ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE, CONCENTRATION ENVIRONNEMENT
M. Ing.

PAR
SIMARD, Marie-Claude

CARACTÉRISATION DES IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES PLAINES INONDABLES DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CHÂTEAUGUAY

MONTRÉAL, LE 29 AVRIL 2008

© Marie-Claude Simard, 2008

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

François Brissette, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Robert Leconte, codirecteur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Marie-José Nollet, présidente du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Richard Turcotte, membre du jury
Centre d'expertise hydrique du Québec

REMERCIEMENTS

Je désire tout d'abord exprimer ma gratitude envers mon directeur de recherche, François Brissette, Ph. D. et mon co-directeur, Robert Leconte, Ph. D. Vous m'avez fait confiance, malgré le fait que je venais du domaine du génie industriel et que je ne connaissais pratiquement rien en hydrologie. Je vous serai reconnaissante toute ma vie de m'avoir offert cette opportunité. Tout en me laissant autonome, vous avez su m'orienter dans mes recherches et le support financier que vous m'avez accordé m'a permis de me concentrer sur mes études. Vous faites une très belle équipe de professeurs et le plaisir que vous avez à enseigner est palpable.

De nombreuses personnes m'ont aidé au cours de ma recherche. Tout d'abord, je tiens à remercier Diane Chaumont, M. Sc., du consortium Ouranos, qui m'a fourni toutes les données de changement climatique. Le CEHQ, quant à lui, nous a fourni gracieusement le modèle hydraulique de la rivière Châteauguay ainsi qu'un support précieux. Un merci tout spécial à Jean Francoeur, Ing., M. Sc., qui a été une aide irremplaçable et fort appréciée. Marie Minville, étudiante au doctorat au Drame, m'a également énormément aidée. Je te serai toujours reconnaissante de ta patience et de ton éternel sourire qui fait de toi une personne si attachante. Les autres étudiants du Drame, Élizabeth, Benoît, Billy, Sébastien, Mélanie, Malika etc. ont fait que les heures passées au drame, entre quatre murs de béton, ont été très agréables. Un petit mot pour Élizabeth, ma compagne des moments de découragement : on va avoir fini par la finir cette maîtrise!

Je désire exprimer ma reconnaissance envers ma famille qui m'a toujours soutenue dans mes projets. Mon dernier remerciement va à mon conjoint Philippe, qui a été un support moral indéfectible et une aide plus qu'appréciée. Toutes ses années passées à tes côtés m'ont donné la possibilité d'être une meilleure personne. Merci de ton amour, c'est la chose que je chéris le plus dans ma vie.

IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES PLAINES INONDABLES DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CHÂTEAUGUAY

SIMARD, Marie-Claude

RÉSUMÉ

Alors que vient de se terminer la conférence sur les changements climatique de Bali, il devient de plus en plus certain que le réchauffement du climat aura des répercussions sur l'ensemble du globe, tout particulièrement sur les ressources hydriques. La rivière Châteauguay, située au sud-est de Montréal est particulièrement vulnérable aux inondations. En effet, la rivière est sous haute observation particulièrement au printemps, où les crues causent régulièrement des débordements de rivière. Ainsi, cette étude vise à évaluer l'impact des changements climatiques sur les plaines inondables du bassin versant de la rivière Châteauguay. Tout d'abord, une modélisation hydrologique du bassin versant a été effectué à l'aide d'observations relevées entre 1959 et 2003. Par la suite, neufs projections de changement climatique, issues de quatre modèles climatiques, sont utilisées pour perturber le climat présent. L'analyse fréquentielle de crues est utilisée pour comparer les crues printanières et les crues estivales/automnales passées avec celles des différents scénarios issus des séries futures de 2020 et 2080.

En hiver, les modèles prévoient en moyenne pour 2020 des hausses de 1.7°C et de 7% des précipitations. Ces changements se répercutent sur la crue centenaire qui varie de -5% (ECHAM4) à +14% (CGCM3r) par rapport au passé simulé selon les scénarios de la famille A. Pour 2080, les changements s'intensifient avec des hausses de température de 5°C en moyenne et de précipitation de près de 30%. Les modèles sont moins consistants entre eux et les variations de la crue centenaire printanière vont de -87% à +48 %. L'été et l'automne, pour la période centrée sur 2020, les températures et les précipitations changent très peu avec 1.7°C et 3% respectivement. Tous les modèles, sauf le CSIRO, prévoient des diminutions des débits des crues. Le modèle ECHAM4 prévoit la plus forte diminution de la crue centenaire avec -15%. Pour 2080, tous les modèles sans exception prévoient des diminutions des débits de pointe, allant de -30% à -5%. Ces différences entre les réponses des modèles soulignent l'incertitude des modèles de circulation générale (MCG), tout particulièrement pour les études régionales.

Un simulateur hydraulique permet ensuite de convertir les débits de pointe de crue obtenus à l'aide de la modélisation hydrologique, en niveau d'eau. Deux scénarios sont utilisés pour cartographier un tronçon de la rivière et évaluer l'impact des changements climatiques sur les plaines inondables de la rivière pour les crues printanières de 20 et 100 ans. Ces deux cartographies mettent en lumière que les résultats pour 2080 sont très incertains et qu'il n'est pas possible de conclure actuellement sur l'impact des changements climatiques sur les plaines inondables du bassin versant. L'utilisation de techniques de mise à l'échelle, soit statistique ou dynamique, pourraient augmenter la confiance que l'on accorde aux projections de changements climatiques pour le bassin versant de la rivière Châteauguay.

CLIMATE CHANGE IMPACTS ON THE FLOODPLAIN OF THE CHÂTEAUGUAY RIVER BASIN

SIMARD, Marie-Claude

ABSTRACT

While the Bali conference for the climate changes just closed, it becomes more and more clear that the reheating of the climate will have repercussions on the whole globe, quite particularly on the hydrological resources. The Châteauguay river, situated in the southeast of Montreal is particularly vulnerable to the floods. Indeed, the river is under high observation particularly in the spring, when the floods cause regularly overflowing of the river. This study aims to estimate the impact of climate change on the floodplains of the Châteauguay river basin. First of all, a hydrological modelling of the river basin was made with observations taken between 1959 and 2003. Afterward, nine projections of climate change, coming from four climate models, are used to perturb the present climate. The frequency analysis of floods is used to compare the past spring and summer / autumnal floods with those of the various scenarios stemming from future series of 2020 and 2080.

In winter, the models forecast for 2020 an average temperature increase of 1.7°C and 7 % for the precipitation. These changes echo on the 100 years spring floods which varies of -5% (ECHAM4) to +13 % (CGCM3r) in regard with the currently observed, for the scenarios of the A family. For 2080, the changes intensified with an average temperature increase of 5°C and the precipitation increased for about 30 %. The models are less coherent between them and the variations of the 100 years spring floods range from -87 % to +48 %. The summer and the autumn, for the period centred on 2020, the temperatures and the precipitation change little with 1.7°C and 3 % respectively. All the models, except the CSIRO, forecast decreases in discharge of the floods. The model ECHAM4 simulated the strongest decrease of 15% for the 100 years floods. For 2080, all the models without exception modelled decreases of the peak flows, going from -30% to -5 %. These differences between the predictions of the models underline the uncertainty linked to the global climate models, quite particularly for the regional studies.

A hydraulic simulator allows converting the peak flows, obtained with the hydrological modelling, in water level. Two scenarios are used to map a section of the river and estimate the impact of climate changes on the floodplains of the river for the spring floods of 20 and 100 years. These two maps bring to light that the results for 2080 are very uncertain and that it is not possible to conclude on the impact of the climate change on the floodplains of the Châteauguay river basin.

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE 4
1.1 Modélisation hydrologique 4
1.1.1 Cycle hydrologique 4
1.1.2 Classification des modèles hydrologiques 6
1.2 Science du changement climatique 7
1.2.1 Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat 9
1.2.2 Les modèles de circulation générale 10
1.2.3 Scénarios de changement climatique 11
1.2.4 Méthodes de mise à l'échelle des scénarios 13
1.3 Inondations, changements climatiques et évènements extrêmes 14

CHAPITRE 2 BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CHÂTEAUGUAY 16
2.1 Description du territoire 16
2.2 Problématique des inondations sur la rivière Châteauguay 19
2.3 Données hydroclimatiques 21
2.3.1 Stations météorologiques et hydrométriques retenues 21
2.3.2 Préparation d'une météorologie à l'échelle du bassin 22
2.3.3 Choix des périodes de calage et de validation 24

CHAPITRE 3 MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DES CRUES PRINTANIÈRES ET ESTIVALES/AUTOMNALES '1959-2003' 25
3.1 Objectifs de la modélisation 25
3.2 Analyse fréquentielle des crues passées 26
3.2.1 Principes 26
3.2.2 Échantillonnage et conditions préalables 27
3.2.3 Ajustement à une loi de probabilité 30
3.2.3.1 Crues printanières 30
3.2.3.2 Crues estivales et automnales 33
3.2.4 Vérification de l'adéquation 35
3.2.4.1 Crues printanières 35
3.2.4.2 Crues estivales et automnales 35
3.3 Modélisation avec HSAMI 36
3.3.1 Description du modèle 36
3.3.2 Calage du modèle 38
3.4 Comparaison du passé observé et simulé 40
3.4.1 Crues printanières 41
3.4.2 Crues estivales et automnales 42

CHAPITRE 4 SIMULATIONS FUTURES POUR LES PÉRIODES 2020 ET 2080 44
4.1 Préparation du climat futur 44
4.1.1 Choix des MCG 44
4.1.2 Région de référence 47
4.1.3 Sélection des scénarios et moyenne d'ensemble 49
4.1.4 Méthode des deltas 50
4.1.4.1 Température 50
4.1.4.2 Précipitation 51
4.2 Résultats des simulations futures 53
4.2.1 Crues printanières 53
4.2.2 Crues estivales et automnales 59

CHAPITRE 5 MODÉLISATION HYDRAULIQUE ET CARTOGRAPHIE 65
5.1 Description du modèle hydraulique 65
5.2 Section à l'étude 67
5.3 Résultats de la modélisation hydraulique des débits simulés 69
5.4 Scénarios de changements climatiques sélectionnés 71
5.5 Résultats de la modélisation hydraulique des débits futurs 72
5.5.1 Projection CGCM3r A1Bx 72
5.5.2 Projection ECHAM4 A2 74
5.6 Cartographie des plaines inondable 76
5.6.1 Passé simulé 78
5.6.2 GCM3r A1bx 79
5.6.3 ECHAM4 A2 80

CHAPITRE 6 DISCUSSION ET ANALYSE CRITIQUE DE LA MÉTHODE 81
6.1 Génération de la météorologie à l'échelle du bassin 81
6.2 Modélisation hydrologique '1959-2003' 82
6.3 Génération des séries climatiques futures 83
6.4 Simulation future '2020-2080' 86
6.5 Modélisation hydraulique et cartographie 87

CONCLUSION 90

ANNEXE I Patrons de distribution de la variable température maximale utilisés pour la génération de la météorologie à l'échelle du bassin-versant 93

ANNEXE II Simulations futures des crues printanières et estivales/automnales pour 2020 et 2080 pour la famille de scénarios B 95

ANNEXE III Courbe de tarage du modèle hydraulique 103

ANNEXE IV Hauteurs d'eau générées par les crues de 20 et 100 ans aux section 15, 26 et 32 du modèle hydraulique 104

LISTE DE RÉFÉRENCES 106

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 2.1 Stations météorologiques retenues dans le cadre de l'étude 22

Tableau 3.1 Résultats de l'analyse fréquentielle des crues printanières 32

Tableau 3.2 Résultats de l'analyse fréquentielle des crues estivales/automnales 34

Tableau 3.3 Valeurs des 23 paramètres modifiés manuellement pour les calibrations du printemps et de l'été/automne et valeur des paramètres initiaux 40

Tableau 3.4 Écart entre les analyses fréquentielles des données observées et simulées pour les crues printanières 42

Tableau 3.5 Écart entre les analyses fréquentielles des données observées et simulées pour les crues estivales et automnales 43

Tableau 4.1 GCM et scénarios SRES retenus pour l'étude du climat futur 45

Tableau 4.2 Analyse fréquentielle des débits de pointe simulés pour les crues printanières en 2020 pour les scénarios de la famille A 55

Tableau 4.3 Analyse fréquentielle des débits de pointe simulés pour les crues printanières en 2080 pour les scénarios de la famille A 58

Tableau 4.4 Analyse fréquentielle des débits de pointe simulés pour les crues estivales et automnales en 2020 pour les scénarios de la famille A 61

Tableau 4.5 Analyse fréquentielle des débits de pointe simulés pour les crues estivales et automnales en 2080 pour les scénarios de la famille A 63

Tableau 5.1 Débits observés et simulés transposés à Ste-Martine pour les crues de 20 ans et 100 ans 69

Tableau 5.2 Résumé de l'analyse hydraulique pour les débits simulés des périodes de récurrence 20 et 100 ans 71

Tableau 5.3 Débits observés et simulés transposés à Ste-Martine pour les crues de 20 ans et 100 ans pour la période 2080 72

Tableau 5.4 Écarts entre les débits des périodes de récurrence 20 et 100 ans du CGCM3 A1Bx pour la période 2100 et le passé simulé. 74

Tableau 5.5 Résumé de l'analyse hydraulique pour les débits des périodes de récurrence 20 et 100 ans de ECHAM4 A2 pour la période 2100 76

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1 Cycle hydrologique. 5

Figure 1.2 Concentration atmosphérique des principaux GES 7

Figure 1.3 Différences observées de la température de surface, du niveau de la mer et de la couverture de neige dans l'hémisphère Nord par rapport à la période 1961-1990 8

Figure 1.4 Composition et mode de fonctionnement du GIEC. 9

Figure 1.5 Représentation schématique des familles de scénarios du SRES. 12

Figure 1.6 Évolution de la température moyenne mondiale pour les six scénarios indicatifs SRES. 13

Figure 1.7 Changement des débits fluviaux, en pourcentage. 15

Figure 2.1 Situation géographique du bassin versant de la rivière Châteauguay. 18

Figure 2.2 Profil d'altitudse de la rivière Châteauguay. 20

Figure 3.1 Courbe chronologique des débits des crues printanières observées 28

Figure 3.2 Courbe chronologique des débits des crues estivales et automnales observées. 28

Figure 3.3 Acceptation du test de Kendall. 29

Figure 3.4 Analyse fréquentielle des crues printanières observées de la rivière Châteauguay (1959-2003). 32

Figure 3.5 Analyse fréquentielle des crues estivales/automnales observées de la rivière Châteauguay (1959-2003). 34

Figure 3.6 Schéma conceptuel de l'algorithme de simulation du modèle HSAMI. 38

Figure 3.7 Analyse fréquentielle des crues printanières simulées de la rivière Châteauguay (1959-2003). 41

Figure 3.8 Analyse fréquentielle des crues estivales et automnales simulées de la rivière Châteauguay (1959-2003). 43

Figure 4.1 Diagramme de dispersion des changements de précipitation et de température moyenne pour le bassin versant de la rivière Châteauguay pour 2020. 46

Figure 4.2 Diagramme de dispersion des changements de précipitation et de température moyenne pour le bassin versant de la rivière Châteauguay pour 2080. 47

Figure 4.3 Grille des MCG sélectionnés et région de référence..... 48

Figure 4.4 Moyenne d'ensemble de la température maximale annuelle et des précipitations annuelles pour le modèle HadCM3 pour la période 2020..... 50

Figure 4.5 Répartition pluie/neige en fonction de la température de l'air à 2 m du sol et de l'humidité relative de l'air. 52

Figure 4.6 Diagramme de dispersion des deltas des différents scénarios pour le printemps (janvier à mai) 2020. 54

Figure 4.7 Hydrogrammes moyens des données simulées pour les crues printanières en 2020 pour les scénarios de la famille A..... 56

Figure 4.8 Diagramme de dispersion des deltas des différents scénarios pour le printemps (janvier à mai) 2080. 57

Figure 4.9 Hydrogrammes moyens des données simulées pour les crues printanières en 2080 pour les scénarios de la famille A..... 59

Figure 4.10 Diagramme de dispersion des deltas des différents scénarios pour l'été et l'automne (juin à novembre) 2020. 60

Figure 4.11 Hydrogrammes moyens des données simulées pour les crues estivales et automnales en 2020 pour les scénarios de la famille A. 61

Figure 4.12 Diagramme de dispersion des deltas des différents scénarios pour l'été et l'automne (juin à novembre) 2080. 62

Figure 4.13 Hydrogrammes moyens des données simulées pour les crues estivales et automnales en 2080 pour les scénarios de la famille A. 64

Figure 5.1 Secteur de la rivière utilisé pour l'étude hydraulique. 68

Figure 5.2 Graphique de la hauteur d'eau et de la profondeur critique générées par les débit de 20 et 100 ans, tel que simulés par HSAMI. 70

Figure 5.3 Graphique de la hauteur d'eau et de la profondeur critique générées par les débits du scénario CGCM3r A1Bx pour les crues de 20 et 100 ans. 73

Figure 5.4 Graphique de la hauteur d'eau et de la profondeur critique générées par les débits du scénario ECHAM4 A2 pour les crues de 20 et 100 ans pour la période 2080..... 75

Figure 5.5 Cartographie des plaines inondables pour les débits simulés de 20 et 100 ans. 78

Figure 5.6 Cartographie des plaines inondables pour les débits futurs de 20 et 100 ans du CGCM3 A1x..... 79

Figure 5.7 Cartographie des plaines inondables pour les débits futurs de 20 et 100 ans de ECHAM4 A2. 80

Figure 6.1 Comparaison pour le Québec entre un MCG et un MRC pour : a) leur masque Terre-mer, b) la topographie. 85

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

APDA	Arctic Precipitation Data Archive
CEHQ	Centre d'expertise hydrique du Québec
CMP	Crue maximale probable
CO_2	Dioxyde de carbone
Env Can	Environnement Canada
ETP	Évapotranspiration Potentielle
GCM	Global Climate Model
GES	Gaz à effet de serre
GEV	Loi des Extrêmes Généralisés
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
HEC	Hydrologic Engineering Eenter
IREQ	Institut de recherche en énergie du Québec
MCG	Modèles de circulation générale
MDT	Modèle numérique de terrain
MRC	Modèles régionaux de climat
MRCC	Modèle régional du climat canadien
NCDC	National Climatic Data Denter
OMM	Organisation Météorologique Mondiale
PNUE	Programme des Nations Unies pour l'Environnement
RAS	River Analysis System
SRES	Special Report on Emission Scenarios

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Longueur

mm	Millimètre
cm	Centimètre
m	Mètre
km	Kilomètre

Aire

km^2	Kilomètre carré (= 1 000 000 m^2)

Temps

s	Seconde (unité de temps)

Calorifique

°C	Degré Celcius (unité de température)

Volume

m^3	Mètre cube

Vitesse

m/s	Mètre par seconde

Débit

m^3/s	Mètre cube par seconde

INTRODUCTION

Un large consensus scientifique est maintenant établi en ce qui a trait aux changements climatiques. En effet, le dernier rapport du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a établi clairement que les activités anthropiques ont une incidence sur l'évolution du climat (IPCC, 2007). La problématique n'est pas simple, car le changement climatique se produit à l'échelle du globe, sur une longue période (jusqu'à plusieurs siècles) et fait intervenir des interactions complexes entre des processus climatiques, environnementaux, économiques, politiques, institutionnels, sociaux et techniques. La Terre est un système complexe et dynamique et les êtres humains ne peuvent prétendre qu'à une très mince compréhension de tous les tenants et aboutissants de ce système. Tout indique que les impacts sur le régime hydrologique pourront s'avérer critiques et demanderont des modifications tant au niveau de la gestion de la ressource hydrique que dans la conception d'ouvrages d'ingénierie. Une meilleure connaissance des impacts potentiels permettra donc de prendre aujourd'hui des décisions éclairées qui auront des conséquences sur plusieurs dizaines d'années.

Les coûts engendrés par les dommages dus aux événements climatiques ne cessent de croître (Brooks *et al.*, 2001), que ce soit pour le simple citoyen, en passant par les compagnies d'assurance qui voient les indemnisations augmenter, que pour les différentes instances publiques. De plus, Stern publiait en 2006 (Stern, 2006) une étude économique où il chiffrait à 7000 milliards de dollars le coût global engendré par les changements climatiques si aucune action n'était prise. Ce montant pourrait être grandement diminué et évalué à 1% du produit intérieur brut annuel de chaque pays si des mesures efficaces étaient prises pour aider l'adaptation. Les répercussions prévues du changement climatique sur les ressources hydriques et les activités socio-économiques du Québec seront potentiellement considérables. En effet, les ressources hydriques sont un pilier de l'économie québécoise du fait de l'importance de la production hydroélectrique et de son faible coût de production. Déjà, les inondations affectent une majorité de municipalités riveraines et génèrent des coûts de 10 à 15 millions de dollars pour les indemnisations par année aux Québécois, d'où

l'importance d'appréhender et de quantifier les impacts de ces changements et de planifier une adaptation pour les minimiser ou même en tirer profit. La modélisation, malgré ses incertitudes, reste un des seuls moyens d'appréhender le futur et de pouvoir s'y préparer adéquatement.

Ce mémoire vise à évaluer l'impact des changements climatiques sur les plaines inondables du bassin versant de la rivière Châteauguay (2543 km²) au Québec. Tout d'abord, le calcul de la genèse des crues est effectué à l'aide du modèle hydrologique HSAMI (Fortin, 2000), développé à Hydro-Québec. Le modèle est calé et validé en continu en utilisant une météorologie moyenne provenant d'observations météorologiques relevées sur plusieurs stations du bassin et en proximité du bassin entre 1959 et 2003. Le modèle est calé pour deux types de crues, soit les crues printanières et les crues survenant en période estivale et automnale. L'analyse fréquentielle de crue a été utilisée comme outil principal pour juger de la qualité des simulations. Par la suite, neuf projections de changement climatique issues de quatre modèles de circulation générale (MCG) ont été utilisées pour obtenir des séries futures. Les périodes centrées sur 2020 et 2080 ont été étudiées. Des analyses fréquentielles sont faites à nouveau afin de comparer les projections futures au passé simulé. Les débits de pointe de crue obtenus à l'aide de la modélisation hydrologique sont ensuite convertis en niveaux d'eau à l'aide du modèle hydraulique HEC-RAS. L'analyse hydraulique porte sur un tronçon de 6 km situé en amont de Ste-Martine. Finalement, deux scénarios engendrant des résultats très différents sont utilisés pour générer une cartographie des plaines inondables.

Le rapport est divisé en six chapitres. Tout d'abord, une revue de littérature traite des différents thèmes abordés dans ce travail. En premier lieu, le cycle hydrologique est abordé, puis une revue des connaissances sur la modélisation est faite. Une synthèse des connaissances sur les changements climatiques et sur la modélisation climatique est ensuite présentée. Le lien entre les inondations, les changements climatiques et les événements extrêmes vient conclure la revue de littérature. Le deuxième chapitre présente le bassin versant de la rivière Châteauguay. Une description du territoire, la problématique des

inondations sur le bassin versant ainsi que les données météorologiques et hydrométriques y sont présentées. La méthodologie pour la génération d'une météorologie moyenne à l'échelle du bassin y est également abordée. Le chapitre trois présente les différentes étapes de calage et de validation du modèle hydrologique. Par la suite, les résultats des analyses de fréquences des crues printanières et des crues estivales et automnales sont exposés ainsi qu'une comparaison entre les données simulées par le modèle et les observations. Le chapitre quatre présente premièrement la méthodologie sélectionnée pour l'obtention des projections futures. Deuxièmement, les résultats des analyses fréquentielles des différentes projections sont présentés pour les périodes centrées sur 2020 et 2080. Le chapitre 5 aborde la modélisation hydraulique du tronçon de Ste-Martine ainsi que les deux scénarios utilisés pour produire une cartographie des plaines inondables. Le chapitre 6 propose une discussion sur les résultats ainsi qu'une analyse critique de la méthode en exposant les différentes sources d'incertitudes du projet. La conclusion souligne les principaux résultats de l'étude et propose des recommandations.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Modélisation hydrologique

Penman (1961) a défini l'hydrologie comme étant la science qui cherche à comprendre ce qu'il advient de la précipitation. La modélisation hydrologique est donc employée pour comprendre les interactions dynamiques entre le climat et l'hydrologie de surface (Singh et Woolhiser, 2002). Les applications de la modélisation hydrologique sont nombreuses : gestion de plaines inondables, système de prévision des crues, dimensionnement d'ouvrages hydrauliques, l'optimisation de la production hydro-électrique etc. La section suivante présente les éléments particuliers à la modélisation hydrologique.

1.1.1 Cycle hydrologique

Le cycle de l'eau est un concept qui englobe tous les phénomènes du mouvement et du renouvellement des eaux sur Terre. L'eau, élément essentiel à la vie, se présente sous trois formes : liquide, solide ou gazeuse. Ces trois états sont présents simultanément dans l'atmosphère et le changement d'un état à un autre, ainsi que le transport de l'eau et son emmagasinement, constituent la base du cycle hydrologique. Le cycle de l'eau est un processus dynamique et la circulation de l'eau entre l'atmosphère et la Terre est alimentée, en tout premier lieu, par l'énergie du Soleil. En effet, «le rayonnement solaire, par son apport énergétique assure le maintien du mouvement de l'eau conjointement avec l'accélération gravitationnelle» (Anctil *et al.*, 2005). D'autres sources d'énergie entretiennent ce mouvement : l'attraction lunaire, les activités biologiques, les forces intermoléculaires, etc.

Sous l'effet du rayonnement solaire l'eau s'évapore des océans, du sol et des eaux de surface. Cet air humide se déplace librement suivant les mouvements des masses d'air qui sont dus à des phénomènes de convection et d'advection. Avec des conditions de

condensation favorables, les nuages ainsi formés restituent l'eau emmagasinée aux océans et aux continents. Lorsque l'eau de la pluie n'est pas interceptée par les végétaux, elle peut soit s'infiltrer dans le sol par percolation jusqu'à la nappe souterraine, s'évaporer, ruisseler ou être emmagasinée temporairement à la surface sous forme de neige ou de glace. L'eau peut également être emmagasinée provisoirement dans le sol sous forme sa forme liquide (humidité dans le sol) disponible pour les racines des plantes. Les végétaux restituent à l'atmosphère une partie de cette eau absorbée via la transpiration. La figure 1.1 illustre le cycle hydrologique.

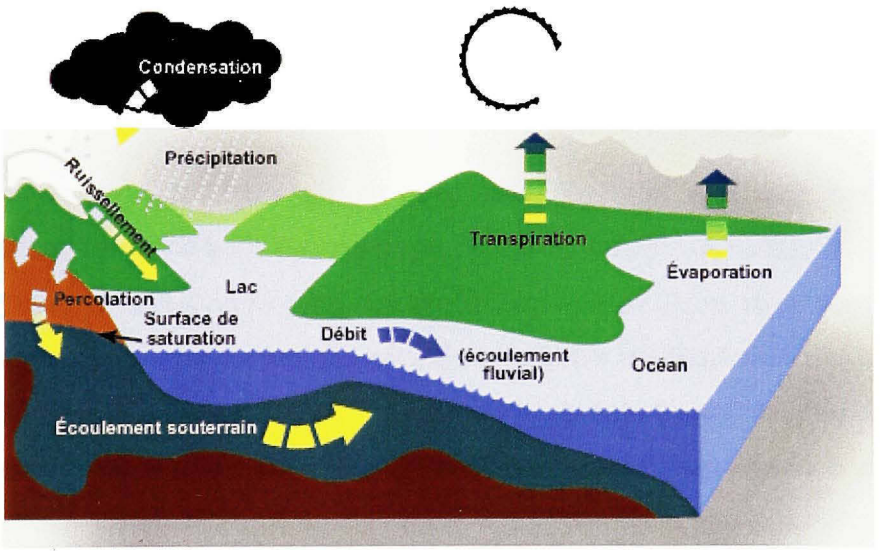


Figure 1.1 ***Cycle hydrologique.***
(Tiré d'Environnement Canada, 2004)

Le cycle hydrologique est caractérisé par l'interdépendance de toutes ses composantes, par sa stabilité et par son équilibre dynamique (Musy, 2005). C'est donc dire qu'en influençant une partie du cycle hydrologique c'est tout le processus qui est perturbé. Les perturbations anthropiques du cycle hydrologique sont nombreuses : construction de barrages et de réservoirs, utilisation et transport de l'eau pour des fins industrielles, irrigation, drainage, urbanisation etc. Les changements climatiques influencent également le cycle hydrologique (IPCC, 2007) et celui-ci module le climat de manière fondamentale via une multitude d'interactions complexes (Peixoto et Oort, 1992; Music et Caya, 2007).

1.1.2 Classification des modèles hydrologiques

On distingue deux grands types de modèles hydrologiques : les modèles probabilistes et déterministes. Les modèles probabilistes donnent un portrait statistique de la réponse du bassin versant via la probabilité d'occurrence des valeurs des variables étudiées (Unesco-OMM, 1992). L'ordre dans lequel ces valeurs surviennent dans le temps n'est pas important. Les modèles probabilistes se subdivisent en modèles statistiques et en modèles stochastiques. Les modèles statistiques utilisent des variables statistiquement indépendantes alors que les modèles stochastiques se basent sur l'analyse de données statistiquement dépendantes. Aucune connaissance de la physique des phénomènes n'est directement utilisée pour bâtir de tels modèles, mais plus la série chronologique utilisée pour l'analyse est longue plus les modèles probabilistes sont robustes.

