consulté en mars 2005).

Qian, B., et al. (2002). Multisite stochastic weather models for impacts studies. *International Journal of Climatology*, 22, 1377-1397.

Qian, B., Gameda, S., Hayhoe, H., De Jong, R., et Bootsma, A. (2004). Comparison of Lars-WG and AAFC-WG stochastic weather generators for diverse Canadian climates. *Climate Research*, 26, 175-191.

Racsko, P., Szeidl, L., et Semenov, M. (1991a). A serial approach to local stochastic weather models. *Ecol Model*, 57, 27-41.

Racsko, P., Szeidl, L., et Semenov, M. (1991b). A serial approach to local stochastic weather models. *Ecol Model*, 57, 27-41.

Richardson, C. W. (1981). Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature and Solar Radiation. *Water Resources Research*, 17(1), 182-190.

Richardson, C. W., et Wright, D. A. (1984). *WGEN: a Model for generating daily weather variables*. Washington, DC: US Department of Agriculture.

Roy, L. (2000). *Évolution du risque hydrologique sur le bassin versant de la rivière Châteauguay*, École de technologie supérieure, Montréal, 170 p.

Semenov, M., Brooks, R. J., Barrow, E. M., et Richardson, C. W. (1998). Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research*, 10(2), 95-109.

Semenov, M. A., et Barrow, E. M. (1997). Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climate Change*, 35, 397-414.

Semenov, M. A., Brooks, R. J., Barrow, E. M., et Richardson, C. W. (1998). Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research*, 10, 95-107.

STARDEX. *Statistical and Regional dynamic Downscaling of Extreme for European regions*, [En ligne]. <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardexStatistical>, (Consulté en août 2004).

Stöckle, C. O., Campbell, G. S., et Nelson, R. (1999). CLIMGEN manual. *Biological Systems Engineering Department, Washington State University*, 28 p.

Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach Toward a Rational Classification of Climate. *The Geographical Review*, 30, 55-94.

Weiss, N. A., et Hasset, M. J. (1991). *Introductory Statistics* (3rd ed.): Addition-Wesley Publishing Company.

Wilby, R. L., Dawson, C. W., et Barrow, E. M. (2002). SDSM - a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17, 147-159.

Wilks, D. S. (1992). Adapting stochastic weather generation algorithms for climate change studies. *Climatic Change*, 22, 67-84.

Wilks, D. S. (1998). Multisite generalization of daily stochastic precipitation generation model. *Journal of Hydrology*, 210(1), 178-192.

Williams, J. R. (1995). *The EPIC model*, In: Singh VP (ed) *Computer models of watershed hydrology*. Littleton, CO: Water Resources Publications.

Zhang, X. C., et Garbrecht, J. D. (2003). Evaluation of CLIGEN precipitation parameters and their implication on WEPP runoff and erosion prediction. *Trans ASAE*, 46, 311-320.