Les modèles déterministes, dits conceptuels, sont des représentations mathématiques simplifiées des éléments du cycle hydrologique (Singh et Woolhiser, 2002). En général, les modèles conceptuels sont conçus pour des applications particulières et ne contiennent pas tous les éléments du cycle hydrologique, ce qui se répercute sur l'architecture et la structure du modèle (Singh et Woolhiser, 2002). Les modèles conceptuels peuvent être classés selon leur discrétisation temporelle. En effet, les modèles événementiels visent à reproduire la réponse du bassin versant en terme de débits lors d'un évènement pluvieux et nécessitent de préciser l'état initial du bassin. Les modèles en continu permettent de suivre l'évolution des variables étudiées sur une longue période de temps et intègrent d'avantage d'éléments du cycle hydrologique (Leconte, 1999). La représentation spatiale du bassin dans le modèle distingue également les modèles déterministes entre eux. Les modèles globaux considèrent le bassin versant comme une entité unique et ne tiennent pas compte de l'hétérogénéité du bassin. À l'inverse, les modèles distribués prennent en compte la variabilité spatiale des processus et des caractéristiques du bassin versant. Le découpage spatial peut être fait en sous bassins homogènes ou en un maillage régulier ou quelconque.

1.2 Science du changement climatique

L'Organisation météorologique mondiale (OMM) a défini le climat comme étant l'ensemble des paramètres statistiques de la distribution des variables météorologiques sur une période de 30 ans. Le climat est un facteur clé dans la détermination des caractéristiques des systèmes naturels et gérés (Rosenzweig *et al.*, 2007) et son influence se fait sentir sur les processus hydrologiques qui sont directement tributaires des températures et des précipitations. Au fil du temps, les connaissances sur les changements climatiques et la confiance en celles-ci deviennent de plus en plus grandes et mettent en évidence que les activités humaines ont bel et bien un impact sur le climat mondial (IPCC, 2007). La production massive de gaz à effet de serre (GES) et d'aérosols due à l'industrialisation des pays est identifiée comme responsable. Le dioxyde de carbone (CO_2) de source anthropique est le GES qui est produit en plus grande quantité. En effet, les émissions mondiales de CO_2 ont augmenté de 80% entre 1970 et 2004 (IPCC, 2007) tel que l'indique la figure 1.2.

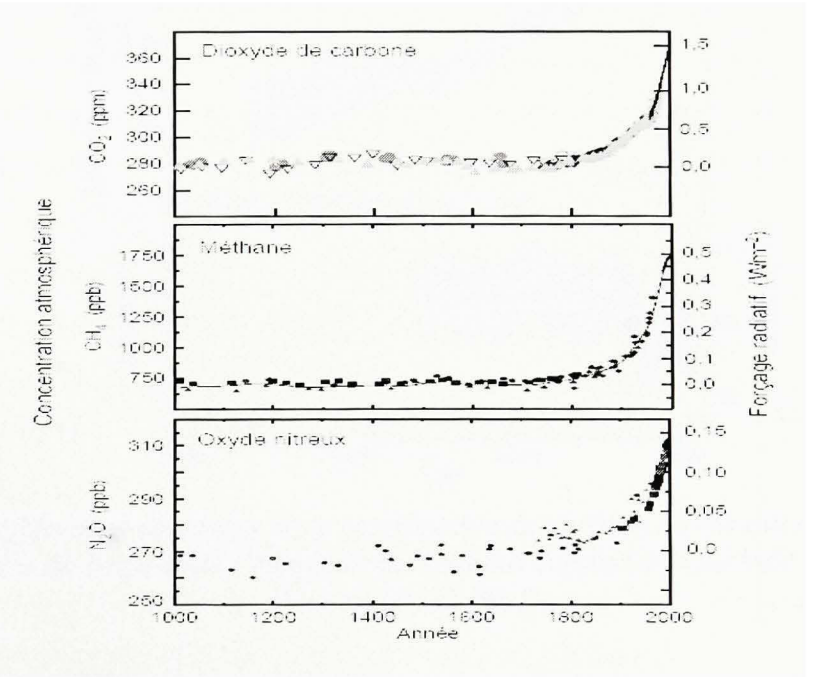


Figure 1.2 ***Concentration atmosphérique des principaux GES.***
(Tiré de GIEC, 2001)

Cette élévation des concentrations des GES et des aérosols a un impact direct sur la température de la terre (IPCC, 2007). En effet, entre 1906 et 2005, la moyenne de la température mondiale s'est élevée de 0.74°C et le réchauffement est particulièrement marqué dans l'hémisphère Nord (figure 1.3) (IPCC, 2007). L'élévation du niveau de la mer, consistante avec l'augmentation des températures, a progressé à un taux de 1.8 mm/an depuis 1961 et s'est accélérée depuis les années 90 avec une progression de 3.1 mm/an depuis 1993 (IPCC, 2007).

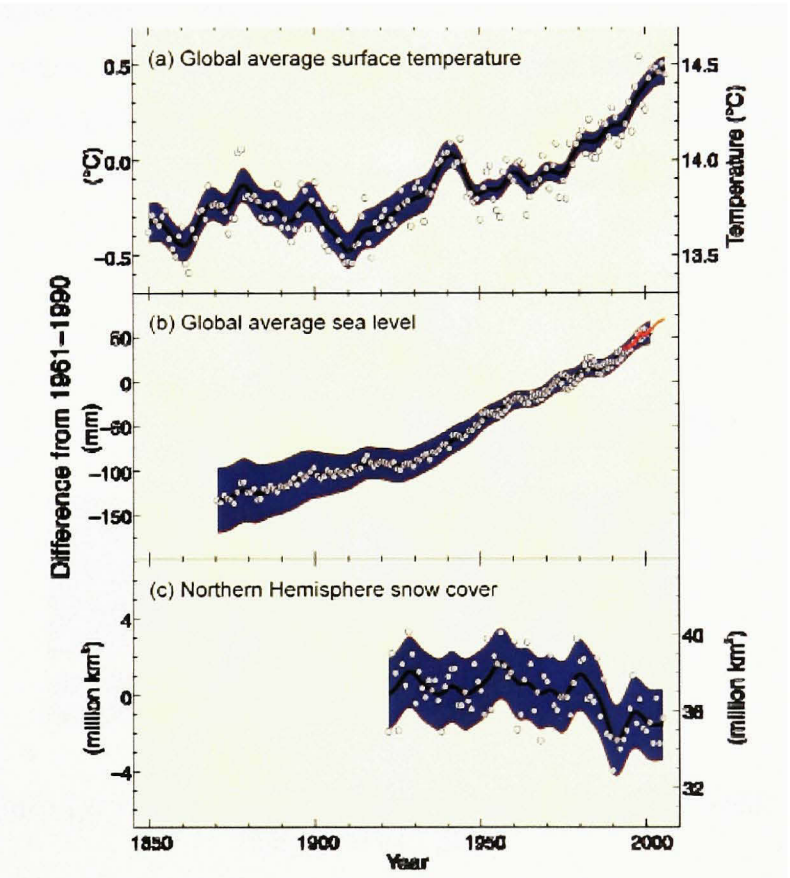


Figure 1.3 ***Différences observées de la température de surface, du niveau de la mer et de la couverture de neige dans l'hémisphère Nord par rapport à la période*** **1961-1990.**
(Tiré de IPCC, 2007)

1.2.1 Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat

C'est lors de la première Conférence mondiale sur le climat en février 1979 que les premières préoccupations quant aux changements climatiques dus aux activités humaines surgissent au sein de la communauté scientifique internationale. Créé en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) conjointement avec le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE), le GIEC a pour mission de fournir des rapports de synthèse clairs et objectifs sur l'état des connaissances scientifiques sur le changement climatique. Ses évaluations sont principalement fondées sur des publications scientifiques et techniques dont la valeur scientifique est reconnue. Le GIEC se compose de quatre groupes de travail dont l'organisation est montrée à la figure 1.4.

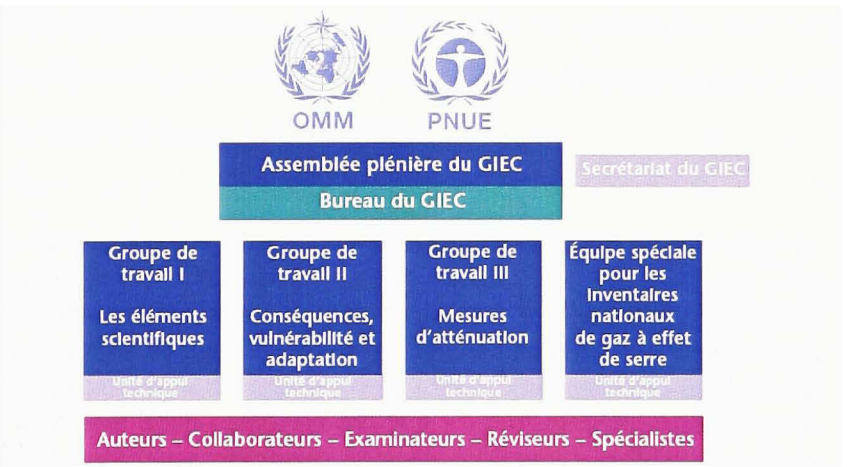


Figure 1.4 ***Composition et mode de fonctionnement du GIEC.***
(Tiré de IPCC, 2007)

Jusqu'à aujourd'hui le GIEC a élaboré quatre rapports de synthèse (1990, 1995, 2001, 2007) portant sur les changements climatiques et leurs répercussions et il a été un élément moteur lors des discussions qui ont abouti sur le protocole de Kyoto en 1997.

1.2.2 Les modèles de circulation générale

Dès 1920, un chercheur anglais tente de résoudre numériquement les équations de la mécanique des fluides pour prévoir les conditions atmosphériques aux six heures. Les résultats furent décevants dû au manque de moyens de calcul appropriés et il faudra attendre l'apparition des ordinateurs, dans les années 50, pour qu'il y ait une évolution marquée dans le domaine de la modélisation climatique. Le développement des MCG se généralise vers le début des années 80.

La modélisation climatique constitue le principal outil de travail qui permet d'anticiper les caractéristiques et l'ampleur des changements climatiques ainsi que leur répercussion (IPCC, 2007). En effet, l'utilisation des MCG permet de simuler la circulation atmosphérique à grande échelle et ainsi de reproduire les principales caractéristiques de la distribution et de l'évolution du climat à la surface du globe. Gachon (2000), dans un article de vulgarisation, résume ce que sont les MCG :

> Ils «incorporent la plupart des processus essentiels au maintien de la circulation générale de l'atmosphère. Ils reposent sur des équations mathématiques qui permettent de décrire les processus dynamiques, liés à l'écoulement atmosphérique, et aux processus physiques, liés aux échanges de masse, d'énergie et de quantité de mouvement dans l'atmosphère et à l'interface atmosphère/océan, atmosphère/glace marine et atmosphère/biosphère. Ces équations sont issues des lois fondamentales de la mécanique des fluides et de la thermodynamique, ainsi que de formulations empiriques pour représenter certains processus physiques.» (Gachon, 2000, p.18)

L'augmentation rapide de la puissance de calcul des ordinateurs a permis de réaliser des simulations sur plusieurs décennies et d'utiliser des résolutions horizontales et verticales plus élevées qu'auparavant. Cependant, malgré cette amélioration, la résolution horizontale des MCG reste faible et ne permet pas d'évaluer adéquatement, à partir des sorties brutes des MCG, des processus locaux, notamment les processus hydrologiques (IPCC, 2007). Des méthodes de régionalisation doivent donc être employées pour les

études régionales (*voir* section 1.2.4). Dans le but de mieux représenter les processus de fines échelles sur une région, une approche complémentaire aux MCG a été développée dans les années 80. En effet, les Modèles Régionaux de Climat (MRC) ont une résolution horizontale de 5 à 25 fois plus élevée que celle des MCG, mais ne couvrent qu'une partie du globe. Ces modèles à aire limitée utilisent la même physique que les MCG, mais puisque le domaine d'intégration est réduit ils ont besoin de données à l'extérieur de celui-ci (conditions aux frontières). Ces données sont généralement fournies par des MGC, par des observations ou par des réanalyses. Les MRC peuvent être des outils performants pour les études hydrologiques, mais cela dépend de la capacité du modèle à bien simuler le cycle hydrologique ainsi que de la qualité des données utilisées comme conditions aux frontières du domaine (Music et Caya, 2007).

1.2.3 Scénarios de changement climatique

Le développement rapide des MCG et MRC dans les années 80 est grandement attribuable au besoin d'évaluer l'effet de l'augmentation des GES sur l'évolution du climat pendant le 21^{e} siècle. Pour fins de comparaison des résultats entre les différents modèles, des scénarios de changement climatique ont été développés par le GIEC. En 2000, le GIEC a publié la dernière version du *Special Report on Emission Scenarios* (SRES) qui décrit 40 scénarios d'évolution des concentrations des GES (Nakicenovic *et al.*, 2000).

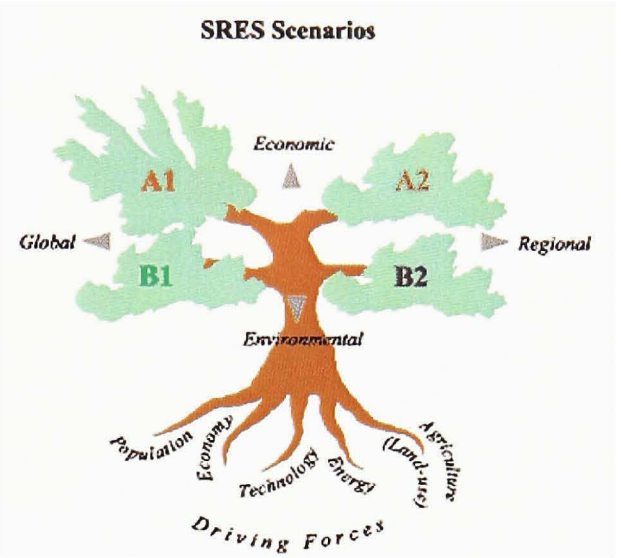


Figure 1.5 ***Représentation schématique des familles de scénarios du SRES.***
(Tiré de Nakicenovic et al., 2000)

Quatre familles se distinguent au sein des 40 scénarios SRES soit : A1, A2, B1 et B2. Chaque scénario représente un futur plausible qui repose sur l'évolution anticipée des conditions démographiques, de la croissance économique, des systèmes énergétiques employés, des changements dans l'occupation du sol et de l'évolution de la technologie (*voir* figure 1.5). Sur les quarante scénarios SRES, six scénarios ont été choisis par le GIEC à titre indicatif. La figure 1.6 présente l'évolution des températures à l'échelle planétaire selon ces six scénarios d'augmentation de concentrations de GES. Comme le démontre la figure 1.6, une large incertitude (zone grise) est associée aux scénarios quant à l'ampleur de l'accroissement de température d'ici 2100, de là l'utilité de sélectionner plusieurs scénarios pour les études d'impacts.

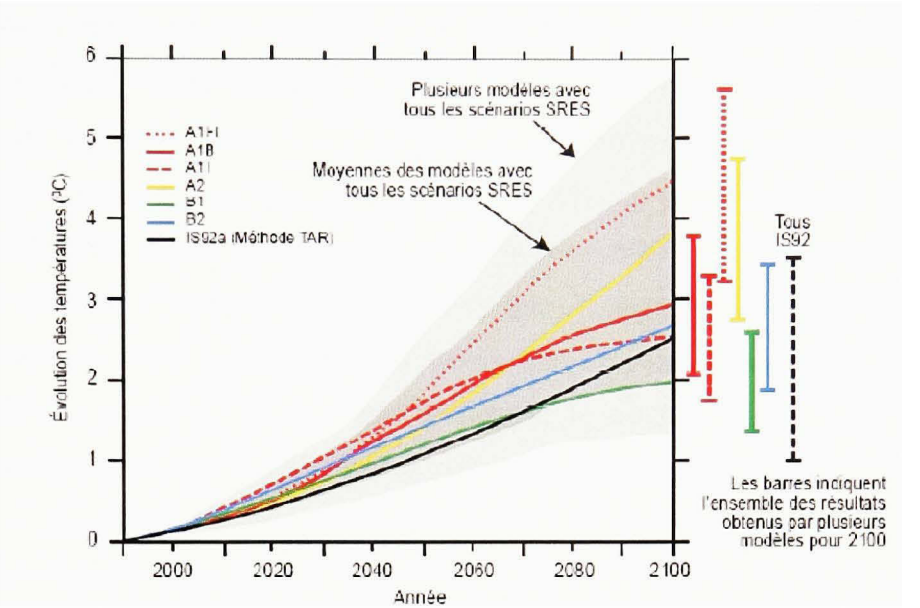


Figure 1.6 ***Évolution de la température moyenne mondiale pour les six scénarios indicatifs SRES.***
(Tiré de GIEC, 2001)

1.2.4 Méthodes de mise à l'échelle des scénarios

La régionalisation des scénarios de changement climatique issus des MCG est un problème prépondérant si on veut atteindre des échelles spatiales compatibles avec les études d'impact qui se font généralement à une échelle locale (Somot, 2005; Barrow *et al.*, 2004). L'idée est donc de construire des modèles capables d'atteindre une résolution plus fine sur la partie du globe que l'on veut étudier, tout en maintenant une bonne représentation des phénomènes à l'échelle globale. Le but de la régionalisation est généralement d'augmenter la confiance des projections (Barrow *et al.*, 2004). Pour ce faire, deux classes de méthodes peuvent être employées : la mise à l'échelle statistique ou la mise à l'échelle dynamique.

La première classe fait appel à des techniques statistiques qui consistent à tenter de relier les variables de grande échelle aux variables climatiques régionales ou locales en déterminant un modèle statistique (générateurs de climat, fonctions de transfert, etc) (Barrow *et al.*, 2004; Planton, 2002). Dans le cadre de cette recherche, la méthode des deltas a été

employée et la méthodologie utilisée est expliquée à la section 4.1.4. La méthode des deltas est une méthode hybride qui utilise l'approche statistique et dynamique. Outre le fait que les méthodes statistiques sont peu coûteuses et relativement faciles à mettre en œuvre, le principal avantage reste qu'elles utilisent des observations existantes à l'échelle régionale ou locale (Planton, 2002). Par contre, elles s'appuient sur la pérennité des liens statistiques entre des variables d'échelles différentes en posant l'hypothèse que les lois de distribution de probabilité du climat présent restent valables dans les conditions climatiques futures. Or cette stabilité n'est pas assurée. La deuxième classe de méthodes, appelées mise à l'échelle dynamique, fait appel aux MRC. Ce type de méthode est très coûteux à mettre en œuvre (Barrow *et al.*, 2004; Planton, 2002), mais il a l'avantage de représenter les variables climatiques et les forçages naturels ou anthropiques à une échelle plus fine (Planton, 2002).

1.3 Inondations, changements climatiques et évènements extrêmes

Depuis près d'une décennie, l'impact des changements climatiques sur l'hydrologie des bassins versant est étudié au niveau mondial. En 2001, Arora et Boer (2001) publiaient une étude sur l'impact des changements climatiques sur le débit annuel de 23 grands bassins fluviaux à travers le monde. Une diminution des débits moyens ainsi que des débits extrêmes annuels est observée de façon générale dans l'hémisphère sud de la planète, alors qu'au nord on note des augmentations qui pourraient atteindre plus de 60%. Ils ont également noté des augmentations significatives pour certains des bassins des latitudes moyennes à élevées et d'importantes baisses pour la plupart des bassins des latitudes moyennes comme le montre la figure 1.7. En 1997, une étude pancanadienne (Bergeron, 1997), fait état des principaux impacts appréhendés. Ainsi, la fonte des neiges serait devancée partout, créant un devancement des crues printanières. Les températures plus clémentes auront également pour effet d'augmenter l'évapotranspiration diminuant du même coup l'humidité au sol et les niveaux des nappes souterraines et des plans d'eau.

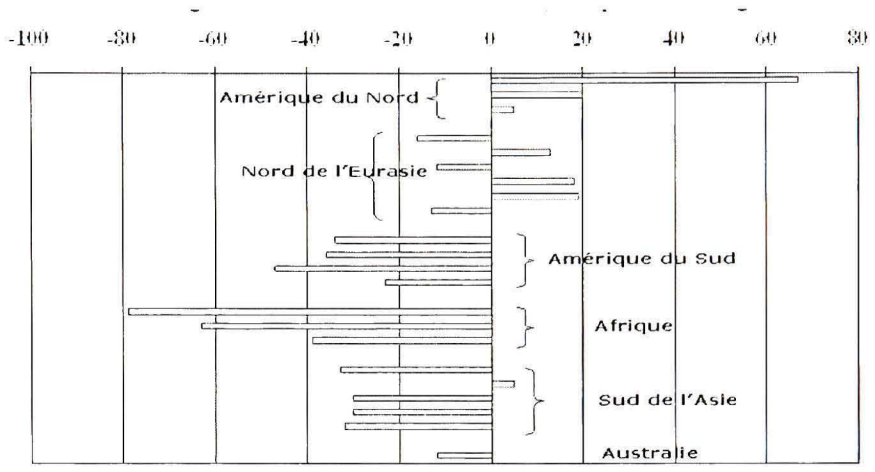


Figure 1.7 ***Changement des débits fluviaux, en pourcentage.***
(Tiré de Arora et Boer, 2001)

La variation des extrêmes climatiques est cependant l'impact le plus important et le plus largement accepté par la communauté scientifique. Nombre d'études ont démontré qu'une modification à la moyenne et à la variabilité des températures du globe entraînera vraisemblablement une modification à la fréquence et à l'intensité des événements extrêmes (Zwiers et Kharin, 1998). Avec les résultats combinés des différentes études, on peut donc comprendre l'importance d'étudier les impacts des changements climatiques sur les inondations. Des études similaires faites sur le bassin, seront traitées au chapitre 2.

CHAPITRE 2

BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CHÂTEAUGUAY

Chaque bassin versant a un régime hydrologique différent qui est influencé par des caractéristiques telles la topographie, le type de sol, la superficie du bassin, le type de climat qui y prévaut, etc. Il est donc nécessaire d'avoir une bonne connaissance des caractéristiques du territoire étudié afin que la modélisation hydrologique représente bien la réponse du bassin versant à la précipitation. Ce chapitre présente les principaux facteurs qui peuvent influencer la réponse hydrologique du bassin versant de la rivière Châteauguay. Après une description sommaire du territoire, la problématique des inondations sur la rivière est abordée. Les données hydrométéorologiques utilisées pour la génération d'une météorologie à l'échelle du bassin versant sont également passées en revue.

2.1 Description du territoire

Situé au Sud-Ouest de Montréal, le bassin versant de la rivière Châteauguay draine une superficie de 2543 km^2 et est traversé par la frontière canado-américaine au 45°N parallèle. Près de 43% du bassin se trouve dans l'état de New York aux États-Unis avec une superficie de 1085 km^2 et un périmètre de 339 km. Prenant sa source dans l'Upper Chateauguay Lake, situé dans la chaîne de montagne des Adirondacks et se jetant dans le fleuve St-Laurent dans le secteur du lac St-Louis, le bassin versant est caractérisé par deux types de topographie. En effet, à sa source le relief est montagneux et plus on approche du Québec plus le relief s'aplanit en rejoignant les Basses Terres du St-Laurent jusqu'au Fleuve St-Laurent. Cette plaine est caractérisée par des altitudes ne dépassant pas 30 m le long du fleuve St-Laurent. De sa source, alimentée par les eaux de ruissellement des Adirondacks, la rivière traverse 121 km dont 68 km au Québec jusqu'à son embouchure.

Le bassin est beaucoup plus peuplé dans sa partie québécoise que dans sa partie américaine et le développement résidentiel s'est fait de manière un peu erratique vers les années 1960 sans préoccupation particulière pour les inondations. Au niveau des Basses Terres du St-Laurent, le territoire est occupé en grande majorité par des terres agricoles et par de la forêt qui couvrent respectivement près de 72% et 26% de la superficie (Simoneau, 2007). La portion québécoise est une importante zone maraîchère pour le Québec. Le sud du bassin est composé en grande majorité d'un couvert forestier dense dominé par les conifères. Vingt-sept municipalités et une réserve indienne se partagent le territoire au Québec et plus de 50% de la population habite dans trois villes : Châteauguay, Mercier et Saint-Rémi. La taille des autres municipalités est très restreinte, avec une population dépassant rarement 3000 habitants.

Les principaux tributaires de la rivière Châteauguay, en ordre d'importance, sont la rivière des Anglais, la rivière Trout et la rivière aux Outardes. Le sous-bassin de la rivière des Anglais draine 29% du territoire avec une superficie de 727 km^2. Le drainage est contrôlé par le fleuve St-Laurent à l'échelle régionale sur la partie le plus en aval du bassin versant. La figure 2.1 montre une carte du bassin versant.

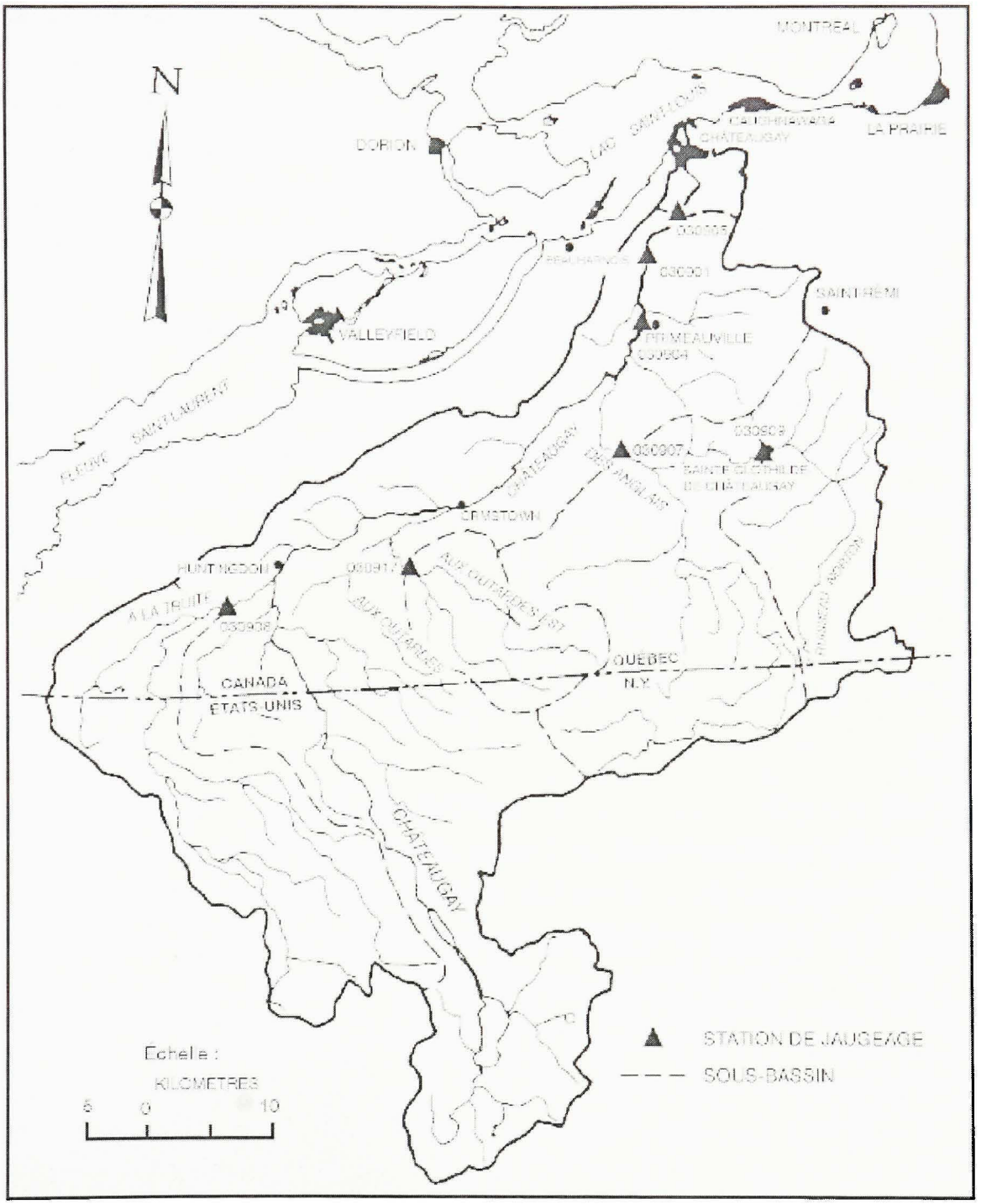


Figure 2.1 ***Situation géographique du bassin versant de la rivière Châteauguay.***
(Tiré d' Awadallah, 1999)

2.2 Problématique des inondations sur la rivière Châteauguay

La problématique des inondations est récurrente sur ce bassin, tout particulièrement au printemps, mais également en été et en automne. En effet, la majorité des rivières situées au nord du bassin débordent pratiquement à chaque année, tout particulièrement la rivière à la Truite et aux Outardes (Breton, 1999). Ces débordements peuvent être importants et touchent principalement les champs agricoles, mais également les routes et les bâtiments situés en zone inondable (fermes, bâtiments municipaux, habitations).

Les crues printanières sont sous haute surveillance puisqu'un grand volume d'eau, dégelée par un printemps plus hâtif aux États-Unis, arrive dans la partie québécoise alors que celle-ci est toujours gelée, causant embâcles et inondations. La figure 2.2 présente le profil d'altitudes du bassin versant.

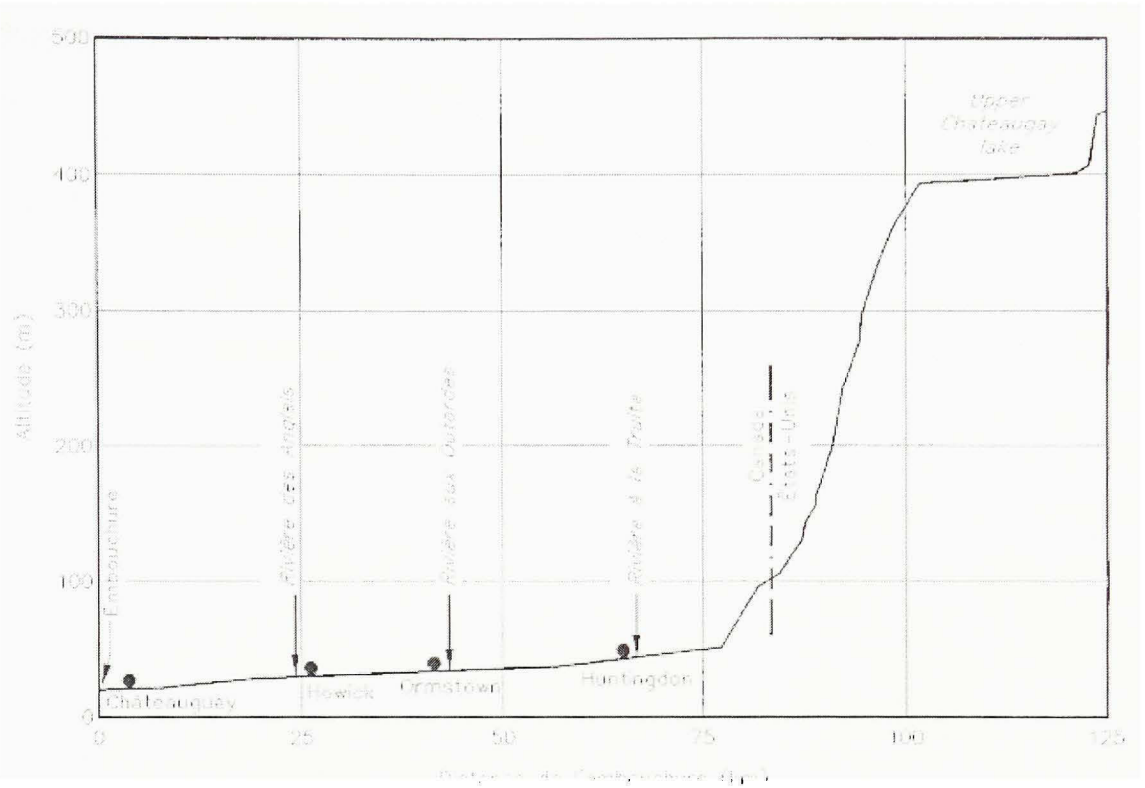


Figure 2.2 ***Profil d'altitudse de la rivière Châteauguay.***
(Tiré de Desmeules et Gélinas, 1981)

Le profil d'altitudes montre la topographie de la rivière. À sa source la pente est importante, soit de 8,9 m/km pour ensuite passer à une pente beaucoup plus faible de 0,4 m/km (Roy, 2000). Il arrive également que la rivière sorte de son lit en saison estivale ou automnale lorsqu'il y a des précipitations intenses sur le bassin versant. Les inondations sur la rivière Châteauguay surviennent principalement entre les municipalités Athelstan et Huntingdon, toutes deux situées au Québec. En effet, à la hauteur de Huntingdon la rivière effectue un virage à 90° vers le nord-est, ce qui favorise la formation d'embâcles et d'inondations. Les régions de Ste-Martine et de Châteauguay sont également parfois victimes de débordement.

La crue printanière représente environ 40% de l'écoulement annuel de la rivière (Roy, 2000) et le débit moyen de la rivière a été évalué à 40 m^3/s (Awadallah *et al.*, 1999). Un système de prévision des crues subites de la rivière Châteauguay a été proposé (Lavallée,

2000) afin de protéger les personnes et les biens. Des prévisions de débits à l'exutoire du bassin sont également disponibles via le CEHQ. Des études précédentes (Mareuil, 2005 ; Roy, L., 2000) ont évalué l'impact des changements climatiques sur les crues estivales et automnales ainsi que printanières. En 1999, Awadallah *et al.* effectuait une analyse statistique des données hydrométriques et arrivait à la conclusion qu'aucune tendance n'était observée dans la fréquence des inondations. Les données utilisées s'arrêtaient cependant en 1995 et deux crues importantes ont eut lieu depuis cette époque, ce qui pourrait avoir un impact sur la tendance des crues importantes sur le bassin. De plus, deux études indiquent que chaque crue cause des dommages de plus en plus importants. (Brissette *et al.*, 2003; Bouillon *et al.*, 1999), Une urbanisation mal planifiée en zone inondable est une possibilité évoquée.

2.3 Données hydroclimatiques

Afin de bien représenter la réalité, tout modèle a besoin d'un nombre suffisant d'observations de qualité pour caler et valider les simulations. Les sections suivantes présentent les stations météorologiques et hydrométriques retenues ainsi que la préparation de la météorologie à l'échelle du bassin.

2.3.1 Stations météorologiques et hydrométriques retenues

Dans les études précédentes (Mareuil, 2005; Roy, 2000), le peu de données observées pour la partie américaine du bassin ont laissé supposer que certains événements, notamment aux niveaux des précipitations, étaient mal représentés. Dans le but d'améliorer la couverture dans le sud du bassin, plusieurs stations en provenance des États-Unis ont été ajoutées. Les données météorologiques quotidiennes de la portion canadienne du bassin proviennent d'Environnement Canada (Env Can) et celles de la portion américaine ont été obtenues via le *National Climatic Data Center* (NCDC). Le tableau 2.1 présente les stations météorologiques retenues.

Tableau 2.1

Stations météorologiques retenues dans le cadre de l'étude

	Numéro	Nom	Latitude (°)	Longitude (°)	Élévation (m)	Source
Stations météorologiques	7023075	HEMMINGFORD FOUR WINDS	45.07	-73.72	61	Env Can
	7023240	HUNTINGDON	45.05	-74.17	49	Env Can
	7025745	ORMSTOWN	45.12	-74.05	46	Env Can
	7026836	STE-ANICET	45.133	-74.21	53	Env Can
	7027040	STE CLOTHILDE CDA	45.17	-73.68	56	Env Can
	7027540	STE MARTINE	45.22	-73.85	38	Env Can
	301401	CHAZY	44.83	-73.43	52	NCDC
	301966	DANNEMORA	44.72	-73.72	408	NCDC
	304647	LAWRENCEVILLE	44.72	-73.75	152	NCDC
	301387	CHASM FALLS	44.75	-74.21	323	NCDC

La variable à modéliser est le débit à l'exutoire et il est nécessaire de pouvoir comparer les résultats simulés à des valeurs obtenues sur le terrain pour juger de la qualité du modèle. La station de jaugeage des débits quotidiens utilisée dans le cadre de cette étude est située près de l'exutoire du bassin-versant, à 4.35 km en amont du pont-route 132 (030905). C'est donc avec ces mesures de débits que la comparaison entre les débits simulés et observés sera faite.

2.3.2 Préparation d'une météorologie à l'échelle du bassin

Règle générale, le bassin-versant est utilisé comme unité géographique afin d'analyser tous les phénomènes se rattachant au cycle de l'eau. Il est donc souhaitable d'avoir un réseau de mesure des précipitations dense et bien distribué sur tout le bassin-versant afin d'avoir une bonne représentation spatiale de la lame d'eau tombée. Les contraintes locales et tout particulièrement les contraintes financières font souvent en sorte que certaines parties du bassin versant sont très bien représentées alors que d'autres ne le sont pas.

Dans le cadre de cette recherche, le modèle hydrologique utilisé, qui est expliqué en détails à la section 3.3 du mémoire, nécessite de créer une météorologie représentative des conditions climatiques moyennes du bassin-versant. Plusieurs techniques existent pour passer des mesures ponctuelles à une estimation des précipitations à l'échelle du bassin-versant. On utilise couramment des calculs de moyennes et différentes méthodes d'interpolation. La méthode des polygones de Thiessen a été employée pour générer une météorologie à l'échelle du bassin versant. C'est la méthode la plus couramment utilisée, car elle est facile à mettre en œuvre et elle donne généralement de bons résultats, en particulier quand le réseau de mesure est dense et bien distribué. Chaque station météorologique présente sur le bassin est considérée et a sa propre zone d'influence. Pour déterminer la zone d'influence, il faut procéder ainsi : relier entre elles, par des droites, les stations adjacentes. Ensuite, on élève des droites perpendiculaires au milieu de chaque droite et ce sont l'intersection de ces droites perpendiculaires qui détermineront les polygones. C'est l'aire de cette territoire appartenant au bassin versant, en pourcentage, qui établit le facteur de pondération de la valeur locale. La précipitation moyenne pour le bassin est alors :

$$P_{moy} = \frac{\sum A_i P_i}{A} \tag{2.1}$$

Où P_{moy} est la précipitation moyenne sur le bassin, A est l'aire totale du bassin ($=\sum A_i$), P_i est la précipitation enregistrée à la station i et A_i est la superficie du territoire associée à la station i. Dans le cadre de cette étude, la détermination des valeurs de pondération s'est fait à l'aide d'un script développé par Georges-Étienne Desrochers de l'institut de recherche en énergie du Québec (IREQ) et adapté par Marie Minville à l'ÉTS. Le programme a été conçu pour fonctionner avec des données dans le format utilisé par Environnement Canada et un formatage préalable est donc nécessaire pour les données provenant des États-unis. Il suffit de fournir les variables température minimale (°C), température maximale (°C), hauteur de pluie (cm) et équivalent en eau de la neige (cm) pour chaque station, les positions géographiques de celles-ci et la définition du contour du bassin versant. Le

programme calcule alors pour chaque journée et pour chaque variable un patron de distribution pour établir la météorologie moyenne. Les différents patrons de distribution de la variable température maximale, tels que calculés par la méthode des polygones de Thiessen, sont fournis en annexe I.

2.3.3 Choix des périodes de calage et de validation

Le calage et la validation d'un modèle sont des passages obligés. En effet, puisque les modèles sont généralement des approximations mathématiques de la réalité et que les données utilisées sont imprécises, il est nécessaire de caler et de valider le modèle (Leconte, 1999). Il faut également avoir une plage de données suffisamment longue pour que le calage et la validation du modèle soient efficaces et que le modèle représente bien la réalité. Dans le but de limiter la part d'erreurs provenant des données météorologiques, la période d'étude a été sélectionnée pour que presque toutes les stations soient en opération en même temps pour obtenir une climatologie moyenne représentative de tout le bassin. La plage étudiée commence l^{er} janvier 1959 et se termine le 31 octobre 2003. Sur les 43 années utilisées, les vingt premières ont servi au calage et les 23 dernières à la validation du modèle.

CHAPITRE 3

MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DES CRUES PRINTANIÈRES ET ESTIVALES/AUTOMNALES '1959-2003'

3.1 Objectifs de la modélisation

Les objectifs de la modélisation vont généralement de pair avec ceux du projet de recherche. En effet, puisque l'objectif principal de la recherche est d'évaluer l'impact des changements climatiques sur les plaines inondables de la rivière Châteauguay, la modélisation devra être en mesure de bien représenter les crues importantes. Une attention particulière a donc été portée sur les crues centenaires qui sont utilisées lors de la production de cartes de plaines inondables. Dans le but de maintenir une certaine homogénéité au sein des échantillons de données, deux types de crues sont étudiés, soit les crues printanières et les crues estivales et automnales, car elles ont des crues centenaires issues de processus différents. L'évolution du couvert de neige est une variable capitale dans la modélisation des crues printanières et le modèle choisi devra être en mesure de bien simuler cet élément. Pour ce faire, une modélisation en continu est nécessaire. Le logiciel HEC-HMS avait été pressenti, car la nouvelle version est capable de modéliser en continu et un module de fonte de neige a été ajouté. Il s'avère cependant que plusieurs problèmes, notamment dans la physique sous-jacente au module de fonte de neige, rendent difficile l'utilisation de ce logiciel pour un bassin versant nordique. Le logiciel HSAMI, développé par Hydro-Québec, a donc été sélectionné. Utilisé en contexte québécois depuis plus de 20 ans, ce logiciel s'est avéré une excellente alternative, malgré le fait qu'à la base il soit utilisé pour produire des prévisions a court et à moyen terme et non pour des prévisions de changement climatique. La méthode de calage a donc été adaptée et l'analyse fréquentielle de crues a été utilisée principalement pour juger de la qualité des résultats pour le printemps et pour l'été et l'automne.

3.2 Analyse fréquentielle des crues passées

Dans le cadre de cette étude, l'analyse de fréquence a été utilisée pour estimer l'ampleur des débits de plusieurs crues observées et simulées correspondant à une récurrence donnée. La différence entre les résultats des crues simulées et observées a servi de critère principal pour évaluer la qualité du calage et de la vérification du modèle hydrologique. La section suivante présente les principes usuels de la méthode, l'échantillonnage des données ainsi que les résultats de l'ajustement à une loi de densité de probabilité.

3.2.1 Principes

L'analyse fréquentielle de crues est l'outil de calcul des crues maximales qui se base sur l'analyse statistique d'événements passés. La fonction principale de l'analyse de fréquence est d'estimer la probabilité de dépassement associée à une crue d'une ampleur donnée. L'amplitude d'un événement extrême est donc relié à sa fréquence d'occurrence par le biais d'une loi de distribution de probabilités (Chow *et al.*, 1988). L'estimation des fréquences de crues est couramment utilisée dans la planification et la conception d'ouvrages hydrauliques et dans la gestion des plaines inondables.

Le logiciel HYFRAN (INRS-ETE, 1999) a été utilisé dans le cadre de cette étude. Développé par la Chaire en hydrologie statistique (Hydro-Québec/CRSNG/Alcan), située à l'Institut national de la recherche scientifique (Québec), il comprend une série d'outils permettant l'analyse statistique complète des crues pour un bassin-versant. Il revient à l'utilisateur de construire l'échantillon à analyser et de choisir la fonction de distribution de probabilités qui ajuste le mieux cet échantillon. Des tests d'adéquations permettent de baliser ce choix.

3.2.2 Échantillonnage et conditions préalables

La première étape de l'analyse de fréquence consiste en la construction de la série de valeurs extrêmes de débits. Deux types de séries sont couramment utilisées : les séries construites à l'aide des maximums annuels et les séries de durée partielle (Anctil *et al.*, 2005). Pour la première méthode, on choisit à chaque année la valeur maximale du débit quotidien. Cette approche permet de s'assurer de l'indépendance des valeurs entre elles. La deuxième méthode fait appel au concept de débit-seuil. En effet, pour construire cette série on sélectionne tous les débits qui dépassent un seuil de référence. On peut donc avoir plus d'un événement pour une même année ou d'autres années sans crue. Cette méthode est particulièrement avantageuse pour les échantillons de petite taille (N<15). En effet, l'utilisation d'une série de valeurs extrêmes annuelles pour un échantillon de petite taille induit un trop grand intervalle de confiance des estimations déduites d'une fonction de distribution de probabilités. Pour un échantillon de grande taille (N>30), les deux méthodes convergent vers un même résultat (Anctil *et al.*, 2005). Puisque la taille de l'échantillon (N=45) est suffisamment importante, la méthode des valeurs extrêmes annuelles a été employée pour les crues printanières et estivales/automnales.

Deux séries des valeurs annuelles des débits extrêmes de 45 années observées (1959 à 2003) ont donc été créées pour l'analyse des crues printanières et des crues estivales/automnales. Pour la série des crues annuelles printanières, le maximum annuel a été sélectionné entre les mois de janvier à mai inclusivement. La figure 3.1 montre la courbe chronologique de l'échantillon des crues printanières.

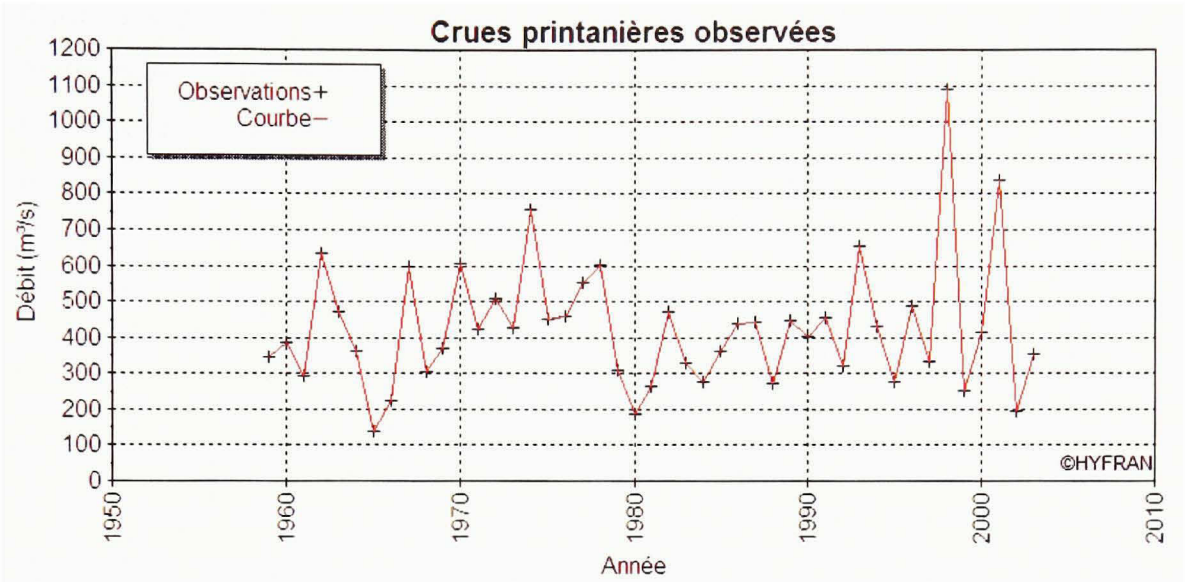


Figure 3.1 ***Courbe chronologique des débits des crues printanières observées.***

Les données de la série des crues annuelles estivales/automnales ont été choisies dans les mois de juin à novembre inclusivement. La figure 3.2 montre la courbe chronologique de l'échantillon des crues estivales et automnales.

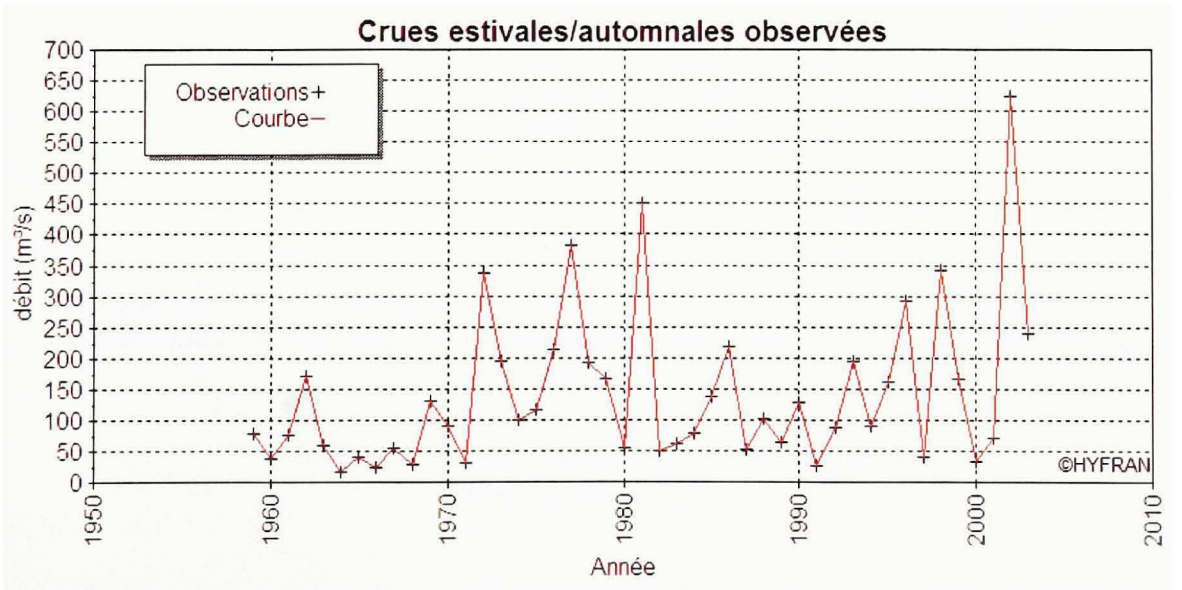


Figure 3.2 ***Courbe chronologique des débits des crues estivales et automnales observées.***

Avant d'ajuster les séries d'extremums annuels, il est nécessaire de s'assurer de l'indépendance des données, de leur stationnarité et de leur homogénéité. Le test d'indépendance assure que les données ne sont pas auto-corrélées et que l'occurrence d'une observation n'est pas affectée par l'observation précédente. Afin de vérifier l'indépendance des données entre elles, le test de Wald-Wolfowitz (Wald et Wolfowitz., 1943) a été fait. L'homogénéité des deux séries de données a été prouvée grâce au test de Wilcoxon (Wilcoxon, 1945). L'interface du logiciel HYFRAN permet d'appliquer ces tests de façon conviviale. La stationnarité des données a été testée avec le test de Kendall (Kendall, 1975). La crue automnale de 2003, d'une ampleur exceptionnelle, empêche d'accepter l'hypothèse de stationnarité avec un niveau de signification de 5% et induit une tendance dans les observations, mais avec un niveau de signification de 1%, l'hypothèse est acceptée. Selon la figure 3.3, cela signifie donc que la valeur critique de la statistique au niveau de signification de 5% est plus petite que la valeur critique à un niveau de signification de 1%. Lorsque cette crue est éliminée de l'échantillon, le test est accepté à un niveau de 5%. La crue a cependant été gardée dans l'échantillon des crues printanières. Puisque les tests ont été effectués avec succès, l'ajustement à une loi de probabilité pour les deux séries de données observées peut être faite.

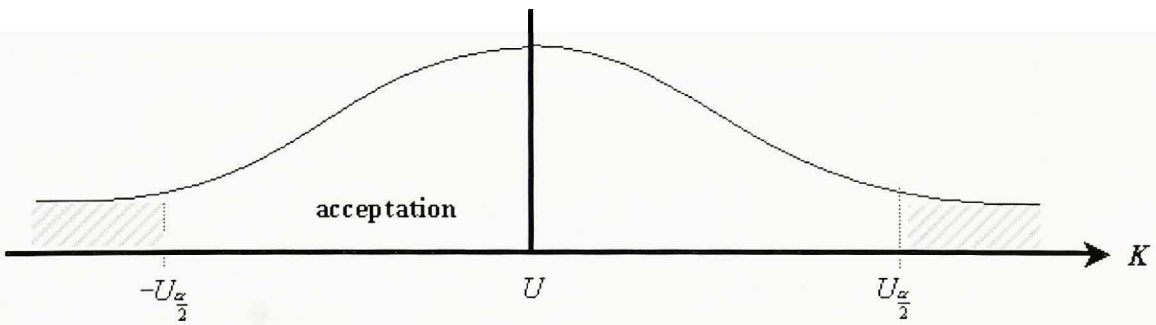


Figure 3.3 Acceptation du test de Kendall.
(*Tiré de INRS-ETE, 2007*)

3.2.3 Ajustement à une loi de probabilité

L'ajustement à une loi de probabilité a pour but de représenter le mieux possible l'échantillon par une distribution théorique connue. Pour ce faire, les paramètres de cette fonction sont fixés de façon à reproduire le comportement de l'échantillon. Pour chacun des échantillons, plusieurs distributions théoriques ont été essayées et les sections suivantes présentent les résultats les plus probants pour les deux séries de données.

3.2.3.1 Crues printanières

Le meilleur ajustement est obtenu avec la fonction de densité de probabilité de la distribution de Gumbel. Cette loi de distribution est un cas particulier de la loi des extrêmes généralisés (GEV) et est tout indiquée pour décrire un échantillon de débits maximums annuels (Leconte, 1999). La distribution de cette loi se décrit de la façon suivante :

$$F(x) = \exp\left(-1\left(1 - c\frac{x-a}{b} \right)^{\frac{1}{c}} \right) \tag{3.1}$$

Où a est le paramètre de position, b le paramètre d'échelle et c le paramètre de forme. Selon les valeurs de c, trois lois différentes peuvent se distinguer. La loi de Gumbel ou loi GEV de type I correspond au cas où c=0, non-borné et s'écrit donc :

$$F(x) = \exp\left(-\exp\left(-\frac{x-a}{b} \right) \right) \tag{3.2}$$

Afin d'estimer les deux paramètres de la distribution, la méthode des moments a été sélectionnée. Cette méthode consiste a égaler les j premier moments théoriques d'une distribution, fonctions des paramètres a et b, et leurs estimations calculées à partir de la série de données échantillonnées. Autant de j moments indépendants doivent être considérés qu'il y a de paramètres à estimer. Puisque la loi Gumbel est une loi a deux

paramètres, deux moments ont été utilisés, soit la moyenne et la variance, qui sont respectivement décrit par les expressions suivantes:

Moments de la population

$$m_j = \int_0^{\infty} x^j f(x) dx \tag{3.3}$$

Moments de l'échantillon

$$\hat{m}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i^{\ j} \tag{3.4}$$

j équations sont ainsi obtenues permettant la résolution des j paramètres de la distribution (Haan, 1977).

Voici le tracé de la loi ajustée à l'échantillon des crues printanières observées.

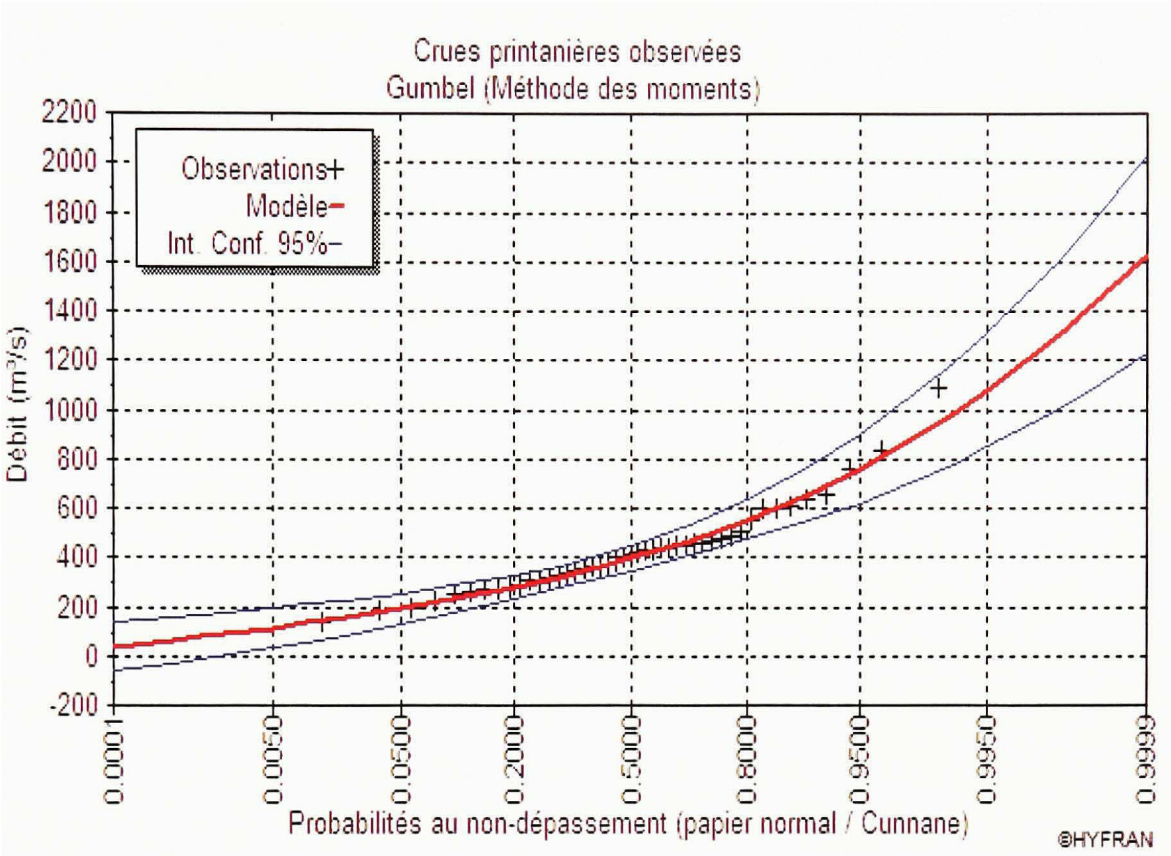


Figure 3.4 ***Analyse fréquentielle des crues printanières observées de la rivière Châteauguay (1959-2003).***

Le tableau 3.1 présente en détail les résultats de l'analyse fréquentielle des crues printanières.

Tableau 3.1

Résultats de l'analyse fréquentielle des crues printanières

Période de retour (années)	**Crues printanières (m^3/s)**	**Écart type (m^3/s)**
200	1080	119
100	988	104
50	890	89.7
20	761	70.2
10	660	55.6
5	556	41.2
3	473	31.1
2	398	24.4

3.2.3.2 Crues estivales et automnales

La distribution lognormale a été sélectionnée pour représenter l'échantillon des crues estivales et automnales, car c'est cette loi qui présente le meilleur ajustement. Tel que mentionné plus tôt, une crue d'une ampleur exceptionnelle est arrivée en 2003 et cette valeur extrême fausse les résultats d'analyse fréquentielle de crues. La loi lognormale a pour effet de diminuer le poids des valeurs les plus élevées et d'augmenter celui des valeurs plus faibles de débits. Alors que cette caractéristique aurait pu être un handicap dans d'autre situation, c'est une caractéristique qui permet de ne pas surreprésentée la crue de 2003 lors de l'analyse fréquentielle. La loi lognormale, qui provient d'une modification à la loi normale s'exprime ainsi :

$$f_Y(x) = \frac{1}{x\sqrt{2\pi\sigma_Y^2}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln(x) - \mu_Y}{\sigma_Y} \right)^2 \right] \tag{3.5}$$

La figure 3.5 présente la loi ajustée à l'échantillon des crues estivales et automnales observées.

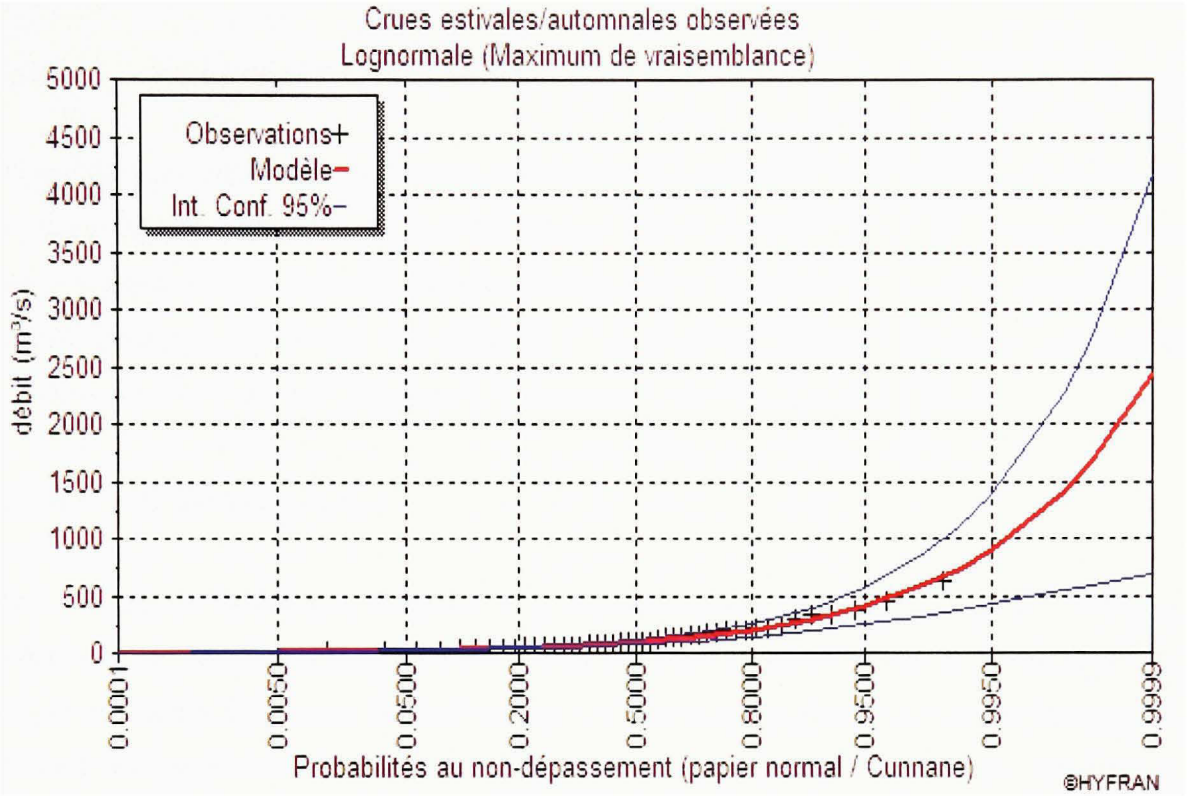


Figure 3.5 ***Analyse fréquentielle des crues estivales/automnales observées de la rivière Châteauguay (1959-2003).***

Le tableau 3.2 présente les détails de l'analyse fréquentielle pour plusieurs périodes de retour.

Tableau 3.2

Résultats de l'analyse fréquentielle des crues estivales/automnales

Période de retour (années)	**Crues estivales/automnales (m^3/s)**	**Écart type (m^3/s)**
200	907	244
100	732	183
50	578	132
20	407	80.7
10	297	51.8
5	203	30.5
3	143	19.2
2	98.4	12.6

3.2.4 Vérification de l'adéquation

Une fois que l'utilisateur a choisi la fonction de distribution de probabilité qui minimisait l'intervalle de confiance sur la valeur théorique, des tests d'adéquation doivent être faits afin de confirmer les choix de l'utilisateur. Certains tests sont plus performants que d'autres dépendamment de la loi sélectionnée. Les deux sections suivantes présentent sommairement les tests effectués pour chacun des échantillons.

3.2.4.1 Crues printanières

Dans le cas de la fonction Gumbel, il est recommandé d'utiliser le test du χ^2. Ce test, développé au début du 20^e siècle par Karl Pearson revient à vérifier que les différences de l'occurrence des fréquences de l'échantillon et de la loi théorique ne sont attribuables qu'au hasard. L'hypothèse nulle que l'on teste avec le test du χ^2 est H_0 : " La distribution expérimentale sous-jacente aux données vient de la distribution théorique ". Le test a démontré que la distribution expérimentale pouvait appartenir à la distribution de Gumbel à un niveau de signification de 5%.

3.2.4.2 Crues estivales et automnales

Le test du χ^2 n'est pas le test le plus approprié pour vérifier si les données font partie d'une loi normale ou log-normale. En effet, le test de Shapiro-Wilk (Shapiro et Wilk (1965)) est plus approprié car il a été conçu spécialement pour étudier la normalité d'une distribution. De plus, ce test est particulièrement puissant pour les échantillons de taille réduite (N<50). Le test est fondé sur la statistique suivante :

$$W = \frac{b^2}{Z^2} \tag{3.4}$$

Où b^2 est fonction des étendues partielles et Z^2 est fonction des carrés des écarts à la moyenne.

3.3 Modélisation avec HSAMI

Le modèle hydrologique HSAMI a été développé à Hydro-Québec et il y est toujours couramment utilisé pour faire la simulation et la prévision des apports naturels à un réservoir ou les débits à l'exutoire d'un bassin-versant. Au cours des années, le modèle a continuer à être développé et il est maintenant possible de faire des simulations de crues maximales probables (CMP) en plus des prévisions à court et à moyen terme. HSAMI est un modèle de type conceptuel, c'est-à-dire qu'il utilise une représentation mathématique simplifiée des processus du cycle hydrologique en temps discret. La section suivante présente une brève description de HSAMI, de son mode de fonctionnement, ainsi que des intrants et extrants du modèle.

3.3.1 Description du modèle

Le modèle HSAMI est basé sur l'équation du bilan hydrique suivante :

$$Q = P - E - D \tag{3.5}$$

Où Q est le débit, E est l'évapotranspiration, P est la précipitation et D est la différence d'emmagasinement. Aucune description physique du bassin versant n'est nécessaire, outre sa superficie, car le bassin est perçu comme une fonction de transfert ayant en entrée les conditions météorologiques et en sortie les débits à l'exutoire du bassin versant. L'utilisateur doit fournir au modèle une matrice contenant les variables météorologiques quotidiennes suivantes, en ordre : la température minimale (°C), la température maximale (°C), la hauteur de pluie (cm) et l'équivalent en eau de la neige tombée (cm). Quand la disponibilité des données le permet, il est possible de fournir au modèle l'ensoleillement quotidien et l'équivalent en eau de la neige au sol (cm). Une seconde matrice est nécessaire, soit les débits quotidiens à l'exutoire.

Vingt-trois paramètres sont utilisés pour les équations de simulation. Chacun des paramètres exprime un processus physique hydrologique et fait fluctuer les niveaux et la distribution de l'eau dans les trois réservoirs conceptuels en cascade du modèle. Les lames d'eau générées sont alors filtrées par deux hydrogrammes unitaires. On peut regrouper les paramètres en 5 groupes distincts : l'évapotranspiration (2), l'évolution de la neige (6), le ruissellement de surface (3), l'écoulement vertical de l'eau dans le sol (7) et l'écoulement horizontal (5). Le module de fonte de neige est fondé sur un algorithme de degré-jour. Fortin (2000) fournit une description de l'algorithme, qui à chaque pas de temps effectue les opérations suivantes :

> « 1. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) selon une méthode empirique basée sur la température minimale et la température maximale observée sur 24h.
>
> 2. Calcul des précipitations directes au réservoir (lac) en fonction du rapport entre la superficie du réservoir et celle du bassin (il n'y pas de réservoir dans notre modèle du bassin versant Châteauguay). Quantité ajoutée directement à la lame d'eau simulée à la fin du pas de temps.
>
> 3. Simulation de l'interception de la pluie et de la neige, c'est-à-dire : accumulation de la neige au sol, accumulation de pluie et d'eau de fonte dans le stock de neige, gel et dégel de l'eau en surface, dans la neige et dans le sol, vieillissement du stock de neige, fonte du couvert de neige.
>
> 4. Séparation de l'eau disponible pour infiltration et ruissellement de surface.
>
> 5. Simulation de l'écoulement vertical de l'eau dans une colonne de sol, c'est-à-dire : simulation de l'infiltration, du ruissellement retardé et de l'évapotranspiration de l'eau de surface, cheminement de l'eau dans la zone non saturée et saturée.
>
> 6. Simulation de l'écoulement horizontal de l'eau vers l'exutoire.
>
> 7. Calcul (de l'apport naturel au réservoir ou) du débit à l'exutoire à partir de : la lame d'eau générée par le processus de simulation de l'écoulement horizontal, (la précipitation directe au réservoir, l'évaporation (au taux potentiel) à la surface du réservoir), la superficie du réservoir et du bassin ». (Fortin, 2000, p.13)

La figure 3.6 présente le schéma conceptuel du modèle et y associe les opérations 1 à 7.

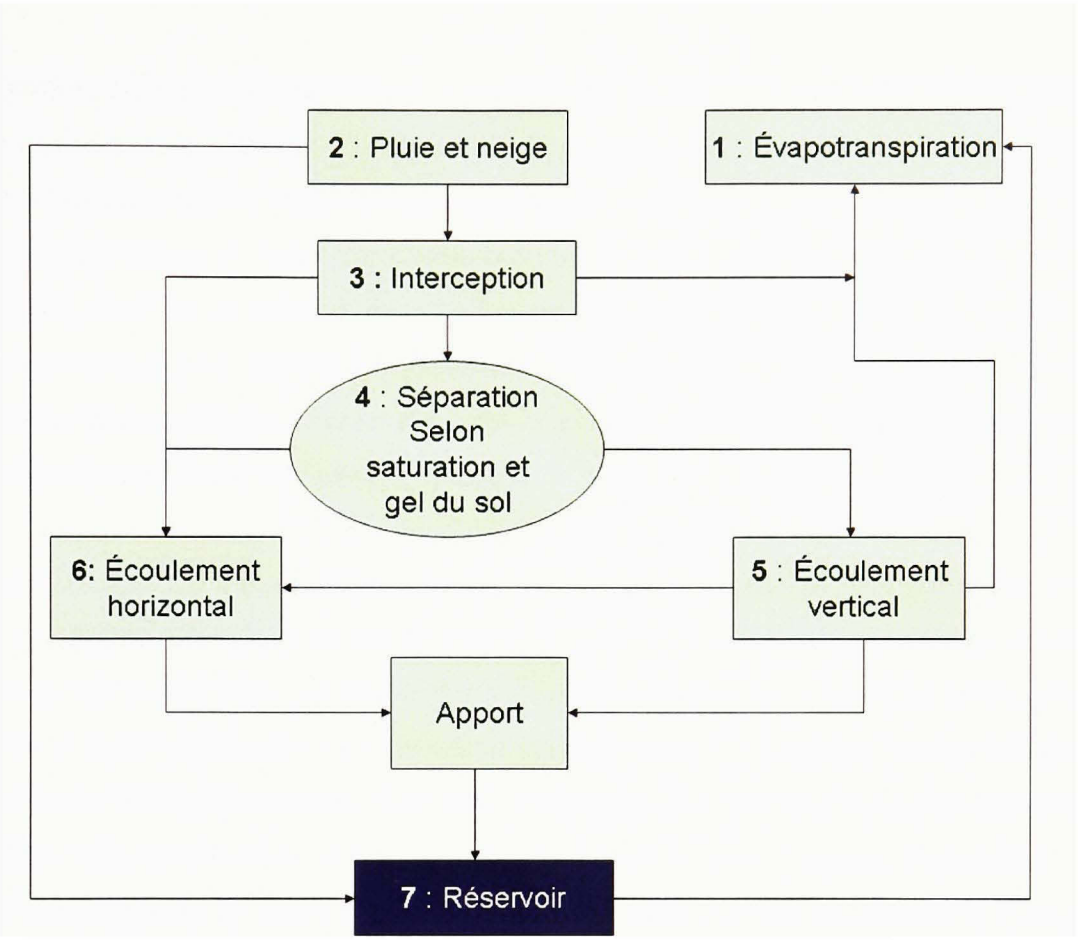


Figure 3.6 ***Schéma conceptuel de l'algorithme de simulation du modèle HSAMI.***
(Adapté de Fortin, 2000)

3.3.2 Calage du modèle

Après avoir créé une climatologie à l'échelle du bassin à l'aide de la méthode des polygones de Thiessen (*voir* section 2.4.4), il faut déterminer un intervalle initial pour chacun des paramètres afin que l'outil d'optimisation du modèle donne une première valeur pour les 23 paramètres. HSAMI utilise le modèle d'optimisation SCE-UA (Duan *et al.*, 1992). Il est alors possible de voir si les bornes inférieures ou supérieures ont été atteintes pour chacun des paramètres. Il est préférable de modifier les bornes afin qu'aucun des paramètres n'atteigne les bornes fixées par l'utilisateur. Le calage a été fait à partir du jeu de paramètres que Mareuil (2005) avait utilisé dans le cadre de sa recherche. Dans un premier temps, l'outil d'optimisation a été utilisé avec le jeu de paramètre initial, mais les crues

printanières étaient généralement sous-estimées. De plus, il nous a été impossible d'obtenir un seul jeu de paramètres qui représentait adéquatement les crues printanières et les crues estivales et automnales. Deux calages manuels ont donc été nécessaires à partir des jeux de paramètres obtenus à l'aide de l'outil d'optimisation. Au niveau du printemps, un paramètre de fonte de neige et deux paramètre d'écoulement vertical ont été modifié par essaies et erreurs pour améliorer les résultats. Des modifications plus importantes ont dues être faites pour améliorer les crues estivales et automnales. En effet, seul les paramètres de l'écoulement horizontal sont restés identiques.

Puisque le modèle n'est pas utilisé pour la prévision à court terme, le principal critère utilisé pour déterminer si le calage est satisfaisante est l'analyse fréquentielle des données simulées et non le critère de Nash. Le critère de Nash permet de calculer la variance attribuable au modèle et il peut varier de $-\infty$ à 1, la valeur optimale étant 1. Cependant, malgré le fait que le critère de Nash peut atteindre 0,93 pour l'hydrogramme quotidien moyenné sur 45 ans, l'analyse fréquentielle nous révèle une piètre performance pour les crues importantes. Le tableau 3.3 présente la valeur des 23 paramètres modifiés manuellement pour le calage du printemps et de l'été/automne ainsi que le jeu de paramètres initial. Pour les modélisations d'été/automne, il est nécessaire de modéliser l'hiver également, c'est pourquoi les paramètres de fonte de neige ne sont pas égaux à 0.

Tableau 3.3

Valeurs des 23 paramètres modifiés manuellement pour les calibrations du printemps et de l'été/automne et valeur des paramètres initiaux

	Paramètre	Initial	Printemps	Été/ Automne
Évapotranspiration	1	1.15	1.15	1.15
	2	0.099	0.099	0.2
fonte de la neige	3	0.25	0.25	0.25
	4	0.2	0.2	0.175
	5	-0.5	-0.5	-1
	6	0	0	0
	7	0	0.01	0.07
	8	0.718	0.718	0.718
Ruissellement	9	6.938	6.938	6.938
	10	15	15	14
	11	1.5	1.5	1.5
Écoulement vertical	12	5	6	5
	13	9	9	7
	14	17.5	17.5	21
	15	0.376	0.6	0.2
	16	0.4	0.4	0.4
	17	0.05	0.05	0.04
	18	0.05	0.05	0.05
Écoulement horizontal	19	0.8	0.8	0.8
	20	1.25	1.25	1.25
	21	1.5	1.5	1.5
	22	3	3	3
	23	1.15	1.15	1.15

3.4 Comparaison du passé observé et simulé

Les sections suivantes présentent une comparaison entre les résultats des analyses de fréquences pour les données observées et simulées.

3.4.1 Crues printanières

Les données simulées sont soumises aux mêmes tests que les données observées afin de s'assurer de l'indépendance et de la stationnarité des données. Le test d'adéquation confirme que nous pouvons accepter l'hypothèse que l'échantillon provient d'une loi Gumbel tout comme les données observées. Le graphique 3.7 présente le tracé de la loi ajustée à l'échantillon des crues printanières simulées.

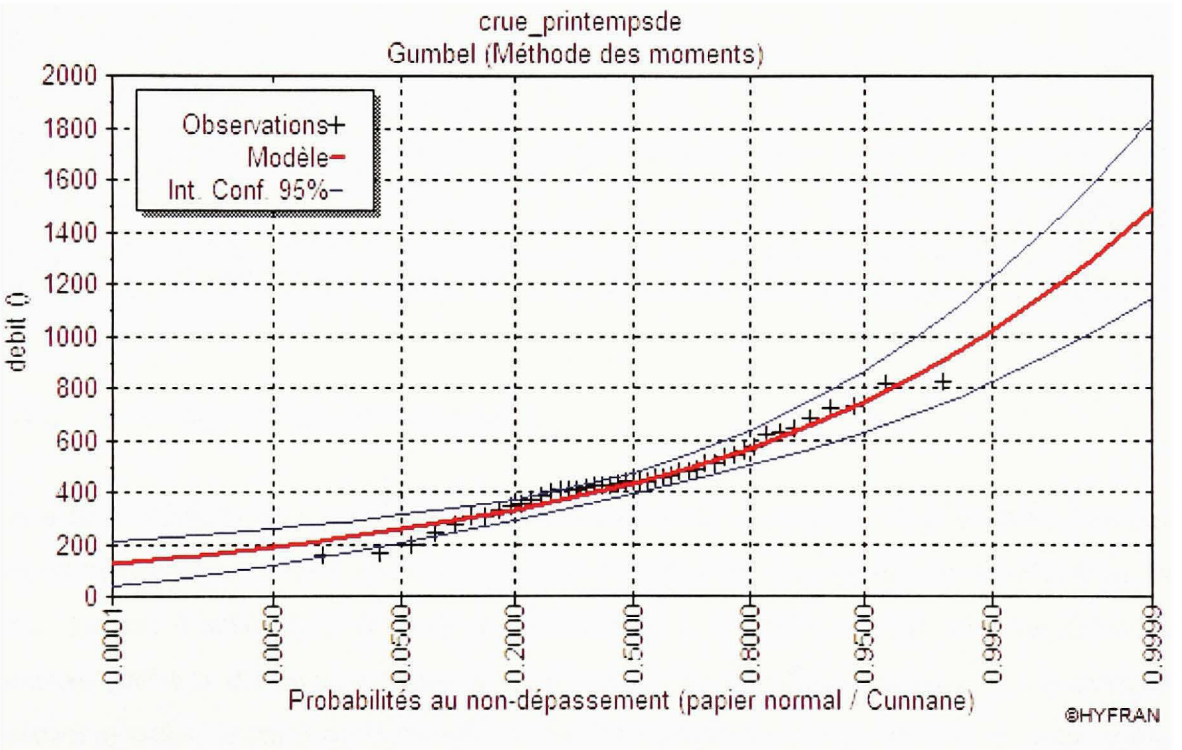


Figure 3.7 ***Analyse fréquentielle des crues printanières simulées de la rivière Châteauguay (1959-2003).***

Le tableau suivant présente les résultats de l'analyse de fréquences des données simulées ainsi que les écarts avec l'analyse fréquentielle des données observées pour les crues printanières.

Tableau 3.4

Écart entre les analyses fréquentielles des données observées et simulées pour les crues printanières

Données observées						Données simulées				
T (ans)	P non-dépas-sement	Q (m^3/s)	Écart –type (m^3/s)	Intervalle de confiance (m^3/s)	Ecart (%)	T (ans)	P non-dépas-sement	Q (m^3/s)	Écart –type (m^3/s)	Intervalle de confiance (m^3/s)
200	0.995	1080	119	851 - 1320	5.56	200	0.995	1020	102	821 - 1220
100	0.99	988	104	783 - 1190	4.96	100	0.99	939	89.6	763 - 1110
50	0.98	890	89.7	715 - 1070	3.93	50	0.98	855	76.9	705 - 1010
20	0.95	761	70.2	623 – 898	2.23	20	0.95	744	60.2	626 - 862
10	0.9	660	55.6	551 – 769	0.30	10	0.9	658	47.7	565 - 752
5	0.8	556	41.2	475 – 637	-2.16	5	0.8	568	35.3	499 - 638
3	0.6667	473	31.1	412 – 534	-5.07	3	0.6667	497	26.6	445 - 549
2	0.5	398	24.4	350 – 446	-8.79	2	0.5	433	21	392 – 474

3.4.2 Crues estivales et automnales

La même méthode que pour les crues printanières est appliquée. Les tests statistiques démontrent l'indépendance et la stationnarité des données à un niveau de signification de 5%. Le test d'adéquation de Wilk-Shapiro (1965) a démontré que les données simulées peuvent provenir d'une loi lognormale tout comme les données observées. Le graphique suivant présente le tracé de la loi ajustée à l'échantillon des crues estivales et automnales simulées.

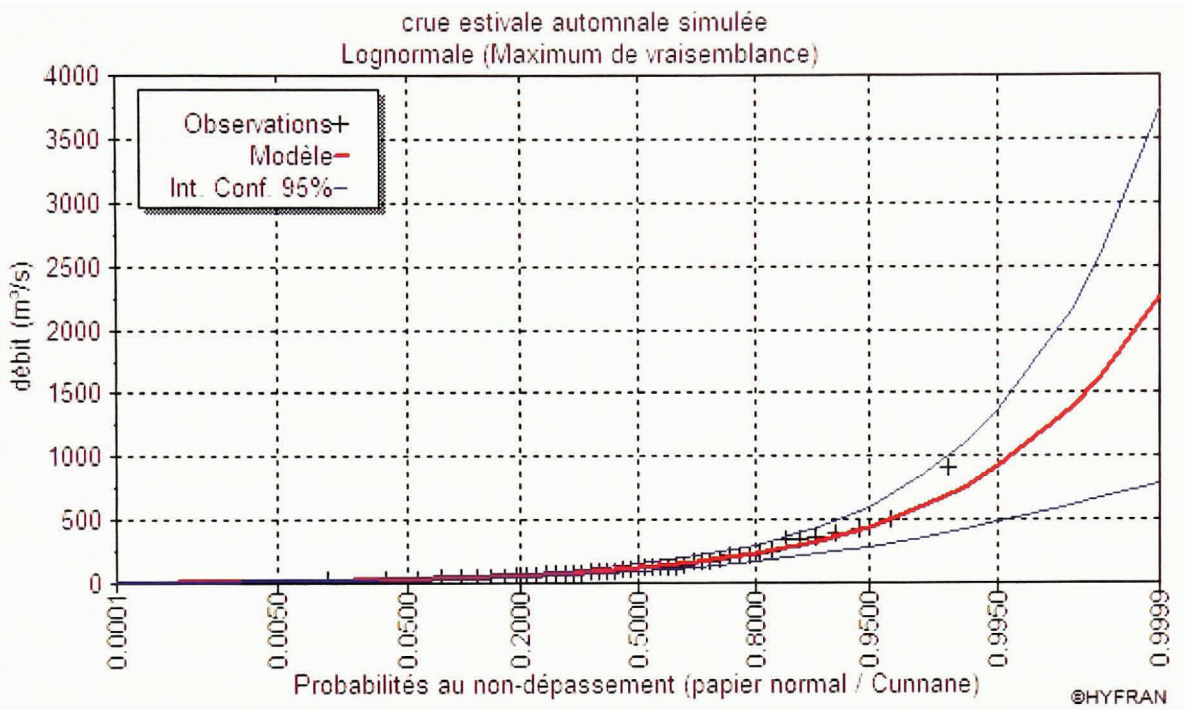


Figure 3.8 ***Analyse fréquentielle des crues estivales et automnales simulées de la rivière Châteauguay (1959-2003).***

Le prochain tableau présente une comparaison entre les résultats des analyses de fréquence des données observées et simulées et l'écart entre les deux.

Tableau 3.5

Écart entre les analyses fréquentielles des données observées et simulées pour les crues estivales et automnales

Données observées						Données simulées				
T	**P non-dépas-sement**	**Q**	**Écart -type**	**Intervalle de confiance**	**Ecart (%)**	**T**	**P non-dépas-sement**	**Q**	**Écart -type**	**Intervalle de confiance**
200	0.995	907	244	428 – 1390	-1.76	200	0.995	923	227	479 - 1370
100	0.99	732	183	374 – 1090	-3.69	100	0.99	759	173	420 - 1100
50	0.98	578	132	319 – 838	-5.88	50	0.98	612	127	363 - 862
20	0.95	407	80.7	248 - 565	-9.09	20	0.95	444	80.3	287 - 602
10	0.9	297	51.8	196 - 399	-12.46	10	0.9	334	53	230 - 438
5	0.8	203	30.5	144 - 263	-16.26	5	0.8	236	32.3	173 - 299
3	0.6667	143	19.2	105 - 180	-19.58	3	0.6667	171	21	130 - 212
2	0.5	98.4	12.6	73.6 - 123	-23.98	2	0.5	122	14.3	93.9 – 150

CHAPITRE 4

SIMULATIONS FUTURES POUR LES PÉRIODES 2020 ET 2080

4.1 Préparation du climat futur

Afin d'évaluer les impacts possibles du changement climatique, il est nécessaire d'avoir une compréhension reposant sur des fondements scientifiques de ce que seront ces changements, tant à l'échelle planétaire que pour le Canada. Pour ce faire, les principaux outils à notre disposition sont les MCG et les MRC, au maillage plus fin. En effet, ces modèles sont les seuls capables de tracer les grandes lignes du climat futur en fonction de divers scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (GIEC, 2001) Loin d'être parfaits, ils restent des approximations des interactions entre l'atmosphère, les océans et les continents. Cependant, ils constituent à ce jour notre meilleur moyen d'établir des projections d'un climat futur, dans le but d'aider l'adaptation des sociétés humaines (GIEC, 2001). Le modèle hydrologique HSAMI sera donc utilisé pour quantifier l'impact des changements climatiques sur l'hydrologie du bassin versant de la rivière Châteauguay avec l'aide de données provenant de quatre MCG. Plusieurs projections futures, toutes plausibles, issues de divers modèles, sont construites et permettent d'évaluer une fourchette de possibilités. Les sections suivantes présentent les différentes étapes qui ont mené à la construction de ces projections ainsi que les résultats obtenus pour l'hydrologie du bassin-versant de la rivière Châteauguay.

4.1.1 Choix des MCG

Les MCG sont les outils de base les plus appropriés pour construire des projections de changements climatiques (GIEC, 2001). Cependant, dû à leur faible résolution spatiale, les MCG sont peu appropriés pour les études régionales. Les modèles de climats régionaux, pilotés aux frontières du domaine de simulation par différents MCG ou par des réanalyses, sont plus adéquats, car ils représentent mieux les processus à une échelle plus fine.

Cependant, pour les MRC, tout comme pour les MCG, des méthodes de mise à l'échelle doivent être appliquées sur les sorties du modèle afin de pouvoir lier les projections issues de ces modèles aux impacts du changement climatique à l'échelle locale. Dans le cadre de cette recherche, il n'a pas été possible d'utiliser les sorties du modèle régional du climat canadien (MRCC), car aucune simulation n'avait été complètement validée sur les horizons temporels étudiés. Nous avons été dans l'obligation d'utiliser des MCG, qui décrivent moins bien le climat au niveau régional, mais qui donnent tout de même une bonne idée des tendances moyennes du climat futur. Les données des MCG ont été obtenues grâce à la collaboration avec le consortium de recherche Ouranos.

Afin de tenir compte de la représentation spatiale insuffisante du climat à l'échelle régionale par les modèles de climat, le GIEC recommande d'en utiliser plusieurs dans le but d'avoir un large spectre des changements climatiques possibles (GIEC, 2001). De plus, pour un même modèle, il est recommandé d'utiliser plus d'un scénario d'évolution des concentrations des gaz à effet de serre. Quatre modèles ont donc été sélectionnés et deux familles de scénarios ont été retenues pour les fins de cette étude. Le choix des MCG et des scénarios est justifié par le fait que tous les modèles sont reconnus par la communauté internationale et représente bien la variabilité naturelle du climat. Le tableau 4.1 présente les différents modèles sélectionnés ainsi que les scénarios retenus pour chacun des modèles.

Tableau 4.1

GCM et scénarios SRES retenus pour l'étude du climat futur

MCG	**Pays**	**Résolution (Lat x Long)**	**Scénarios SRES**
CGCM3r	Canada	3,7° x 3,7°	A1B, A2, B1
HadCM3	Angleterre	2,5° x3,75° (250 km x 250 km)	A2, B2
ECHAM4	Allemagne	2,8125° x 2,8125° (300 km x 200 km)	A2, B2
CSIRO	Australie	3,25° x 5,625° (350 km x 450 km)	A2, B2

Les figures 4.1 et 4.2 présentent les changements annuels de précipitation et de température moyenne pour le bassin versant de la rivière Châteauguay, tel que vus par les différents MCG sélectionnés, pour 2020 et 2080. Les lignes pointillées représentent la moyenne de toutes les projections pour un horizon donné.

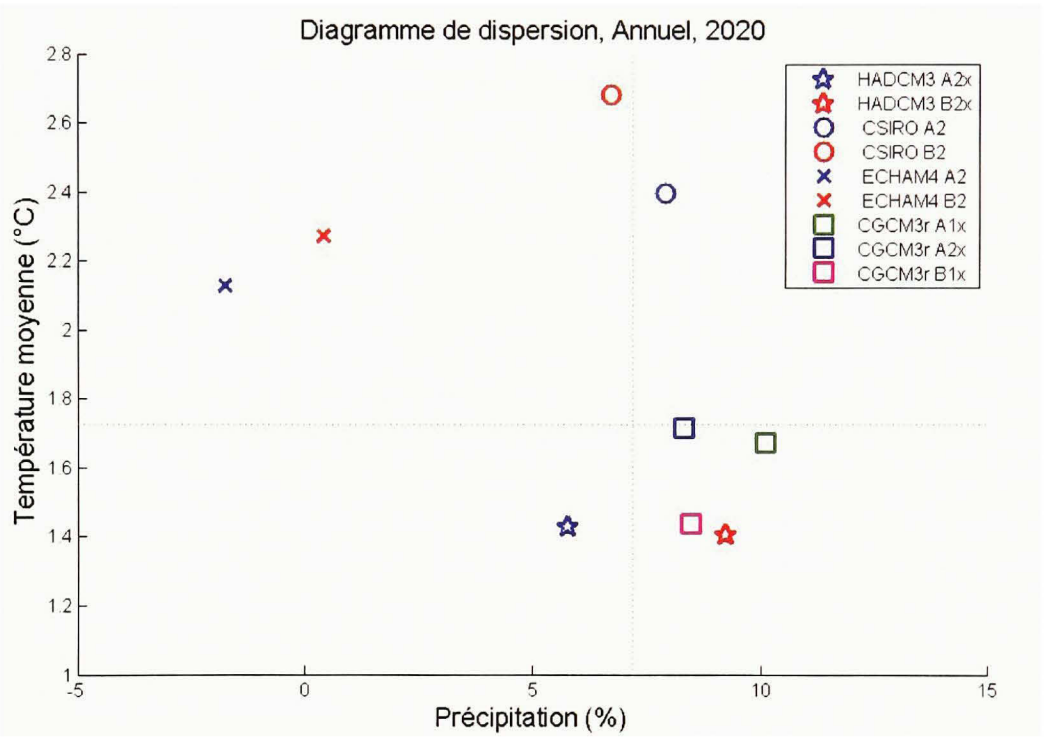


Figure 4.1 ***Diagramme de dispersion des changements de précipitation et de température moyenne pour le bassin versant de la rivière Châteauguay pour 2020.***

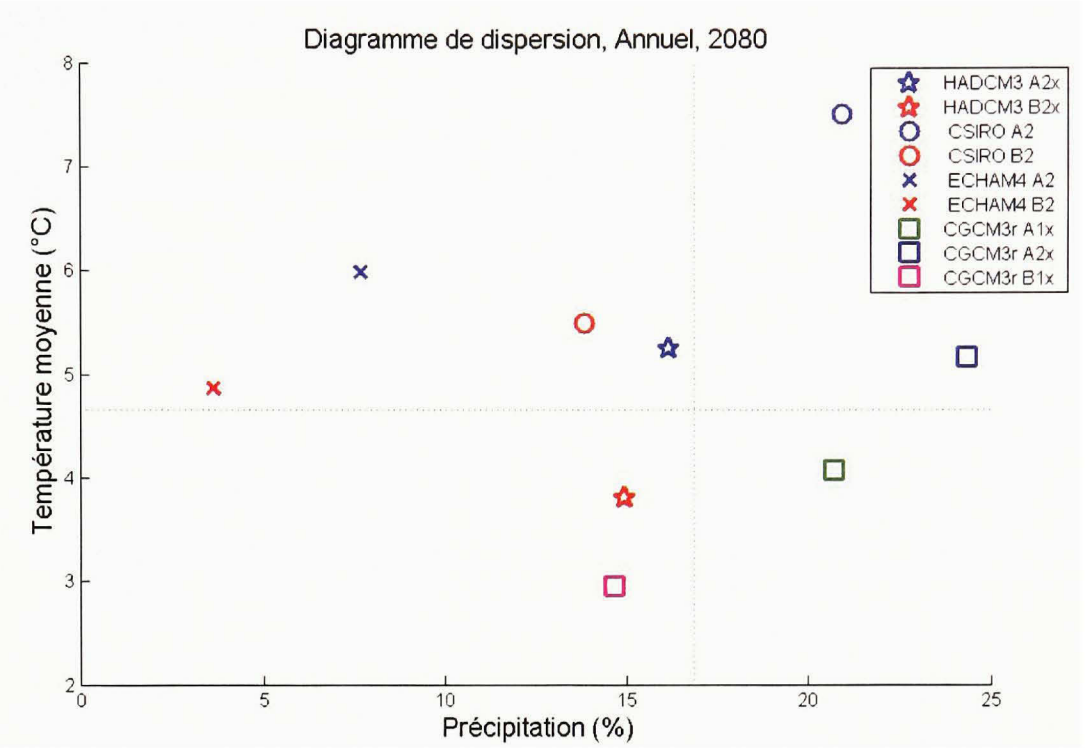


Figure 4.2 ***Diagramme de dispersion des changements de précipitation et de température moyenne pour le bassin versant de la rivière Châteauguay pour 2080.***

4.1.2 Région de référence

Pour fin de calculs, la Terre est vue par les MCG comme une succession de niveaux verticaux superposés découpés en tuiles d'environ 300 km par 300 km. C'est sur chacune de ces tuiles et à chaque pas de temps du modèle que les équations décrivant les processus atmosphériques, océaniques et terrestres sont calculés. Les calculs sont effectués en un point, appelé point de grille, situé au centre de la tuile et sont valides pour toute la tuile. Pour les études d'impacts régionaux, le GIEC recommande d'utiliser une région de référence qui contient plus qu'une tuile et idéalement plus de quatre (GIEC, 2001). L'utilisation d'une région de référence permet d'avoir une variabilité temporelle plus lissée en comparaison avec la valeur du point de grille le plus proche de la région étudiée (Chaumont *et al.*, 2005), mais on ajoute cependant une variabilité spatiale (Sottile, 2006). La figure 4.3 présente la région de référence superposée à la grille de chacun des MCG

sélectionné. Une attention particulière a été portée afin de ne sélectionner que des tuiles terrestres et c'est pourquoi il y a un découpage dans le coin sud-est de la zone dû à la définition du masque terre-mer du modèle CSIRO. La pondération des valeurs de température et de précipitation est fonction de la surface occupée par chaque tuile dans la région de référence.

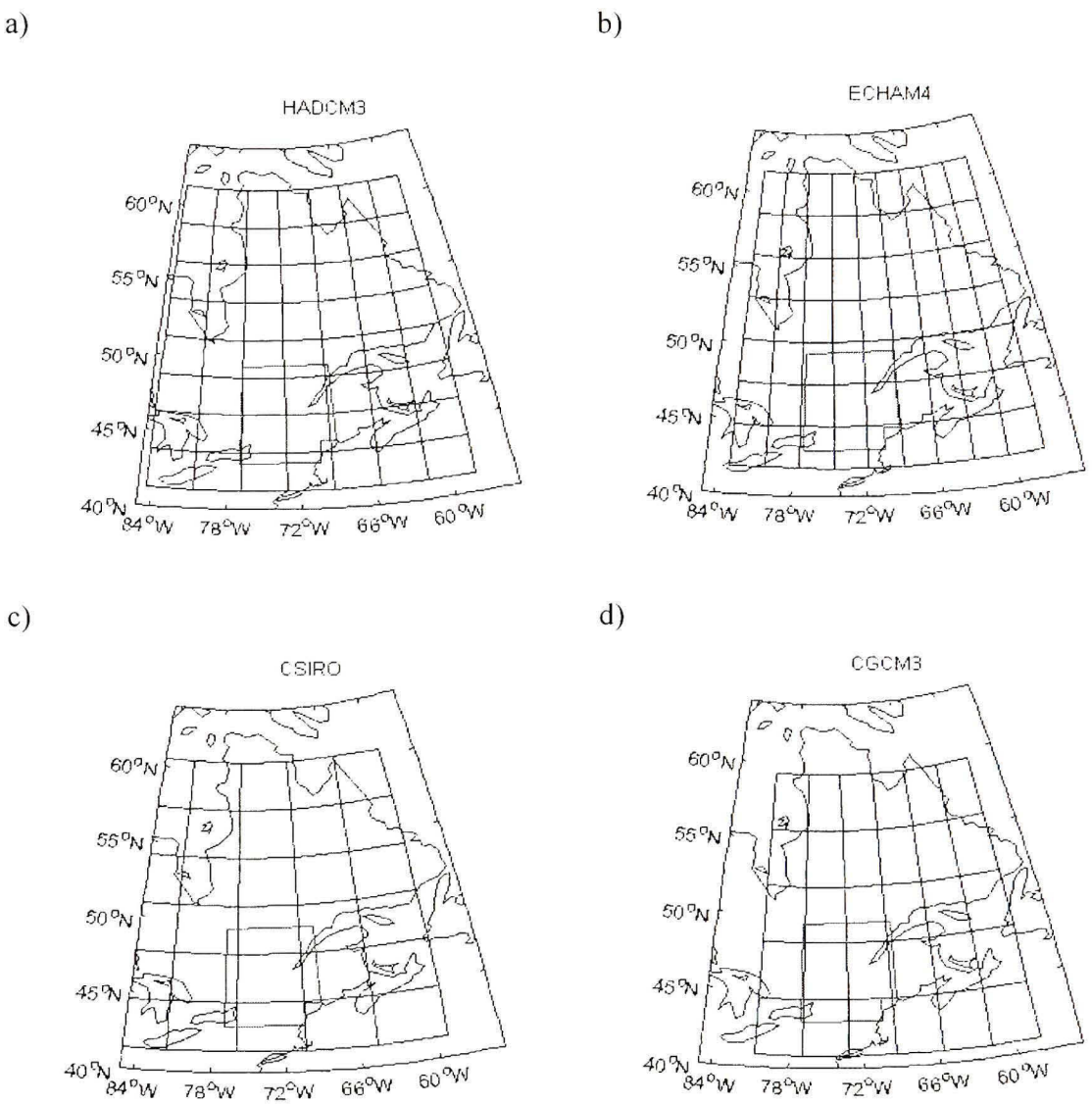


Figure 4.3 ***Grille des MCG sélectionnés et région de référence.***
(Figure fournie par D. Chaumont, 2006)

4.1.3 Sélection des scénarios et moyenne d'ensemble

Parmi la quarantaine de scénarios de GES développés par Nakicenovic et al. (2000) dans le SRES, le GIEC (2001) en recommande 6 en particulier pour les études d'impact. Les scénarios SRES commencent dès la fin du 20^{e} siècle, mais on ne peut vraiment voir leur effet qu'à partir du milieu du 21^{e} siècle. C'est donc dire que pour la première moitié du 21^{e} siècle, c'est la physique du modèle employé qui fait la plus grosse différence quant aux résultats obtenus (Sottile, 2006). Les deux scénarios les plus couramment utilisés, soit A2 et B2, sont utilisés lorsqu'ils étaient disponibles pour les modèles sélectionnés. Neufs projections différentes sont donc développées.

Pour les modèles CGCM3 et HadCM3, des simulations d'ensemble sont faites pour un même scénario et sont identifiées par un «x» après le nom du scénario. C'est-à-dire, que les conditions initiales de chaque simulation diffèrent légèrement pour un même forçage d'émission de gaz à effet de serre et pour une même simulation d'ensemble. La seule différence est donc le point de départ dans le climat de référence du modèle à partir duquel chaque expérience est amorcée. Pour ces deux modèles des moyennes d'ensemble sont faites dans le but de diminuer le «bruit» attribuable à la variabilité interne du modèle et de mettre l'emphase sur la réponse climatique du modèle face aux scénarios de changement climatique (Barrow *et al.*, 2004). La figure 4.4 illustre comment les conditions initiales des simulations peuvent influencer la réponse du changement climatique pour la région du bassin versant de la rivière Châteauguay.

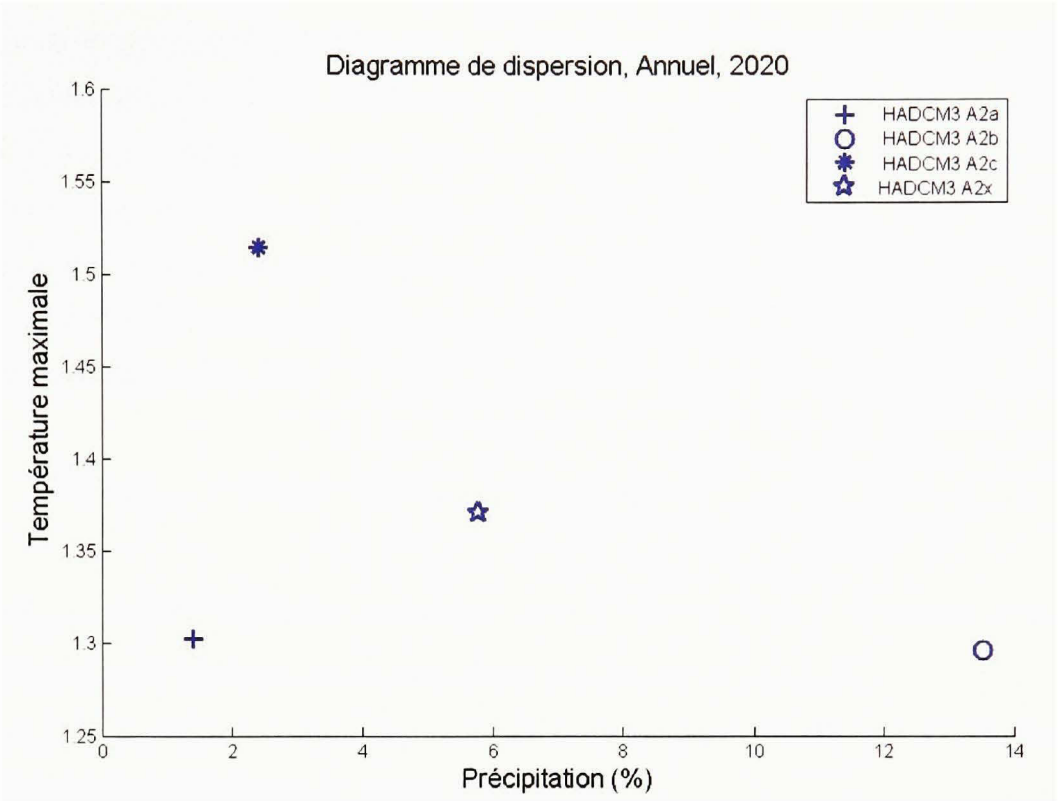


Figure 4.4 ***Moyenne d'ensemble de la température maximale annuelle et des précipitations annuelles pour le modèle HadCM3 pour la période 2020.***

4.1.4 Méthode des deltas

La méthode des deltas est une méthode simple et largement répandue dans le milieu des études d'impacts des changements climatiques afin de faire une mise à l'échelle spatiale des sorties des MCG (Barrow *et al.*, 2004) . Elle consiste à concevoir un scénario en perturbant une série de données historiques d'une ou plusieurs variables climatiques par une quantité, appelée delta. Les paragraphes suivants donnent des précisions sur la méthode employée pour les températures et les précipitations.

4.1.4.1 Température

Pour la température, le delta se calcule en soustrayant la température simulée par le MCG sur la période de référence actuelle (1961-1990) à celle simulée par le MCG pour la période

future de 30 ans, centrée sur 2020, 2050 et 2080. Cette étape permet d'éliminer en partie le biais systématique du MCG. On fait par la suite une moyenne mensuelle sur 30 ans, ce qui donne donc un delta mensuel. Une fois que le delta mensuel est déterminé, la météorologie du bassin est perturbée en additionnant le delta mensuel à la valeur journalière de la température pour les ramener ainsi à une échelle spatio-temporelle plus fine. La valeur des deltas a été fournie par Diane Chaumont du consortium Ouranos. Voici l'équation régissant les calculs (Chaumont, 2005) :

$$Tscen_{a+\Delta a,m,j} = (Tfutur_MCG_m - Tréférence_MCG_m) + Tobs_référence_{a,m,j} \quad (4.1)$$

où

$Tscen_{a+\Delta a,m,j}$ est la température quotidienne pour le jour j du mois m de l'année $a+\Delta a$ avec Δa le nombre d'années entre la période future et la période de référence.

$Tfutur_MCG_m$ est la moyenne mensuelle de la température simulée par un MCG sur un horizon et moyennée sur les 30 années de cet horizon.

$Tréférence_MCG_m$ est la moyenne mensuelle de la température simulée par un MCG sur la période de référence et moyennée sur les 30 années de cette période.

$Tobs_référence_{a,m,j}$ est la température de la météorologie représentative du bassin versant pour le jour j du mois m de l'an a de la période de référence.

4.1.4.2 Précipitation

La méthode diffère légèrement pour les précipitations, car le delta est exprimé en pourcentage. En effet, les précipitations futures simulées par le MCG sont divisées par les précipitations de la période de référence (1961-1990) du MCG. On fait une moyenne mensuelle sur 30 ans et on multiplie les précipitations de la météorologie à l'échelle du bassin par ce delta mensuel. Une étape supplémentaire est nécessaire dans le cas des précipitations pour discrétiser la pluie et la neige. Entre la température -2°C et 2°C, il n'est pas certain si les précipitations sont sous forme liquide ou solide quand l'humidité relative de l'air dépasse 75%. La figure 4.2 présente la répartition pluie/neige en fonction de la

température de l'air à 2 m du sol et de l'humidité relative de l'air. Pour pallier au fait que l'humidité relative n'est pas utilisé dans le modèle, une interpolation linéaire est faite pour déterminer l'état des précipitations quand la température moyenne journalière future est comprise entre -2°C et 2°C. Ce qui implique, à titre d'exemple, que pour une température moyenne future de 1°C, il y a donc 75% de pluie et 25% de neige.

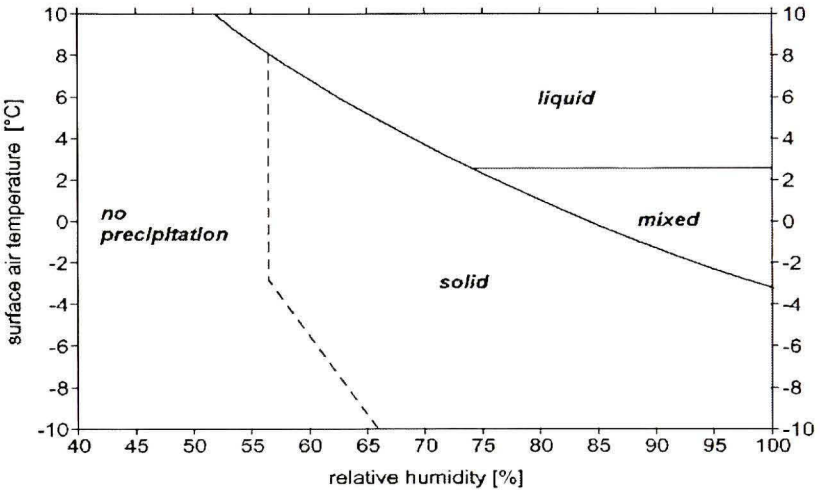


Figure 4.5 Répartition pluie/neige en fonction de la température de l'air à 2 m du sol et de l'humidité relative de l'air.
(Tiré de DWD, 1996)

Voici l'équation qui décrit les calculs effectués pour obtenir la météorologie future à l'échelle du bassin versant.

$$Pscen_{a+\Delta a,m,j} = \left(\frac{Pfutur_MCG_m}{Préférence_MCG_m}\right) \times Pobs_référence_{a,m,j} \qquad (4.2)$$

où

$Pscen_{a+\Delta a,m,j}$ est la précipitation quotidienne pour le jour j du mois m de l'année $a+\Delta a$ avec Δa le nombre d'années entre la période future et la période de référence.

$Pfutur_MCG_m$ est la moyenne mensuelle des précipitations simulées par un MCG sur un horizon et moyennée sur les 30 années de cet horizon.

$Préférence_MCG_m$ est la moyenne mensuelle des précipitations simulées par un MCG sur la période de référence et moyennée sur les 30 années de cette période.

$Pobs_référence_{a,m,j}$ est la précipitation de la météorologie représentative du bassin versant pour le jour j du mois m de l'an a de la période de référence.

4.2 Résultats des simulations futures

Après avoir modifié les séries climatiques représentatives de la climatologie du bassin-versant, celles-ci sont utilisées comme intrant au modèle hydrologique calé et validé au préalable. Des simulations sont faites pour chaque scénario sélectionné et ce pour les crues printanières et pour les crues estivales et automnales. Les sections suivantes présentent les résultats pour les scénarios de la famille A exclusivement et pour les périodes 2020 et 2080.

4.2.1 Crues printanières

Pour la période 2020, les débits de pointe du printemps changent peu par rapport au passé simulé. Les deltas, pour toutes les familles de scénarios confondues pour le printemps et pour 2020 sont en moyenne de l'ordre de 1.75° C et de 12% pour les précipitations tel que le montre la figure 4.6.

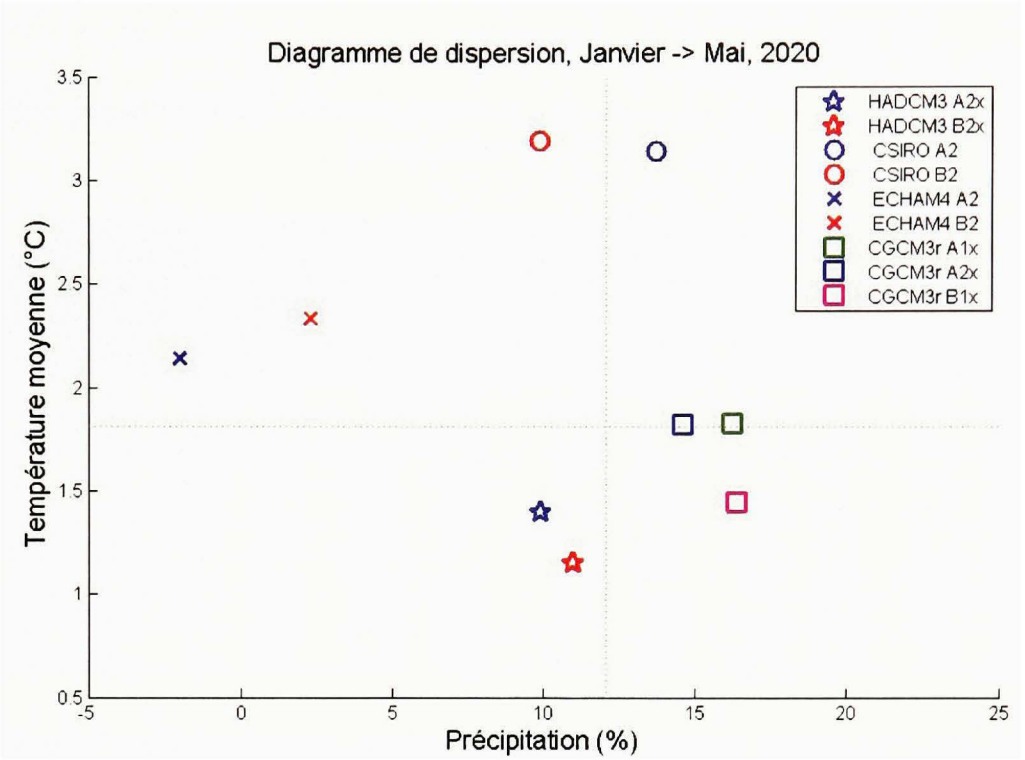


Figure 4.6 ***Diagramme de dispersion des deltas des différents scénarios pour le printemps (janvier à mai) 2020.***

Le tableau 4.2 présente les valeurs des débits pour le printemps 2020 pour les scénarios de la famille A ainsi que l'écart-type associé à chaque valeur. C'est le modèle CGCM3r qui présente la plus grande variation avec une augmentation de 14 % pour la crue centenaire, mais c'est également ce modèle qui génère la plus forte augmentation de l'écart-type. En effet, l'écart-type est augmenté de 25% par rapport aux données passées simulés pour la crue centenaire. Le modèle ECHAM4 indique, quant à lui, une diminution de 5% pour la crue centenaire avec une variation de l'écart-type de 5%. Le tableau 4.2 présente les valeurs de l'analyse fréquentielle des débits de pointes pour différentes périodes de retour pour les scénarios de la famille A.

Tableau 4.2

Analyse fréquentielle des débits de pointe simulés pour les crues printanières en 2020 pour les scénarios de la famille A

	Passé		Futur									
	Simulés		CGCM3r A2x		CGCM3r A1Bx		HadCM3 A2x		Echam4 A2		CSIRO A2	
Période de retour	Q (m^3/s)	Écart-Type (m^3/s)	Q (m^3/s)	Écart-Type (m^3/s)	Q (m^3/s)	Écart-Type (m^3/s)	Q (m3/s)	Écart-Type (m^3/s)	Q (m3/s)	Écart-type	Q (m3/s)	Écart-Type (m^3/s)
200	1020	102	1180	128	1160	117	1100	117	977	108	1070	117
100	939	89.6	1070	112	1070	103	1010	102	889	94.2	978	102
50	855	76.9	968	96.3	974	88.3	911	87.7	801	80.9	883	88
20	744	60.2	827	75.4	846	69.1	784	68.7	684	63.3	756	68.9
10	658	47.7	718	59.7	747	54.7	686	54.3	594	50.1	658	54.5
5	568	35.3	604	44.2	645	40.5	584	40.2	500	37.1	555	40.4
3	497	26.6	514	33.3	563	30.6	502	30.4	425	28	474	30.5
2	433	21	433	26.2	489	24.1	429	23.9	357	22	400	24

La figure 4.7 présente les hydrogrammes moyens des données simulées pour les différents scénarios utilisés. À noter que les paramètres utilisés pour ces simulations ne sont valides que pour les mois de janvier à mai et ont été optimisés pour être représentatifs des crues printanières.

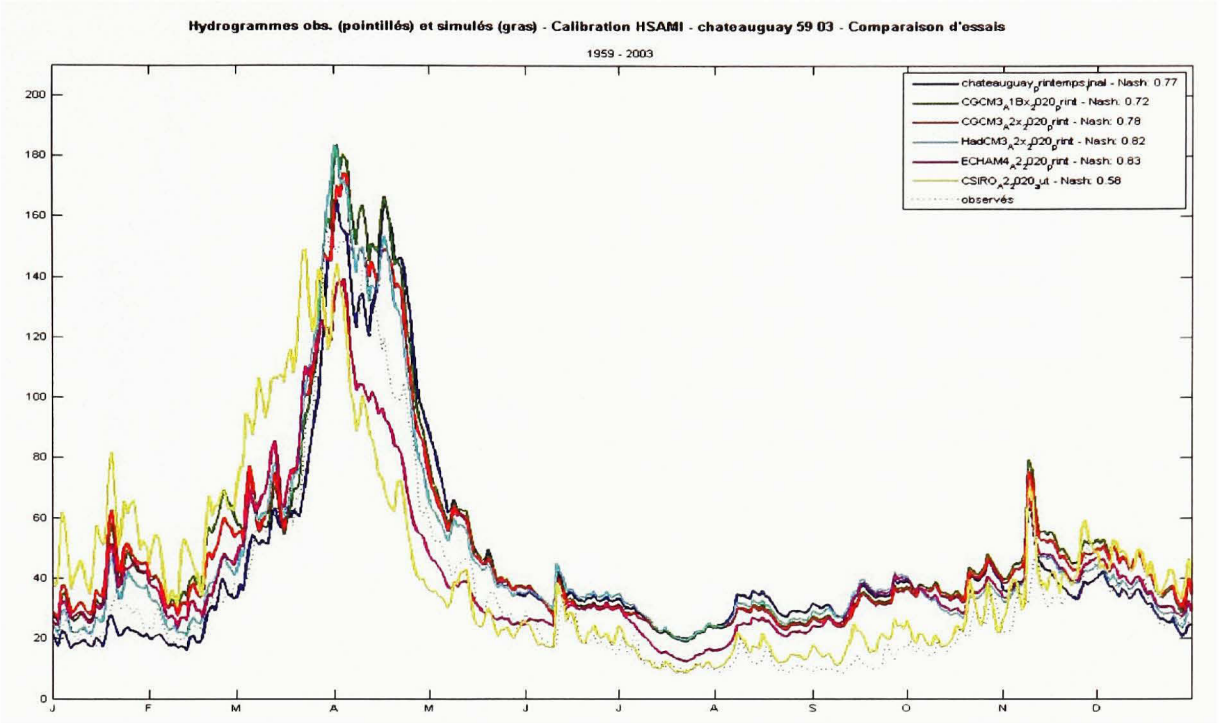


Figure 4.7 ***Hydrogrammes moyens des données simulées pour les crues printanières en 2020 pour les scénarios de la famille A.***

Pour 2080, les deltas sont plus importants avec une augmentation moyenne de la température moyenne de 5°C entre les mois de janvier à mai. L'augmentation des précipitations est de l'ordre de 30% en moyenne pour tous les scénarios, toutes familles confondues. Il y a cependant beaucoup de dispersion d'un scénario à l'autre. Seul le modèle CSIRO avec le scénario A2 simule une augmentation de température supérieure à 7°C.

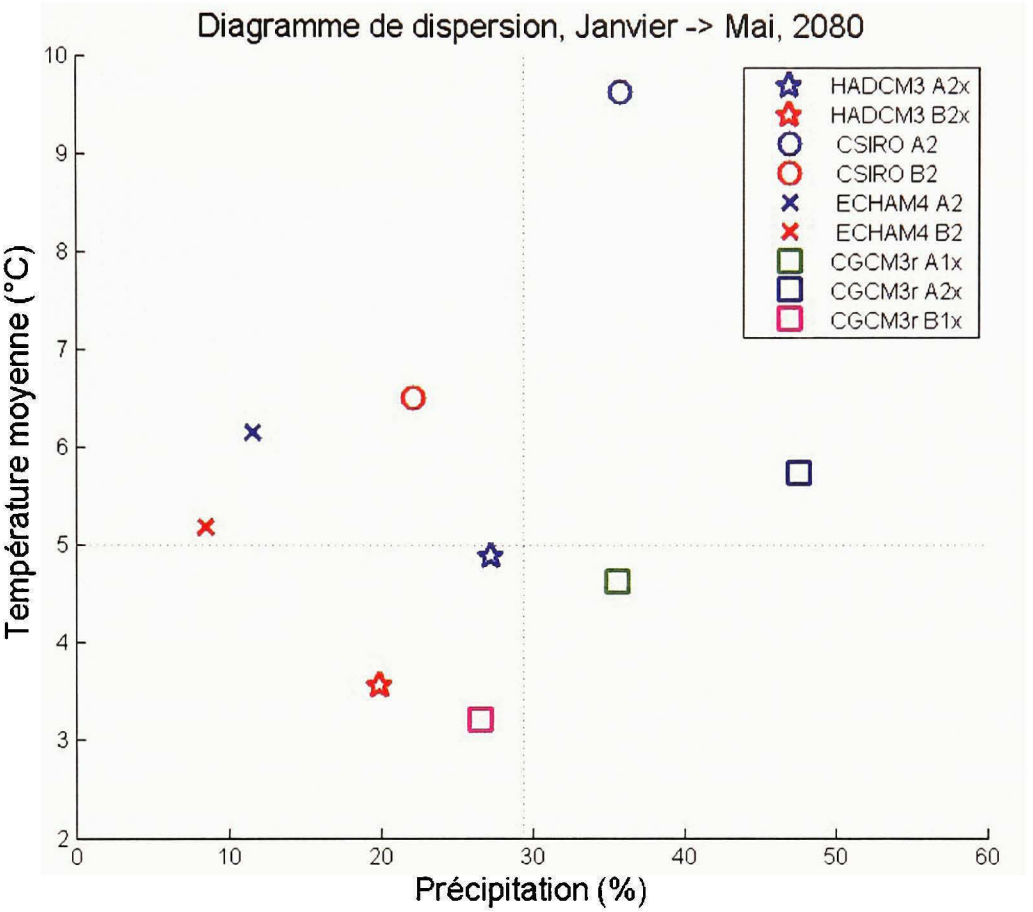


Figure 4.8 ***Diagramme de dispersion des deltas des différents scénarios pour le printemps (janvier à mai) 2080.***

Le tableau 4.3 présente les résultats de l'analyse fréquentielle des débits de pointes des crues printanières pour plusieurs périodes de retour pour 2080. C'est encore le modèle CGGM3 qui présente la plus forte augmentation des valeurs des débits de pointe. En effet, les débits centenaires sont augmentés de 30% pour le scénario A1Bx, mais l'incertitude sur la valeur est également augmentée de 48%. L'incertitude pour tous les scénarios est nettement augmentée sauf pour le modèle ECHAM4 qui n'augmente que d'environ 8% pour toutes les périodes de retour. Le modèle CSIRO donne, quant à lui, une forte diminution de 87.33% sur le débit centenaire et l'écart-type est alors augmenté de 776%.

Tableau 4.3

Analyse fréquentielle des débits de pointe simulés pour les crues printanières en 2080 pour les scénarios de la famille A.

	Passé		Futur									
	Simulés		CGCM3r A2x		CGCM3r A1Bx		HadCM3 A2x		Echam4 A2		CSIRO A2	
Période de retour	Q (m^3/s)	Écart-Type (m^3/s)	Q (m^3/s)	Écart-Type (m^3/s)	Q (m^3/s)	Écart-Type (m^3/s)	Q (m^3/s)	Écart-Type (m^3/s)	Q (m^3/s)	Écart-Type (m^3/s)	Q (m^3/s)	Écart-Type (m^3/s)
200	1020	102	1310	145	1340	152	1180	130	936	110	135	862
100	939	89.6	1190	127	1220	133	1080	114	846	96.6	119	785
50	855	76.9	1070	109	1090	114	972	98	756	82.9	102	708
20	744	60.2	915	85.3	929	89.3	830	76.7	636	64.9	79.7	604
10	658	47.7	793	67.5	802	70.7	720	60.8	544	51.4	63.1	523
5	568	35.3	666	50	669	52.4	606	45	447	38.1	46.7	436
3	497	26.6	565	37.7	563	39.5	515	33.9	370	28.7	35.2	364
2	433	21	475	29.7	468	31.1	433	26.7	301	22.6	27.7	294

La figure 4.9 présente les hydrogrammes des données simulées pour les différents scénarios utilisés de la famille A. Les paramètres utilisés pour ces simulations ne sont valides que pour les mois de janvier à mai et ont été optimisés pour être représentatifs des crues printanières.

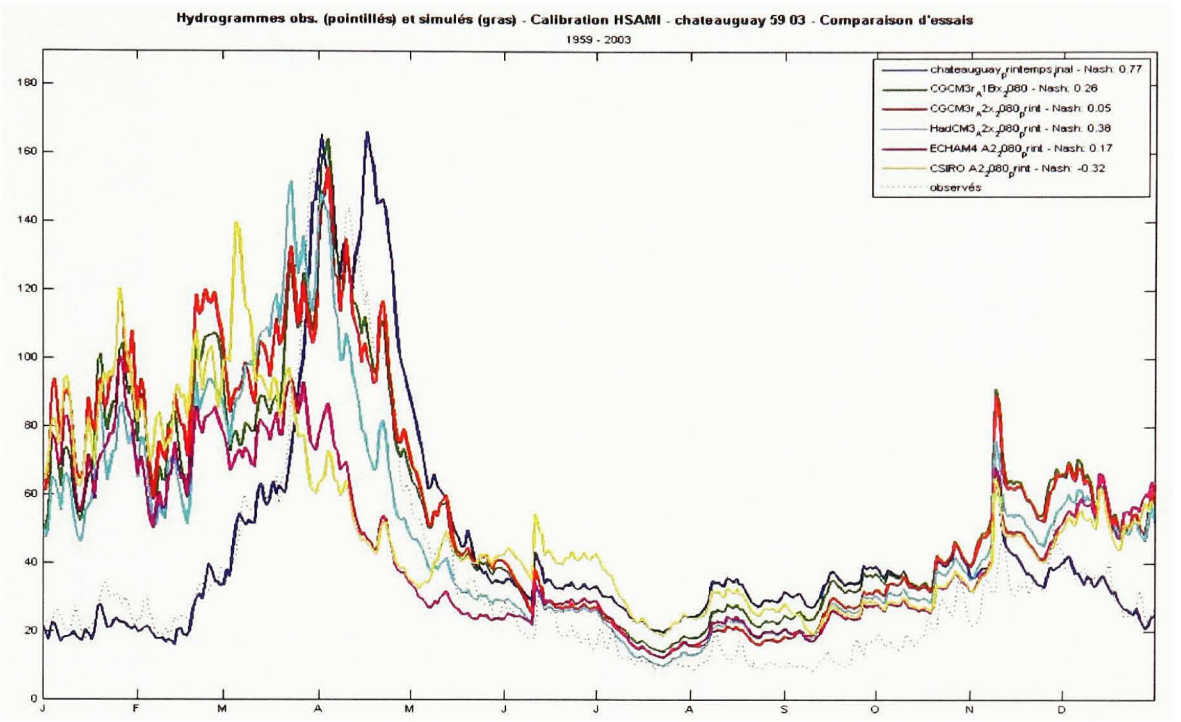


Figure 4.9 ***Hydrogrammes moyens des données simulées pour les crues printanières en 2080 pour les scénarios de la famille A.***

4.2.2 Crues estivales et automnales

Tout comme les crues printanières, les crues estivales et automnales changent peu pour la période 2020. La majorité des modèles sont consistants entre eux avec un changement moyen de 1.65°C et une augmentation des précipitations d'environ 3%. Les modèle CSIRO et HadCM3 simulent des hausses plus importantes de précipitation que les autres modèles. La figure 4.10 présente les deltas pour tous les scénarios sélectionnés.

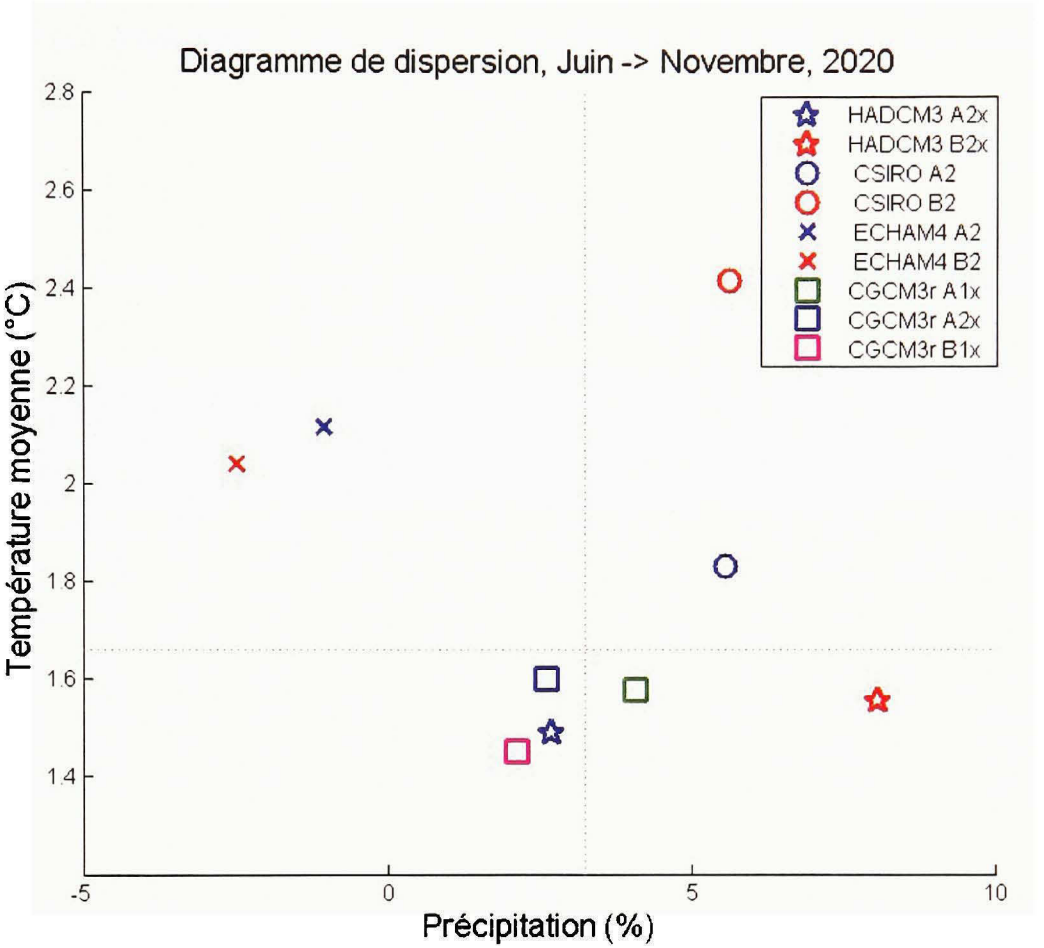


Figure 4.10 ***Diagramme de dispersion des deltas des différents scénarios pour l'été et l'automne (juin à novembre) 2020.***

Pour tous les MCG, sauf le modèle CSIRO, les résultats de l'analyse fréquentielle nous montre une diminution des débits de pointe (tableau 4.4). Le modèle ECHAM4 prévoit la plus forte diminution de la crue centenaire avec 15% avec une diminution de l'écart-type de 13%. Le modèle CSIRO prévoit une légère augmentation des débits centenaires de l'ordre de 4% avec une augmentation de la variance de 5%

La figure 4.11 présente les hydrogrammes pour tous les scénarios de la famille A. L'utilisation des moyennes d'ensemble de plusieurs projections est privilégiée lorsqu'elles sont disponibles. Les paramètres utilisés pour ces simulations ne sont valides que pour les

mois de juin à novembre et sont optimisés pour être représentatifs des crues estivales et autnomales.

Tableau 4.4

Analyse fréquentielle des débits de pointe simulés pour les crues estivales et automnales en 2020 pour les scénarios de la famille A

	Passé		Futur									
Période de retour	Simulés		CGCM3r A2x		CGCM3r A1Bx		HadCM3 A2x		Echam4 A2		CSIRO A2	
	Q (m^3/s)	Écart-type	Q (m^3/s)	Écart-type	Q (m^3/s)	Écart-type	Q (m^3/s)	Écart-type	Q (m^3/s)	Écart-type	Q (m^3/s)	Écart-type
200	923	227	830	206	858	213	881	216	789	200	957	238
100	759	173	680	157	703	162	724	164	644	151	785	181
50	612	127	548	115	566	119	585	122	517	111	632	133
20	444	80.3	396	72.4	409	74.9	424	76.6	371	69.2	456	83.5
10	334	53	296	47.7	306	49.3	319	50.6	276	45.3	342	55
5	236	32.3	209	28.9	216	29.9	226	30.8	193	27.3	241	33.3
3	171	21	151	18.7	155	19.3	164	20	138	17.5	174	21.5
2	122	14.3	107	12.7	110	13.1	117	13.7	97.6	11.8	123	14.6

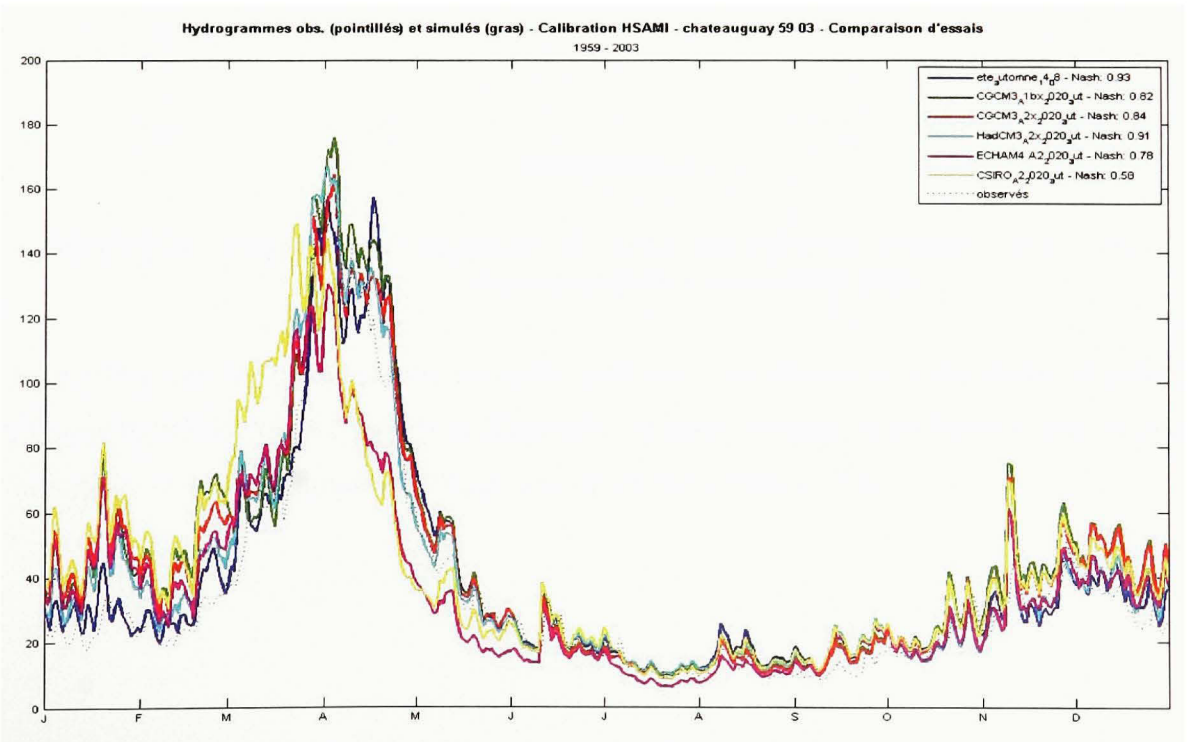


Figure 4.11 ***Hydrogrammes moyens des données simulées pour les crues estivales et automnales en 2020 pour les scénarios de la famille A.***

Pour la période centrée sur 2080, les modèles présentent un large spectre de changement. En moyenne, les modèles prévoient une augmentation d'environ 4.5°C et une augmentation des précipitation d'environ 5 %. Les modèles ECHAM4-B2 et CGCM3r B11 simulent des baisses des précipitations entre les mois de juin et novembre.

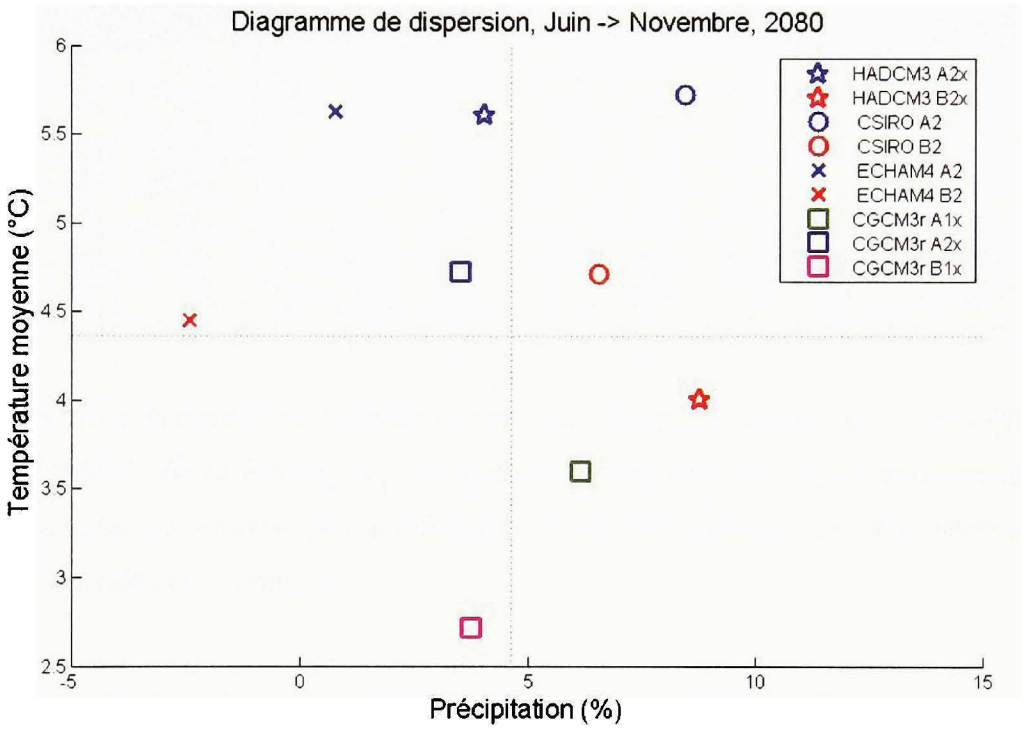


Figure 4.12 ***Diagramme de dispersion des deltas des différents scénarios pour l'été et l'automne (juin à novembre) 2080.***

Pour 2080, tous les modèles sans exception prévoient des diminutions des débits de pointe. Le modèle ECHAM4 A2 prévoit la diminution la plus marquée, avec 35.84% pour la crue centenaire et une diminution de l'écart-type de 36.42% (tableau 4.5).

Tableau 4.5

Analyse fréquentielle des débits de pointe simulés pour les crues estivales et automnales en 2080 pour les scénarios de la famille A

	Passé		Futur									
Période de retour	Simulés		CGCM3r A2x		CGCM3r A1Bx		HadCM3 A2x		Echam4 A2		CSIRO A2	
	Q (m^3/s)	Écart-type	Q (m^3/s)	Écart-type	Q (m^3/s)	Écart-type	Q (m^3/s)	Écart-type	Q (m^3/s)	Écart-type	Q (m^3/s)	Écart-type
200	923	227	712	182	765	189	648	161	593	145	876	212
100	759	173	580	137	628	144	532	122	487	110	722	162
50	612	127	464	101	506	106	429	90	394	81.6	584	120
20	444	80.3	332	62.6	366	66.7	310	56.6	286	51.5	425	76
10	334	53	247	40.8	274	43.9	232	37.2	215	34	321	50.3
5	236	32.3	172	24.5	194	26.7	164	22.6	152	20.8	228	30.8
3	171	21	123	15.7	140	17.3	118	14.6	110	13.5	166	20
2	122	14.3	86.3	10.5	99.5	11.7	84.1	9.94	78.9	9.21	119	13.7

La figure 4.13 présente les hydrogrammes des données simulées pour les différents scénarios utilisés de la famille A. Les paramètres utilisés pour ces simulations ne sont valides que pour les mois de juin à novembre et ont été optimisés pour être représentatifs des crues estivales et automnales.

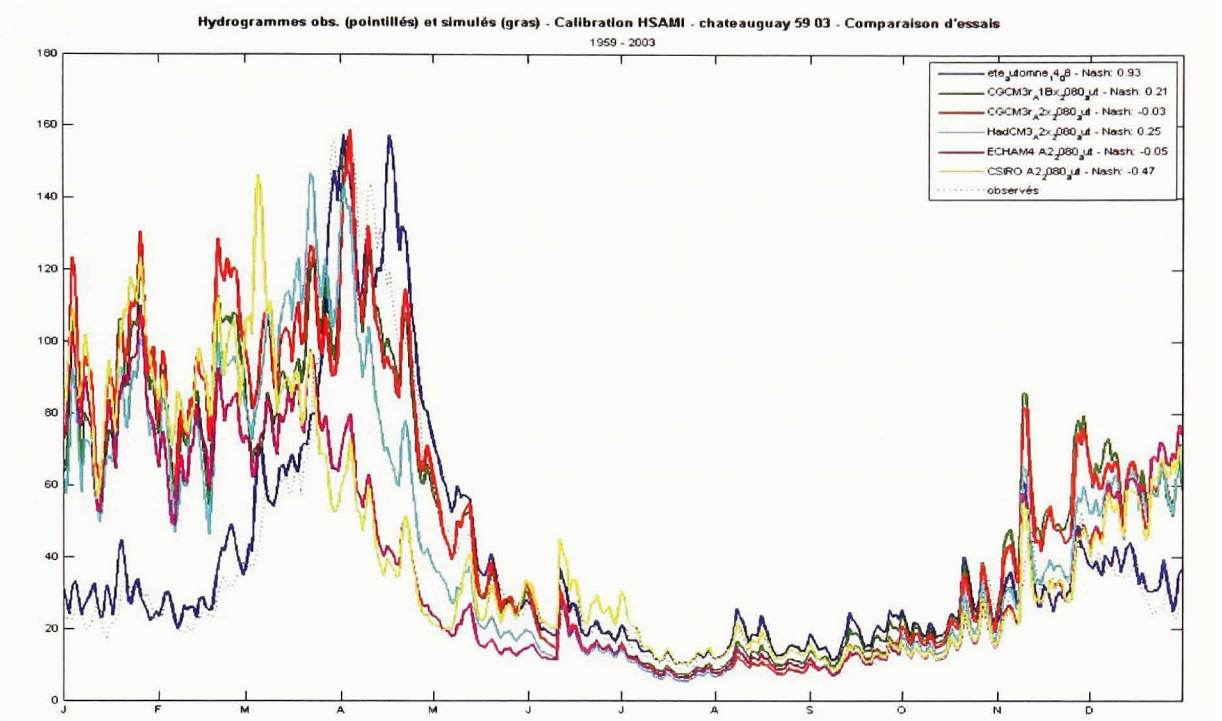


Figure 4.13 ***Hydrogrammes moyens des données simulées pour les crues estivales et automnales en 2080 pour les scénarios de la famille A.***

CHAPITRE 5

MODÉLISATION HYDRAULIQUE ET CARTOGRAPHIE

Les débits dans la rivière sont trouvés précédemment grâce à la modélisation hydrologique du bassin versant. Cependant, pour évaluer la modification des plaines inondables en contexte de changements climatiques, les niveaux d'eau sont un élément primordial. La modélisation hydraulique d'un tronçon de la rivière permet de déterminer les hauteurs d'eau atteintes par l'écoulement. Les sections suivantes présentent toutes les étapes de cette modélisation hydraulique.

5.1 Description du modèle hydraulique

Dans le cadre de cette étude, les hauteurs d'eau atteintes sont calculées à l'aide du logiciel HEC-RAS (River Analysis System) version 4.0 Beta. Développé par le *Hydrologic Engineering Center* (HEC) du *U.S Army Corps of Enginneers*, le logiciel est utilisé par le Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ) et par plusieurs firmes d'ingénierie au Québec. La version 4.0 Beta a été lancée en novembre 2006 et comporte plusieurs nouveautés, dont un module de géoréférencement des tronçons de rivière. HEC-RAS est conçu pour exécuter des calculs hydrauliques unidimensionnels pour un réseau complet de canaux naturels ou artificiels et permet de simuler les écoulements en surface libre graduellement variés et rapidement variés. Les paragraphes suivants décrivent les principales fonctionnalités du logiciel.

Le logiciel permet de simuler des écoulements permanents et non-permanents pour un réseau de canaux naturels ou artificiels, un réseau dendritique ou un simple tronçon de rivière. Pour cette étude, les analyses hydrauliques sont faites en régime permanent et les explications sont axées vers ce type de régime. Les analyses pour les écoulements constants dans le temps peuvent être en régime infracritique, supercritique ou en régime mixte. Un écoulement infracritique est caractérisé par des ondes de gravité qui se propagent vers l'aval

et vers l'amont en raison d'une obstruction dans le tronçon de rivière, tel un pont, une digue etc. Pour un observateur qui se situerait sur une berge du canal, le déplacement net de l'onde serait vers l'amont (Leconte, 1999). La condition à la frontière à spécifier dans le logiciel pour ce type d'écoulement est donc en aval. Pour un écoulement supercritique, la propagation de l'onde se fait vers l'aval seulement et on doit donc préciser la condition à la frontière amont. On est en présence d'un régime mixte, si, par exemple, il y a un régime d'écoulement supercritique dans la rivière, alors qu'il y a, en même temps, un régime d'écoulement infracritique dans la plaine inondable. Une condition aux frontières aval et amont est alors nécessaire.

Le modèle résout les équations de Saint Venant pour un écoulement unidimensionnel. L'équation (5.1) exprime la loi de conservation de la masse et l'équation (5.2) décrit la quantité de mouvement.

$$B\frac{\partial y}{\partial t}+\frac{\partial Q}{\partial x}=q_L \tag{5.1}$$

$$\frac{1}{g}\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{\partial H}{\partial x}+S_f=0 \tag{5.2}$$

Où Q est le débit, y la hauteur d'eau, q_L les apports latéraux d'eau dans le tronçon de rivière, H l'énergie totale de l'écoulement, v sa vitesse, S_f la pente de la ligne d'énergie, x la distance le long du tronçon et t le temps. Le modèle HEC-RAS suppose que la pente de la ligne d'énergie est constante entre 2 sections.

Pour les débits constants dans le temps, les équations (5.1) et (5.2) se simplifient :

$$\frac{\partial Q}{\partial x}=q_L \tag{5.3}$$

$$\frac{\partial H}{\partial x}+S_f=0 \tag{5.4}$$

La dernière équation stipule que les pertes d'énergie à l'intérieur du tronçon sont égales à la variation d'énergie totale entre le début et la fin du tronçon de rivière (Leconte, 1999). Les pertes d'énergie sont estimées par friction et par contractions/expansions. Pour les écoulements non permanents, les calculs sont faits à partir du modèle adapté UNET développé par le HEC qui permet de simuler des régimes d'écoulement infracritique. La version 4.0 Beta peut maintenant simuler des régimes d'écoulement mixte. L'effet d'ouvrage tels les ponts, les barrages, les déversoirs, etc. peut être évalué pour les débits constants dans le temps ou non. Les modules de transport des sédiments, de qualité de l'eau ainsi que les fonctions servant à la conception d'ouvrages hydrauliques n'ont pas été utilisés dans le cadre de cette recherche.

5.2 Section à l'étude

La section de la rivière à l'étude commence à l'embouchure de la rivière des Anglais et se poursuit sur environ 6 km en aval jusqu'au pont-route 132. La figure 5.1 présente le secteur à l'étude ainsi que les sections perpendiculaires à l'écoulement. Il n'y a aucun tributaire important dans le secteur à l'étude et on considère que l'apport de la Rivière des fèves est négligeable sur les valeurs de débits obtenus en aval de la section. En aval, la hauteur d'eau est contrôlée par un barrage et un déversoir qui sont situés tout juste après le pont-route de Ste-Martine. La majorité des habitations se trouvent sur la rive droite de la rivière, telle qu'illustrée à la figure 5.1, alors que les berges de la rive gauche sont surtout utilisées à des fins agricoles. La section choisie est pratiquement une plaine avec moins d'un mètre de dénivelée entre l'amont et l'aval de la section. Les dix-sept sections transversales qui découpent le tronçon de rivière ont été sélectionnées selon la topographie et la localisation du pont-route (Boucher *et al.*, 1990).

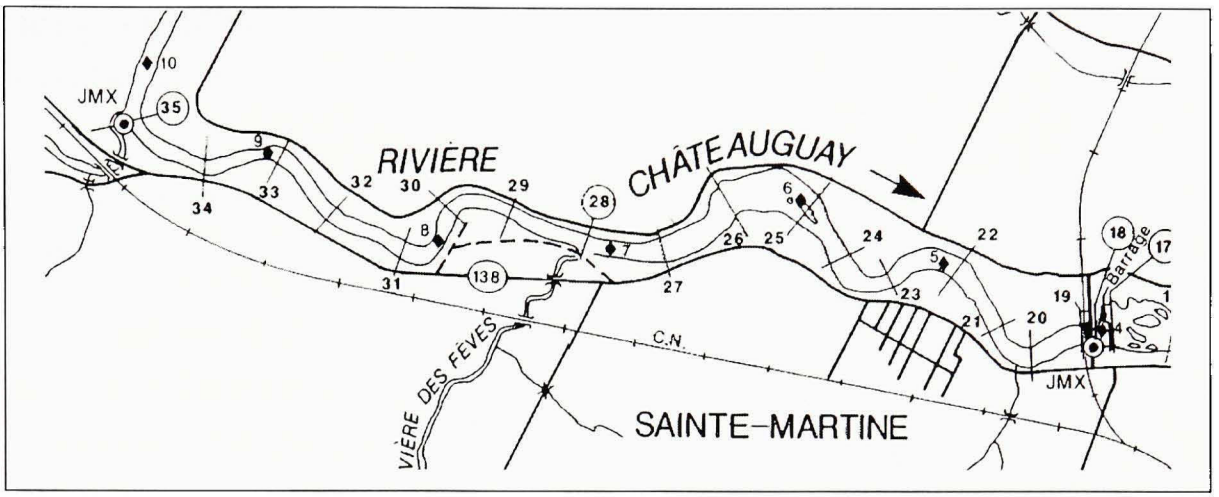


Figure 5.1 ***Secteur de la rivière utilisé pour l'étude hydraulique.***
(Tiré de Boucher et al., 1990)

Pour chacune des sections transversales, le profil du lit de la rivière fut établi par écho-sonde ou par arpentage (Boucher *et al.*, 1990). Le modèle de la rivière est une gracieuseté du CEHQ. Le choix des conditions aux frontières peut s'avérer très important pour la qualité des résultats obtenus. En effet, aucune condition aux frontières n'était spécifiée dans le modèle original, et lors des premières simulations avec le modèle hydraulique celui-ci n'arrivait pas à générer des hauteurs d'eau conformes à la réalité du terrain. Une courbe de tarage, tirée du rapport MH-90-09 du CEHQ, a donc été ajoutée au modèle original à la condition à la frontière aval du tronçon étant donné la présence du seuil qui occasionne une différence d'environ 4 mètres sur la ligne d'eau (Boucher *et al.*, 1990). Habituellement, la courbe de tarage est établie à l'aide de mesures de niveau d'eau prises simultanément avec des jaugeages permettant d'évaluer le débit au même moment. L'ajout de cette courbe (Annexe III) a permis d'obtenir les mêmes résultats d'hauteur d'eau que celles obtenues lors du calage du modèle par le CEHQ. La vérification du modèle s'est fait à l'aide du rapport MH9009 du CEHQ. La vérification des niveaux d'eau a été faites à trois sections (15, 26, 32) entre les résultats obtenus dans le rapport MH9009 et le modèle fourni a permis de valider que le modèle reproduisait bien la réalité pour les crues de 20 ans et 100 ans telles que déterminées à l'époque par

le rapport MH9009 du CEHQ. L'annexe IV présente les hauteurs d'eau générées par les débits de 20 et 100 ans à ces trois sections.

Pour les études de changements climatiques, puisque les résultats du modèle hydrologique sont des débits à l'exutoire, une transposition des débits au site à l'étude a été nécessaire. Une règle de trois a été utilisée pour trouver le débit à Ste-Martine en multipliant le rapport des aires de drainage au débit à l'exutoire (tableau 5.1). D'autres méthodes existent pour calculer la transposition des débits à un site, mais elles n'ont pas été appliquées dans le cadre de cette étude puisque les deux sites sont très proches et très en aval sur la rivière. Les débits entrés sont considérés valides sur tout le tronçon de rivière, c'est-à-dire que le débit ne change pas entre l'amont et l'aval de la section.

Tableau 5.1

Débits observés et simulés transposés à Ste-Martine pour les crues de 20 ans et 100 ans

	Climat présent			
	Observés		Simulés	
Crues	Débit à l'exutoire (m^3/s)	Débit à Ste-Martine (m^3/s)	Débit à l'exutoire (m^3/s)	Débit à Ste-Martine (m^3/s)
20 ans	761	715	744	699
100 ans	988	923	939	883

5.3 Résultats de la modélisation hydraulique des débits simulés

L'étude hydraulique a porté exclusivement sur les crues printanières, parce que c'est pour ce type de crues que les changements climatiques ont le potentiel d'avoir l'impact le plus négatif sur les plaines inondables du bassin versant. Pour les crues d'été et d'automne les simulations, avec la méthode des deltas, indiquent que les plaines inondables devraient diminuer dans le futur. Les débits simulés par HSAMI (*voir* Chapitre 3) sont entrés dans le simulateur hydraulique. Cette étape est nécessaire pour une comparaison ultérieure entre les

données simulées et futures. En effet, le fait d'utiliser les hauteurs d'eau issues des débits simulés permet d'éliminer le biais systématique du modèle hydrologique lorsque ces hauteurs d'eau sont comparées à celles de scénarios futurs.

La simulation a été faite en régime permanent et les valeurs des débits simulés transposés à Ste-Martine pour les crues de 20 et 100 ans ont été utilisées. La figure 5.2 présente les hauteurs d'eau ainsi que les profondeurs critiques générées par les débits simulés de 20 et 100 ans pour tout le tronçon.

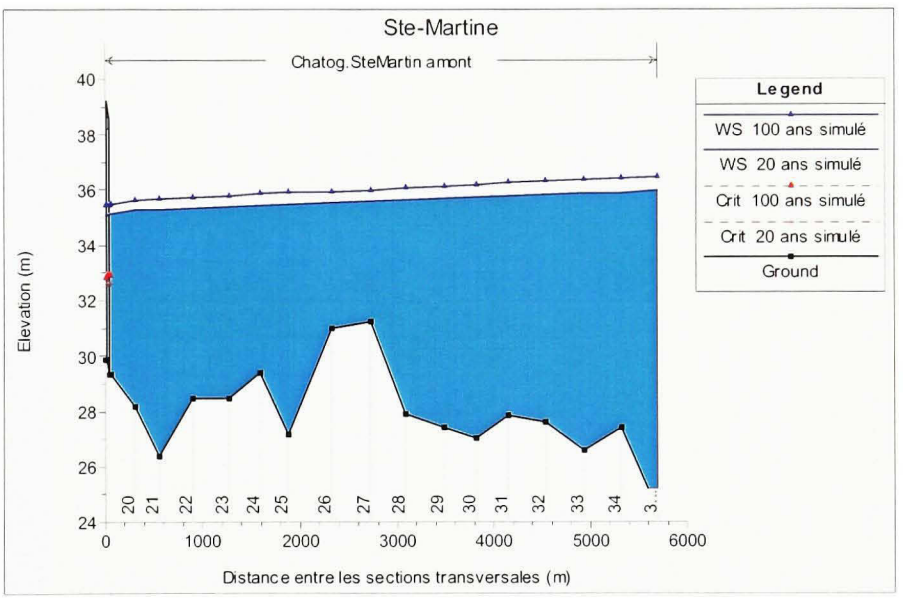


Figure 5.2 ***Graphique de la hauteur d'eau et de la profondeur critique générées par les débit de 20 et 100 ans, tel que simulés par HSAMI.***

La crue de 20 ans génère une hauteur d'eau maximale de 35.96m à la section 35. La largeur maximale de la plaine inondable est de 306.9 m à la section 25. Pour la crue de 100 ans, la hauteur d'eau maximale est atteinte en amont du tronçon avec une hauteur de 36.46 m et la vitesse maximale de l'écoulement de 2.05 m/s est obtenue en aval, juste avant le pont-route. Le tableau 5.2 présente un résumé de l'analyse hydraulique effectuée pour les crues de 20 et 100 ans.

Tableau 5.2

Résumé de l'analyse hydraulique pour les débits simulés des périodes de récurrence 20 et 100 ans

	20 ans				100 ans			
Section transversale	**Q Total**	**Elev eau**	**vitesse**	**Largeur de la plaine**	**Q Total**	**Elev. eau**	**Vitesse**	**Largeur de la plaine**
	(m^3/s)	(m)	(m/s)	(m)	(m^3/s)	(m)	(m/s)	(m)
35	699.36	**35.96**	1.14	117.09	882.66	**36.46**	1.35	126.58
34	699.36	35.9	1.34	167.89	882.66	36.39	1.54	173.69
33	699.36	35.87	1.2	137.66	882.66	36.35	1.4	152.54
32	699.36	35.82	1.25	173.39	882.66	36.3	1.43	178.7
31	699.36	35.81	0.97	156.65	882.66	36.28	1.12	167.71
30	699.36	35.72	1.41	112.42	882.66	36.16	**1.66**	116.47
29	699.36	35.67	1.35	117.74	882.66	36.11	1.56	124.2
28	699.36	35.63	1.16	134.67	882.66	36.06	1.36	147.57
27	699.36	35.56	1.27	167.35	882.66	35.99	1.42	169.97
26	699.36	35.52	0.94	206.08	882.66	35.94	1.06	218.09
25	699.36	35.49	0.72	**306.9**	882.66	35.91	0.82	**314.6**
24	699.36	35.46	0.85	241.06	882.66	35.87	0.98	246.52
23	699.36	35.38	1.3	235.96	882.66	35.77	1.49	238.64
22	699.36	35.35	1.04	192.88	882.66	35.74	1.22	195.09
21	699.36	35.32	1.04	121.57	882.66	35.69	1.23	122.92
20	699.36	35.28	1.12	167.4	882.66	35.64	1.32	170.3
19	699.36	35.15	1.65	99.96	882.66	35.47	1.94	100.1
18.75	699.36	35.13	**1.74**	93.6	882.66	35.44	**2.05**	93.6
18.5	Pont							
18.25	699.36	35.12	1.72	95	882.66	35.43	2.03	95
18	699.36	35.12	1.65	99	882.66	35.43	1.95	99

5.4 Scénarios de changements climatiques sélectionnés

Tous les scénarios de changements climatiques présentés au chapitre 4 proposent des évolutions différentes du climat. Dans le but de ratisser large et également de démontrer l'incertitude associée à ces projections, deux scénarios «extrêmes» ont été choisis et la période centrée sur 2080 a été sélectionnée. Les scénarios proviennent de la même famille, soit la famille A. Le modèle CGCM3 avec le scénario A1Bx a été sélectionné, car c'est celui qui générait les débits les plus importants pour la période 2080. À l'inverse, le modèle

Echam4 avec le scénario A2 générait les débits les plus faibles pour la même période (tableau 5.3).

Tableau 5.3

Débits observés et simulés transposés à Ste-Martine pour les crues de 20 ans et 100 ans pour la période 2080

	Scénarios futurs			
	CGCM3 A1Bx		Echam4 A2	
Crues	Débit à l'exutoire (m^3/s)	Débit à Ste-Martine (m^3/s)	Débit à l'exutoire (m^3/s)	Débit à Ste-Martine (m^3/s)
20 ans	929	873.26	636	597.84
100 ans	1220	1146.8	846	795.24

5.5 Résultats de la modélisation hydraulique des débits futurs

Les deux simulations ont été faites en régime permanent avec un écoulement infracritique. Les valeurs des débits des deux scénarios transposés à Ste-Martine pour les crues de 20 et 100 ans ont été utilisées.

5.5.1 Projection CGCM3r A1Bx

Pour ce scénario, l'impact des changements hydrologiques sur la modification des plaines inondables du tronçon de la rivière Châteauguay est important. L'augmentation de 25% de la crue de 20 ans a pour effet de monter les hauteurs d'eau d'environ 50 cm qui atteignent leur hauteur maximale à la section amont avec 36.44m (figure 5.3). Pour la crue centenaire, l'augmentation maximale de la hauteur d'eau sur le tronçon, toujours à section 35 est de 68 cm avec une hauteur d'eau atteignant 37.14 m.

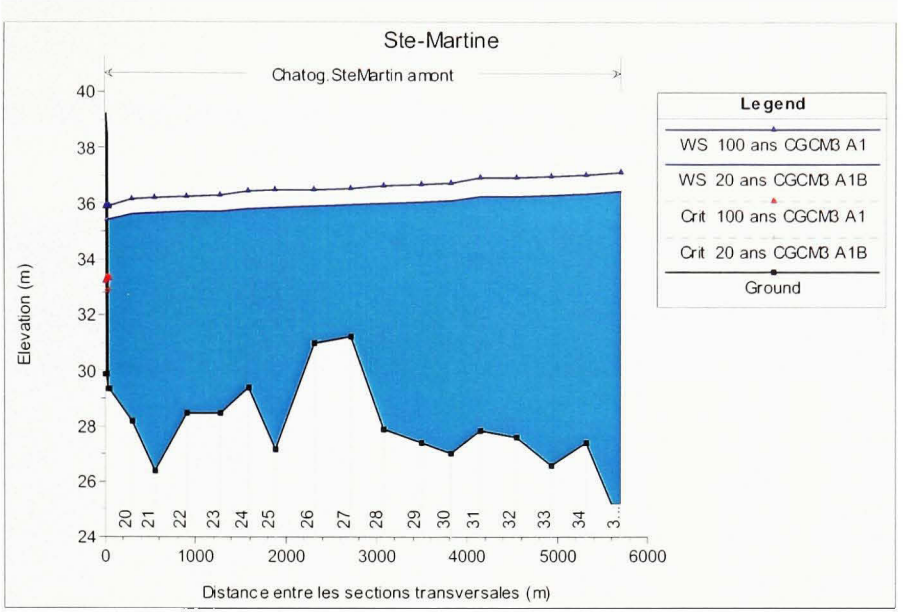


Figure 5.3 ***Graphique de la hauteur d'eau et de la profondeur critique générées par les débits du scénario CGCM3r A1Bx pour les crues de 20 et 100 ans.***

C'est à la section 33 qu'on note la plus forte augmentation de la largeur de la plaine inondable avec 12.42 m de variation pour la crue de 20 ans et 45.68m pour la crue de 100 ans (*Voir* Tableau 5.4). Les vitesses de l'écoulement augmentent d'environ 15% en moyenne sur l'ensemble du tronçon pour la crue de 20 ans et d'environ 17% en moyenne pour la crue centenaire.

Tableau 5.4

Écarts entre les débits des périodes de récurrence 20 et 100 ans du CGCM3 A1Bx pour la période 2100 et le passé simulé.

	20 ans				100 ans			
Section transversale	**Q Total**	**Elev eau**	**Vitesse**	**Largeur plaine**	**Q Total**	**Elev eau**	**Vitesse**	**Largeur plaine**
	(m^3/s)	**(m)**	**(m/s)**	**(m)**	**(m^3/s)**	**(m)**	**(m/s)**	**(m)**
35	173.9	**0.48**	0.2	7.87	264.14	**0.68**	0.25	19.12
34	173.9	0.47	0.19	5.51	264.14	0.67	0.23	5.38
33	173.9	0.46	0.19	**12.42**	264.14	0.65	0.26	**45.68**
32	173.9	0.46	0.17	5.04	264.14	0.65	0.23	11.96
31	173.9	0.45	0.14	10.48	264.14	0.64	0.19	15.72
30	173.9	0.42	0.24	3.52	264.14	0.6	0.32	19.83
29	173.9	0.42	0.2	6.14	264.14	0.59	0.26	11.19
28	173.9	0.41	0.19	11.72	264.14	0.59	0.24	33.31
27	173.9	0.41	0.14	2.49	264.14	0.58	0.18	7.31
26	173.9	0.4	0.12	11.23	264.14	0.59	0.14	8.38
25	173.9	0.4	0.09	7.36	264.14	0.59	0.11	9.47
24	173.9	0.39	0.12	5.18	264.14	0.58	0.15	7.66
23	173.9	0.37	0.18	2.55	264.14	0.55	0.23	3.84
22	173.9	0.37	0.17	2.09	264.14	0.54	0.21	4.18
21	173.9	0.35	0.18	1.28	264.14	0.53	0.24	5.14
20	173.9	0.35	0.19	2.75	264.14	0.52	0.24	15.74
19	173.9	0.31	0.27	0.14	264.14	0.46	0.35	0.21
18.75	173.9	0.3	0.29	0	264.14	0.45	0.37	0
18.5	Pont							
18.25	173.9	0.29	**0.3**	0	264.14	0.44	**0.38**	0
18	173.9	0.3	0.28	0	264.14	0.45	0.36	0

5.5.2 Projection ECHAM4 A2

Une diminution des débits maximaux des crues aurait pour effet de diminuer les hauteurs d'eau, les vitesses et la largeur de la plaine inondable, tel que le démontre les résultats de ce scénario. Les diminutions les plus importantes sont pour la crue de 20 ans. En effet, des diminutions d'environ 28 cm d'hauteur d'eau se font sentir sur la partie amont du tronçon avec une hauteur maximale de 35.67 m atteinte à la section 35 (figure 5.4). La crue

centenaire de ce scénario engendre une diminution maximale de la hauteur d'eau de 23 cm pour les sections 34 et 35.

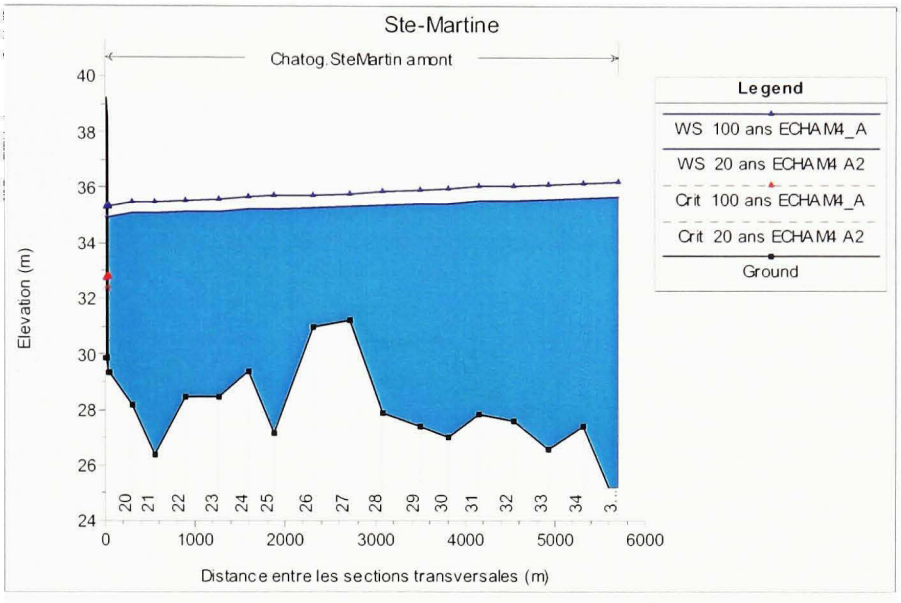


Figure 5.4 ***Graphique de la hauteur d'eau et de la profondeur critique générées par les débits du scénario ECHAM4 A2 pour les crues de 20 et 100 ans pour la période 2080.***

Les vitesses d'écoulement diminuent également pour la crue de 20 et 100 ans (tableau 5.5). La largeur de la plaine inondable est réduite au maximum à la section 33 avec une diminution de 3.93 m pour la crue de 20 ans de de 9.79 m pour la crue de 100 ans.

Tableau 5.5

Résumé de l'analyse hydraulique pour les débits des périodes de récurrence 20 et 100 ans de ECHAM4 A2 pour la période 2100

	20 ans				100 ans			
Section transversale	**Q Total (m^3/s)**	**Elev eau (m)**	**Vitesse (m/s)**	**Largeur plaine (m)**	**Q Total (m^3/s)**	**Elev eau (m)**	**Vitesse (m/s)**	**Largeur plaine (m)**
35	-101.52	**-0.29**	-0.12	-3.55	-86.42	**-0.23**	-0.1	-6.23
34	-101.52	-0.28	-0.13	-3.41	-86.42	**-0.23**	-0.09	-2.69
33	-101.52	-0.28	-0.13	**-3.93**	-86.42	-0.22	-0.09	-9.24
32	-101.52	-0.27	-0.12	-3.06	-86.42	-0.22	-0.08	-2.47
31	-101.52	-0.28	-0.09	-3.89	-86.42	-0.22	-0.07	-5.37
30	-101.52	-0.26	-0.15	-2.08	-86.42	-0.21	-0.11	-2.12
29	-101.52	-0.25	-0.14	-3.04	-86.42	-0.2	-0.1	-3
28	-101.52	-0.24	-0.12	-3.59	-86.42	-0.2	-0.09	**-9.79**
27	-101.52	-0.23	-0.11	-1.82	-86.42	-0.2	-0.07	-1.22
26	-101.52	-0.24	-0.08	-0.7	-86.42	-0.2	-0.05	-7.18
25	-101.52	-0.23	-0.06	-4.41	-86.42	-0.2	-0.05	-3.52
24	-101.52	-0.23	-0.09	-3.37	-86.42	-0.19	-0.06	-2.56
23	-101.52	-0.22	-0.13	-1.5	-86.42	-0.18	-0.09	-1.25
22	-101.52	-0.21	-0.11	-1	-86.42	-0.19	-0.08	-1.15
21	-101.52	-0.21	-0.12	-0.74	-86.42	-0.18	-0.09	-0.63
20	-101.52	-0.2	-0.12	-1.61	-86.42	-0.17	-0.09	-1.37
19	-101.52	-0.17	-0.18	-0.08	-86.42	-0.15	-0.13	-0.06
18.75	-101.52	-0.17	**-0.19**	0	-86.42	-0.14	**-0.14**	0
18.5	Pont							
18.25	-101.52	-0.17	-0.18	0	-86.42	-0.15	**-0.14**	0
18	-101.52	-0.17	-0.18	0	-86.42	-0.14	**-0.14**	0

5.6 Cartographie des plaines inondable

Initialement, la cartographie des plaines inondables devait se faire avec le système d'information géographique ArcGIS. Un programme développé par le HEC, HEC-GeoRAS, permet de générer automatiquement des plaines inondables sur ArcGIS à partir de données provenant de HEC-RAS. Cependant, le fichier fourni par le CEHQ n'était pas géoréférencé et la procédure pour obtenir des cartes de plaines inondables sur ArcGIS était très fastidieuse. De plus, comme le tronçon de rivière étudié est plat, cela aurait demandé un

modèle digital de terrain (MDT) très précis et aucun n'était assez précis en élévation. En effet, quelques centimètres de plus de hauteur d'eau peu augmenter considérablement la plaine inondable en terrain plat. La cartographie s'est donc faite à la main avec le logiciel Autocad à l'aide des courbes de niveaux au 0.5 m et de la hauteur d'eau générée à chaque section, transversale à l'écoulement, définies précédemment. Les fichiers originaux de plaines inondables ont été obtenus via la géoboutique du Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune du Québec. Aucune cartographie de la section en entier n'était disponible et c'est la section amont, entre les sections perpendiculaires 35 et 31, qui a été sélectionnée car c'était la section la plus intéressante pour voir l'impact des changements climatiques sur la modification de la plaine inondable.

Les sections suivantes présentent les cartes de plaines inondables obtenues. La cartographie des résultats pour la projection issue du CGCM3 (figure 5.5) montre que la crue printanière de 100 ans pourrait affecter un grand nombre de propriétés riveraines et de champs agricoles. Plusieurs bâtiments municipaux se trouvent en zone inondable selon cette projection. La crue de 20 ans de cette projection est équivalente à la crue de 100 ans du passé simulé. La cartographie de la projection du ECHAM4 (figure 5.6) indique une diminution des plaines inondables. La crue de 100 ans est équivalente à la crue de 20 ans du passé simulé. Les crues printanières causeraient donc moins de dommage selon ce scénario.

5.6.1 Passé simulé

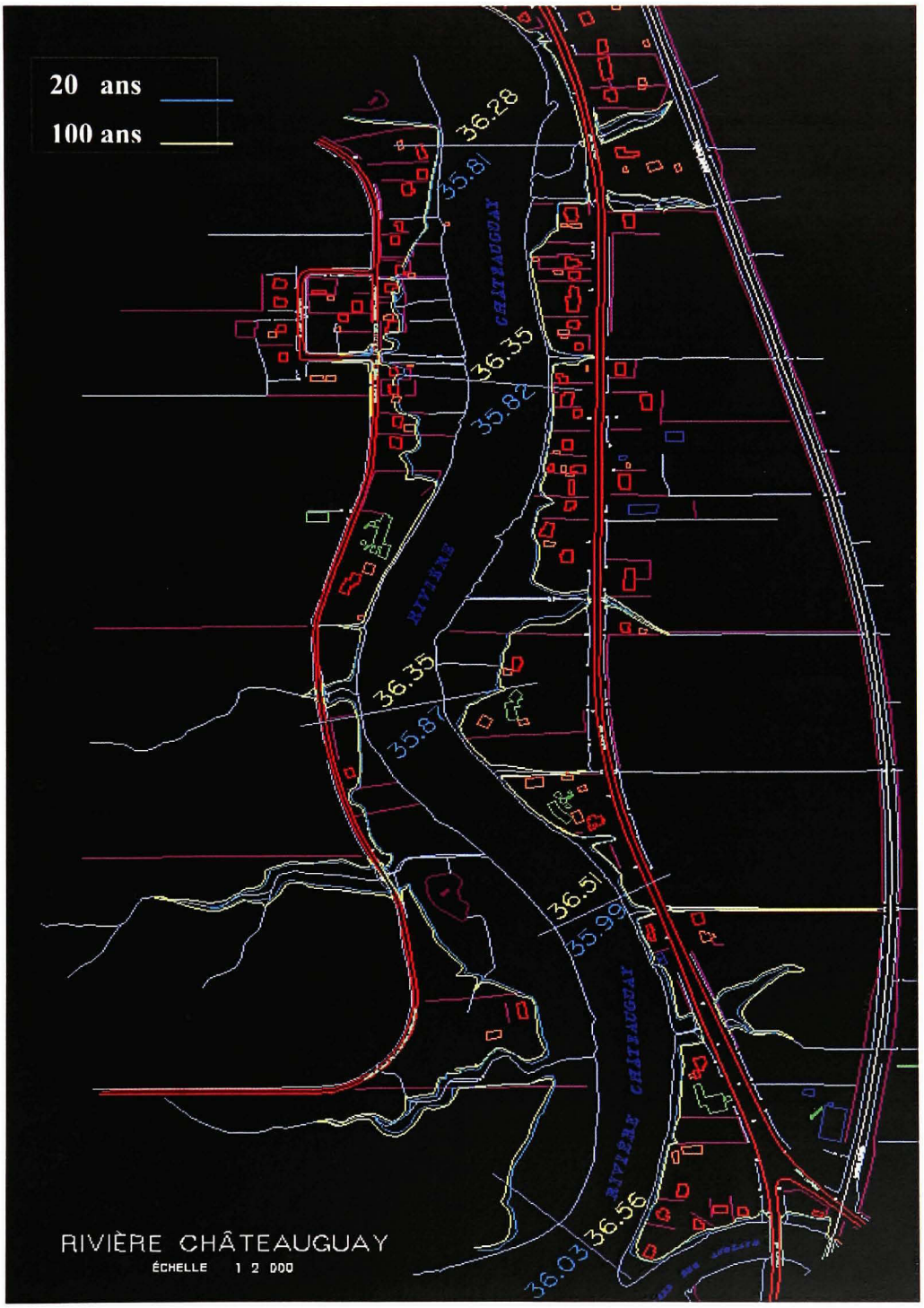


Figure 5.5 *Cartographie des plaines inondables pour les débits simulés de 20 et 100 ans.*

5.6.2 GCM3r A1bx

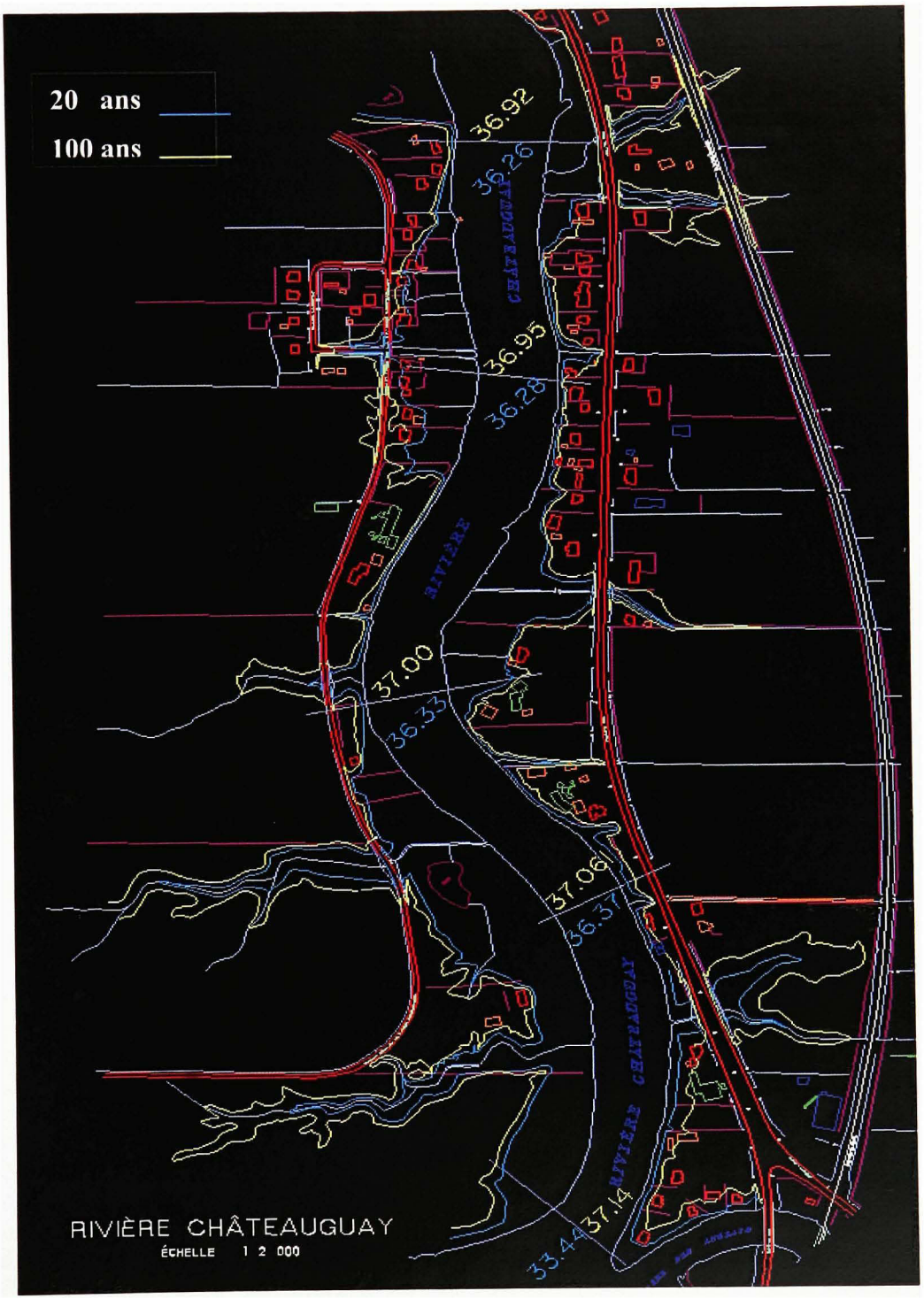


Figure 5.6 ***Cartographie des plaines inondables pour les débits futurs de 20 et 100 ans du CGCM3 A1x.***

5.6.3 ECHAM4 A2



Figure 5.7 *Cartographie des plaines inondables pour les débits futurs de 20 et 100 ans de ECHAM4 A2.*

CHAPITRE 6

DISCUSSION ET ANALYSE CRITIQUE DE LA MÉTHODE

Il est nécessaire d'évaluer la méthodologie utilisée dans le cadre de cette étude et les sources d'incertitudes afin de pouvoir jeter un regard critique sur les résultats obtenus. Le chapitre reprend la structure de la méthodologie employée dans le cadre de cette recherche et propose une analyse des grandes étapes qui ont jalonné le projet afin d'évaluer la confiance envers les résultats énoncés et de faire des recommandations s'il y a lieu.

6.1 Génération de la météorologie à l'échelle du bassin

Les modèles globaux tels HSAMI utilisent en intrant une moyenne au bassin qui se doit d'être la plus représentative possible. La génération de la météorologie à l'échelle du bassin versant est une source d'incertitudes importante au niveau de la modélisation hydrologique des crues passées '1959-2003'. La première imprécision vient de la disponibilité des données elles-mêmes. En effet, la disponibilité des données n'est pas constante et il peut arriver que des données soient manquantes pendant une période plus ou moins longue et ceci influence la qualité de la climatologie globale. La fiabilité de la prise des données, tout particulièrement celle des précipitations peut également être une source d'incertitude. En effet, selon l'appareil de mesure utilisé et selon les conditions météorologiques sévissant au site de prise de mesure, il arrive fréquemment que la précipitation soit sous-estimée, tout particulièrement la neige. De plus, le changement de site de l'appareil de mesure, le changement d'instrumentation, les modifications de l'environnement de la station, etc. peuvent créer un saut dans la série de données et induire ainsi faussement une tendance dans les données. L'utilisation de données homogénéisées de températures et réhabilitées pour les précipitations pourrait minimiser l'influence de facteurs externes sur le processus de mesure et donc améliorer la représentativité de la météorologie à l'échelle du bassin versant. L'homogénéisation et la réhabilitation consistent à détecter puis à corriger les biais présents dans les séries d'observations climatiques.

La densité du réseau de mesure est également un facteur prépondérant pour la génération de la météorologie à l'échelle du bassin, tout particulièrement pour un bassin hétérogène comme celui de la rivière Châteauguay. Dans les études précédentes sur le bassin (Mareuil, 2005; Roy, 2000) peu de données provenaient de la partie américaine du bassin créant ainsi une sous-représentation des processus météorologiques se déroulant dans le sud du bassin. L'utilisation de quatre stations américaines a amélioré la densité du réseau de mesure dans le sud du bassin et a permit probablement la génération d'une moyenne au bassin plus représentative de l'ensemble du bassin-versant. Dans le cadre de cette étude, aucune correction n'a été apportée quant au décalage entre les horaires auxquels sont effectués les relevés météorologiques des stations canadiennes et américaines. Or, ce décalage peut influencer la météorologie moyenne et fausser les résultats et le fait de synchroniser les séries temporelles pourrait améliorer les résultats. L'ajout de la hauteur de neige au sol dans la génération de la météorologie moyenne au bassin pourrait également améliorer les résultats pour les crues printanières. En effet, cette information permet de mieux estimer la quantité totale de neige à la fin de l'hiver et donc de mieux évaluer le volume de crue généré par la fonte des neiges. Malgré toutes les sources d'incertitudes nommées, la météo moyenne nous apparaît satisfaisante et ne constitue probablement pas une source majeure d'erreur.

6.2 Modélisation hydrologique '1959-2003'

Le calage et la validation du modèle hydrologique sont au cœur de cette étude et plusieurs incertitudes surviennent lors de cette étape. Les principales sources d'incertitudes concernent la structure même du modèle, car les processus hydrologiques sont simplifiés par rapport aux processus réels. Il est également difficile d'estimer le jeu de paramètres optimal au cours de la procédure de calage . Le choix d'un jeu de paramètres et sa capacité à bien reproduire les apports historiques est essentiel puisqu'il détermine la confiance que l'on accordera aux simulations qui découlent des séries météorologiques futures et influence l'interprétation que l'on peut en faire.

L'optimisation des paramètres dans le logiciel HSAMI se fait de façon globale et tend à n'optimiser que les crues printanières du fait de leur volume plus important par rapport aux crues estivales et automnales. L'utilisation de deux jeux de paramètres, un pour chaque type de crues, a palier à ce problème et a permis d'améliorer la capacité du modèle à reproduire les crues. En effet, le calage et la validation du modèle hydrologique HSAMI du bassin versant de la rivière Châteauguay pour chaque type de crues ont permis d'obtenir des résultats satisfaisants pour les périodes de retour de 20 et 100 ans tant au niveau des crues printanières que des crues estivales et automnales.

L'ajustement au modèle fréquentiel peut également être une source d'incertitude, car il dépend beaucoup de l'usager et de son expérience. L'ajustement au modèle fréquentiel reste une extrapolation et le fait de faire une supposition à partir d'autres situations qui ne sont pas complètement similaires entraîne son lot d'erreurs. Cependant, les résultats de l'analyse fréquentielle des débits observés et simulés démontrent une bonne corrélation. En effet, des écarts de +2 % sur les crues de 20 ans et de +5 % sur les crues de 100 ans sont à noter pour les crues printanières alors que les crues estivales et automnales sont sous-estimées de 9 % pour la crue de 20 ans et de 4 % pour la crues de 100 ans. À cette étape du projet, le cumul des incertitudes est donc acceptable et ne remet pas en cause la méthode.

6.3 Génération des séries climatiques futures

La méthodologie utilisée pour la génération des scénarios de changement climatique est la même que dans l'étude faite par Mareuil (2005), mais plusieurs améliorations y ont été apportées. La première amélioration consiste à avoir recours à une région de référence contenant plusieurs points de grille plutôt qu'un seul. L'utilisation d'une région de référence offre l'avantage de toujours prendre un territoire identique pour le calcul des deltas quel que soit la grille du MCG et permet ainsi une comparaison entre les modèles sur une base territoriale commune. De plus, les deltas régionaux offrent une variabilité temporelle plus lissée en comparaison aux deltas du point de grille le plus proche du site étudié, ce qui peut être un avantage (Chaumont *et al.*, 2005). Un nombre plus important de

MCG et de scénarios a été utilisé que dans les études de Mareuil (2005) et Roy (2000), ce qui a permis d'évaluer un éventail de climats futurs plus importants. Une autre amélioration est l'emploi de moyennes d'ensemble. L'utilisation des moyennes d'ensemble permet généralement de mieux simuler le climat observé que n'importe quelle simulation de modèle seule (Barrow *et al.*, 2004). En effet, même si la tendance générale de la réponse du climat est similaire pour chacune des simulations d'ensemble, l'évolution du changement climatique est différente pour chaque membre de l'ensemble, et ce malgré le recours à des scénarios de forçage identiques dans chaque expérience d'ensemble. On peut ainsi diminuer les erreurs des modèles, mais ce procédé diminue la cohérence entre les variables climatiques et peut causer une inconsistance entre les températures et les précipitations futures (Barrow *et al.*, 2004).

Malgré les améliorations apportées à la méthode employée pour générer des séries futures par rapport aux études précédentes faites sur le bassin, il reste de nombreuses sources d'incertitudes qui sont susceptibles d'entacher les résultats. Premièrement, il y a lieu de se demander si la méthode des deltas n'est pas elle-même une source d'erreurs importante. Cette méthode suppose que seule la moyenne des variables change alors que la variabilité et la loi de distribution restent identiques. Pour les crues printanières la méthode n'est pas remise en cause, car les crues sont le résultat de l'accumulation de la neige sur plusieurs mois et généralement la variabilité quotidienne des phénomènes météorologiques influence peu le résultat, sauf dans le cas des averses sur neige qui peuvent avoir une grande importance. Or, la réalité est toute autre pour les crues estivales et automnales qui sont directement influencées par les événements extrêmes de précipitation. La précision sur les phénomènes extrêmes de courte durée est donc importante pour la modélisation de ce type de crues. Or, la méthode des deltas va essentiellement prédire une diminution des extrêmes climatiques si la précipitation moyenne diminue alors que l'augmentation des extrêmes climatiques est à envisager. C'est pourquoi la méthode des deltas peut ne pas être appropriée pour des études reliées à des évènements extrêmes de courte durée. Néanmoins, comme il n'est pas possible d'évaluer comment la variabilité des événements va évoluer

dans le futur du fait de la grande complexité du système climatique, cette méthode de mise à l'échelle reste toute de même pertinente dans le cas d'études d'impact.

Dans les travaux futurs qui porteront sur le bassin-versant de la rivière Châteauguay, il pourrait être judicieux d'utiliser les simulations du MRC Canadien, puisqu'il est susceptible d'être plus adapté à l'échelle spatiale considérée. En effet, alors que la taille des mailles des différents MCG est d'environ 3°x 3°, le bassin de la rivière Châteauguay peut être contenue dans une maille de 1° x 1°.

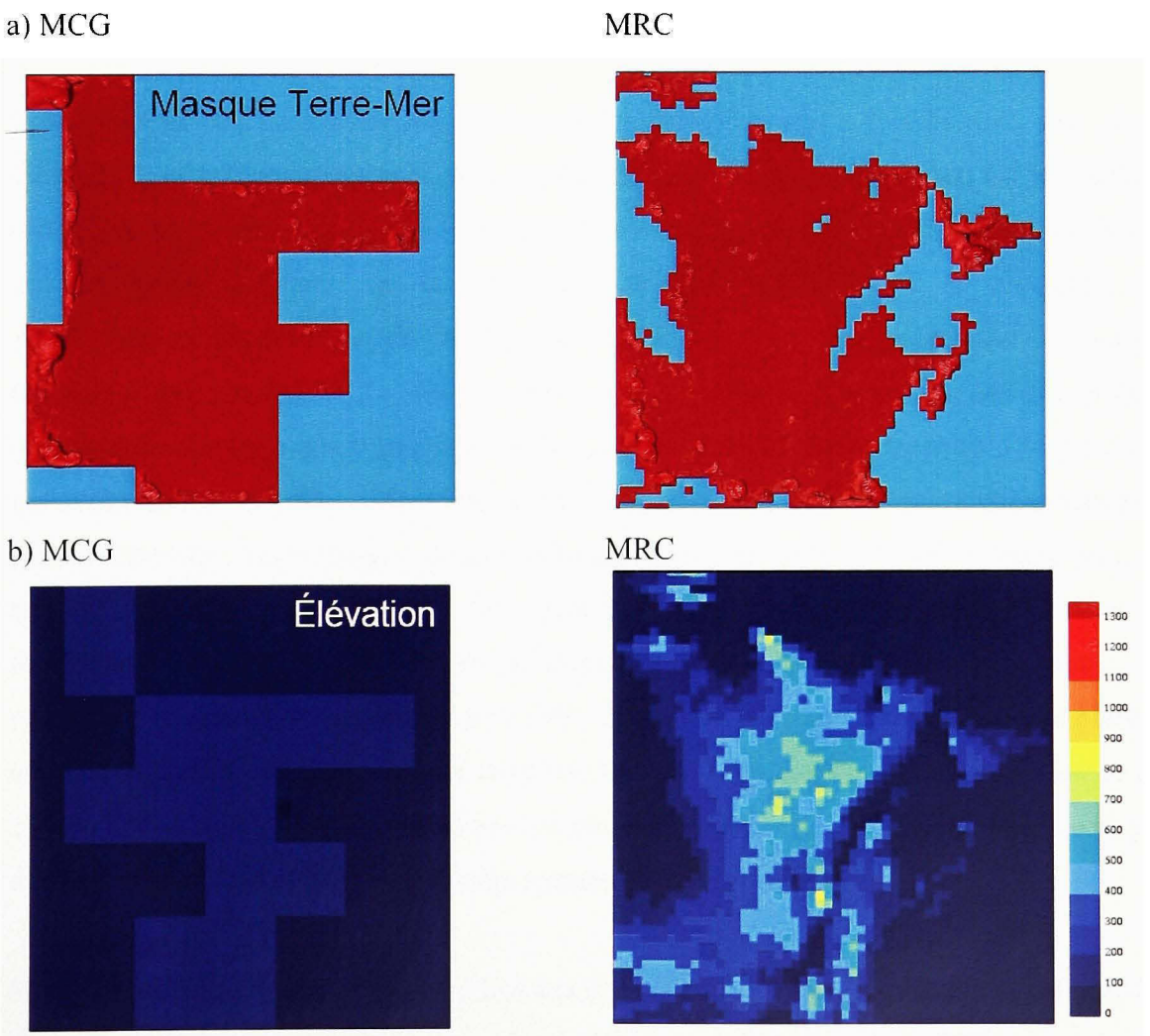


Figure 6.1 Comparaison pour le Québec entre un MCG et un MRC pour : a) leur masque Terre-mer, b) la topographie.
(Tiré de Cantin et al., 2004)

L'utilisation d'un MRC permettrait de mieux représenter des processus différents qui pourraient avoir lieu simultanément dans le sud et le nord du bassin qui ont des topographies très différentes. La figure 6.1 illustre comment le Québec est vu par un MCG et par un MRC pour son masque Terre-Mer ainsi que pour l'élévation. L'emploi de méthodes de mise à l'échelle statistique devrait également être considéré dans les travaux futurs. Le générateur de climat stochastique WeatGET que Mareuil (2005) a employé n'a pas été utilisé dans le cadre de cette étude, mais son utilisation aurait pu être pertinente.

6.4 Simulation future '2020-2080'

Nous croyons que les incertitudes sur les projections climatiques futures sont, sans aucun doute, la source d'incertitudes la plus importante dans ce projet. En effet, les incertitudes provenant des projections climatiques découlent en partie des incertitudes dans la définition de l'évolution anticipée de la croissance de la population, de la croissance du développement économique, de l'utilisation de l'énergie, etc. De plus, comme il n'est pas possible d'intégrer aux MCG tous les processus qui influencent le climat, soit par manque de connaissance ou à cause des limites de la technologie, il faut introduire à la place des paramétrisations. En effet, il faut introduire de la paramétrisation tout particulièrement pour les processus qui se produisent à des résolutions plus fines que le MCG. D'autre part, les sources naturelles de GES, telle les éruptions volcaniques, ne figurent pas dans les expériences actuelles des MCG et pourtant leurs effets peuvent être importants. Par exemple, l'éruption du Pinatubo en juin 1991 a induit un refroidissement planétaire pouvant aller jusqu'à 0.5 °C à la surface pendant les deux ou trois années suivantes (Parker *et al.*, 1996). L'utilisation de plusieurs scénarios permet toutefois de développer une enveloppe d'incertitude et ainsi de couvrir un large spectre de climats futurs.

Malgré le fait que les projections climatiques soient incertaines, il est cependant possible d'en tirer certaines observations. Au niveau des crues printanières pour 2020, on remarque que malgré une augmentation des précipitations de l'ordre de 12% en moyenne, cela se

répercute peu sur les débits en rivière. En effet, dû à une augmentation des températures d'environ 2°C de janvier à mai et des redoux hivernaux qu'elles entraînent, le stock de neige disponible au printemps lors de la fonte des neiges n'est pas énormément augmenté, d'où les faibles augmentations de débits. Pour 2080, les augmentations de température et de précipitation sont beaucoup plus importantes. Le modèle CSIRO simule une augmentation de température de près de 10°C de janvier à mai, et malgré l'augmentation des précipitations d'environ 35% il y a une forte réduction des débits. En effet, la résultante d'un tel scénario serait la disparition quasi complète de l'hiver et de la neige, donc une absence de crues printanières. Cependant, le modèle CSIRO n'est pas représentatif des autres modèles et fait bande à part quant à l'augmentation de la température.

Pour les crues estivales et automnales en 2020, pratiquement tous les modèles, à l'exception du CSIRO, s'accordent pour prédire une diminution des débits entre juin et novembre. En effet, les modèles prévoient peu d'augmentation des précipitations pour cette période et l'augmentation de 2°C des températures favorise l'évapotranspiration ce qui se répercute par une diminution des débits de la rivière Châteauguay. Pour 2080, tous les modèles prévoient des fortes diminutions des débits, pouvant atteindre 36% dans certain cas. L'augmentation des températures est plus marquée qu'en 2020, avec une augmentation moyenne de 5°, alors que l'augmentation des précipitations est relativement semblable à 2020. Ces changements se reflètent sur les débits, car le sol s'assèche plus rapidement entre chaque évènement pluvieux créant ainsi une diminution de l'eau disponible pour alimenter les débits de la rivière.

6.5 Modélisation hydraulique et cartographie

La modélisation hydraulique n'ajoute que peu d'incertitudes aux résultats de cette étude. En effet, le modèle HEC-RAS fait intervenir peu de paramétrisation, qui est une source importante d'erreurs. Les incertitudes viennent donc en bonne partie des données utilisées pour la calage du modèle. Est-ce qu le choix de l'emplacement des sections transversales s'est fait à un endroit judicieux? Est-ce que les coefficients de rugosité du lit de la rivière et

des berges ont bien été évalués? Est-ce que les instruments de mesure utilisés pour établir le profil du lit étaient performants ou bien utilisés? Puisque le modèle a été fourni par le CEHQ, qui est l'expert au Québec en ressources hydriques, il n'y a aucune raison de penser qu'il pourrait y avoir un problème. De plus, l'étude du CEHQ a été faite en 1989 et pratiquement aucune modification n'a été faite sur le tronçon de rivière depuis cette époque, le modèle hydraulique peut être qualifié par conséquent de fiable.

Dans le cadre de cette étude, l'influence de la glace et des embâcles n'a pas été évaluée. Or, les embâcles peuvent causer des crues particulièrement catastrophiques. De plus, l'englacement sur la rivière Châteauguay est déjà suivi de près et pratiquement à chaque année, la garde côtière doit faire des opérations de déglaçage à certains endroits sur la rivière pour éviter les inondations. Les inondations causées par les embâcles de glace sont fréquemment soudaines et laissent peu de temps aux autorités pour réagir. C'est pourquoi un système de prévision des crues subites a été proposé sur la rivière Châteauguay (Lavallée *et al.*, 2000). Dans les études suivantes sur le bassin, la prise en compte la glace dans la modélisation hydraulique améliorerait certainement la fiabilité des résultats.

Tel que mentionné au chapitre 5, il a été impossible d'utiliser le logiciel ArcGIS dans le cadre de l'étude, ce qui aurait pu permettre de produire une cartographie des plaines inondables plus précise. En effet, la cartographie s'est faite manuellement à partir des relevés topographiques au 0.5 m à l'aide du logiciel Autocad et la délimitation des plaines inondables n'est pas très précise. À plusieurs endroits sur le tronçon la distance entre deux courbes de niveau est grande, puisque le terrain est, à toute fin pratique, plat, ce qui cause une source d'erreur pour la cartographie. Le CEHQ utilise généralement des relevés laser aéroportés LIDAR qui a une densification de points d'environ un au 2 mètres au sol en X et Y et de +/- 20cm sur le Z (élévation). Cette précision est nécessaire pour générer une cartographie qui sera utilisée pour produire la réglementation. Comme le but de l'étude était de vérifier la modification des plaines inondables en contexte de changement climatique, un tel niveau de précision n'était pas essentiel.

Pour conclure ce chapitre, malgré les sources d'incertitudes qui entachent la méthodologie, le modèle hydrologique simule bien le comportement du bassin versant et le modèle hydraulique représente adéquatement le tronçon de rivière sélectionné. Nous croyons que la source majeure d'incertitudes provient logiquement des simulations futures qui nécessitent de poser un bon nombre d'hypothèses. C'est pourquoi plusieurs scénarios ont été évalués dans le but d'avoir un spectre le plus large possible de climats futurs probables.

CONCLUSION

Le domaine de la recherche en changement climatique est en constante évolution et les préoccupations que suscite la perspective de ces changements augmentent sans cesse dans la population. Peu de systèmes sont aussi complexes et dynamiques que le système climatique. Du fait de sa grande complexité et du manque de connaissances par rapport à toutes les interactions entre les tenants et aboutissants du système, il est difficile de prévoir le comportement du système dans un futur éloigné sans une grande part d'incertitude. La rivière Châteauguay, située au sud-est de Montréal est particulièrement vulnérable aux inondations. En effet, les inondations sont déjà une problématique récurrente sur ce bassin et touchent des milliers de personnes pratiquement à chaque année. Les impacts du changement climatique sur le régime hydrologique, notamment sur un phénomène local tel les inondations de la rivière Châteauguay, sont très incertains. Aucune étude précédente n'intégrait des données récentes dans son analyse et peu d'observations provenant du sud du bassin étaient utilisées. Ainsi, l'objectif principal de cette étude est de caractériser l'impact des changements climatiques sur les plaines inondables du bassin-versant de la rivière Châteauguay. Ultimement, une cartographie de deux scénarios a été produite pour voir l'impact des changements climatiques sur les plaines inondables du bassin versant pour les crues printanières.

Tout d'abord, une modélisation hydrologique du bassin versant a été réalisée avec le logiciel HSAMI à l'aide d'observations relevées entre 1959 et 2003. Deux calages manuels ont été nécessaires, car un seul jeu de paramètres n'arrivait pas à bien reproduire les crues printanières et estivales/automnales. L'analyse fréquentielle des crues de 20 et 100 ans a été utilisée pour juger de la qualité de la modélisation plutôt que le critère de Nash qui est généralement utilisé en modélisation. En effet, malgré le fait que le critère de Nash soit très élevé pour une simulation, l'analyse de fréquence de crues démontrait que le modèle n'était pas capable de reproduire la fréquence et l'intensité des crues étudiées. De plus, comme le modèle ne serait pas utilisé en mode prévision, l'analyse fréquentielle était donc tout indiquée pour évaluer la modélisation. Les résultats obtenus montre que le modèle

hydrologique simule bien le comportement du bassin versant. En effet, des écarts de +2 % sur les crues de 20 ans et de +5 % sur les crues de 100 ans sont obtenus pour les crues printanières alors que les crues estivales et automnales sont sous-estimées de -9 % pour la crue de 20 ans et de -4 % pour la crues de 100 ans. Par la suite, neufs projections de changement climatique, issues de quatre modèles climatiques, ont été utilisées pour perturber le climat présent. L'analyse fréquentielle de crues a été utilisée pour comparer les crues printanières et les crues estivales/automnales passées avec celles des différents scénarios issus des séries futures de 2020 et 2080.

En hiver, les modèles prévoient en moyenne pour 2020 des hausses de 2°C et de 7% des précipitations. Ces changements se répercutent sur la crue centenaire qui varie de -5 % (ECHAM4) à +14 % (CGCM3r) par rapport au passé simulé pour les scénarios de la famille A. Pour 2080, les changements s'intensifient avec des hausses de température de 5°C en moyenne et de précipitation de près de 30 %. Les modèles sont moins consistants entre eux et les variations de la crue centenaire printanière vont de -87 % à +48 %. L'été et l'automne, pour la période centrée sur 2020, les températures et les précipitations changent très peu avec 2°C et 3 % respectivement. Tous les modèles, sauf le CSIRO, prévoient des diminutions des débits des crues. Le modèle ECHAM4 prévoit la plus forte diminution de la crue centenaire avec 15 %. Pour 2080, tous les modèles sans exception prévoient des diminutions des débits de pointe, allant de -30 % à -5 %.

Ces différences entre les réponses des modèles soulignent l'incertitude des MCG, tout particulièrement pour les études régionales. En effet, les nombreuses hypothèses qui doivent être posées pour réaliser les projections de changement climatique ainsi que la paramétrisation des phénomènes qui se produisent à une échelle plus petite que celle des MCG, causent de nombreuses sources d'incertitudes qu'il n'est pas possible de quantifier. L'utilisation de techniques de mise à l'échelle, soit statistique ou dynamique, pourraient augmenter la confiance que l'on accorde aux projections de changements climatiques pour le bassin versant de la rivière Châteauguay.

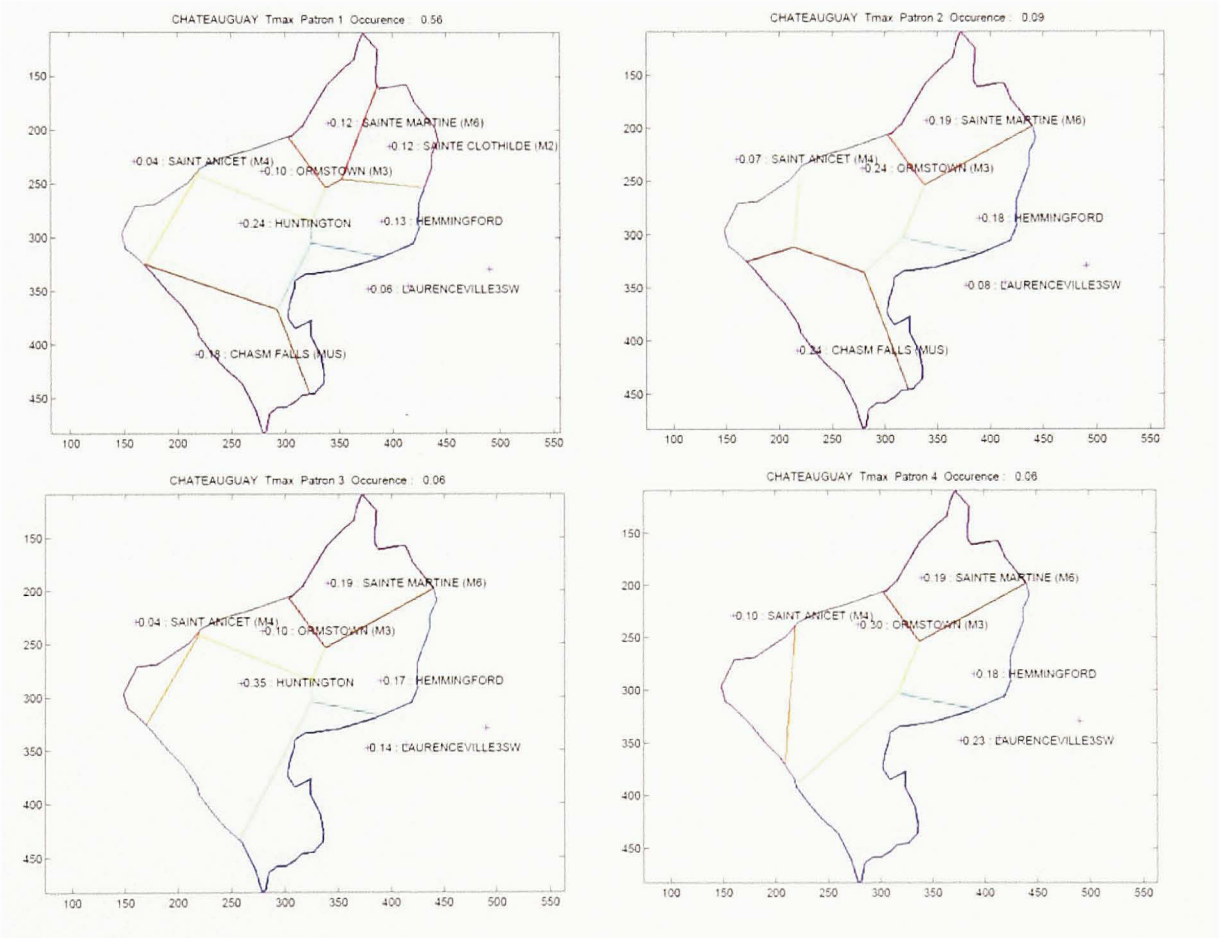
Par la suite, un simulateur hydraulique permet de convertir les débits de pointe de crue, obtenus à l'aide de la modélisation hydrologique, en niveau d'eau. La modélisation hydraulique ajoute très peu d'incertitude aux résultats de l'étude. En effet, le modèle hydraulique utilise peu de paramétrisation et il a été calé et validé par les membres CEHQ. Deux scénarios ont été utilisés pour cartographier un tronçon de la rivière et évaluer l'impact des changements climatiques sur les plaines inondables de la rivière pour les crues printanières de 20 et 100 ans. Ces deux cartographies mettent en lumière que les résultats pour 2080 sont très incertains et qu'il n'est pas possible de conclure actuellement sur l'impact des changements climatiques sur les plaines inondables du bassin versant.

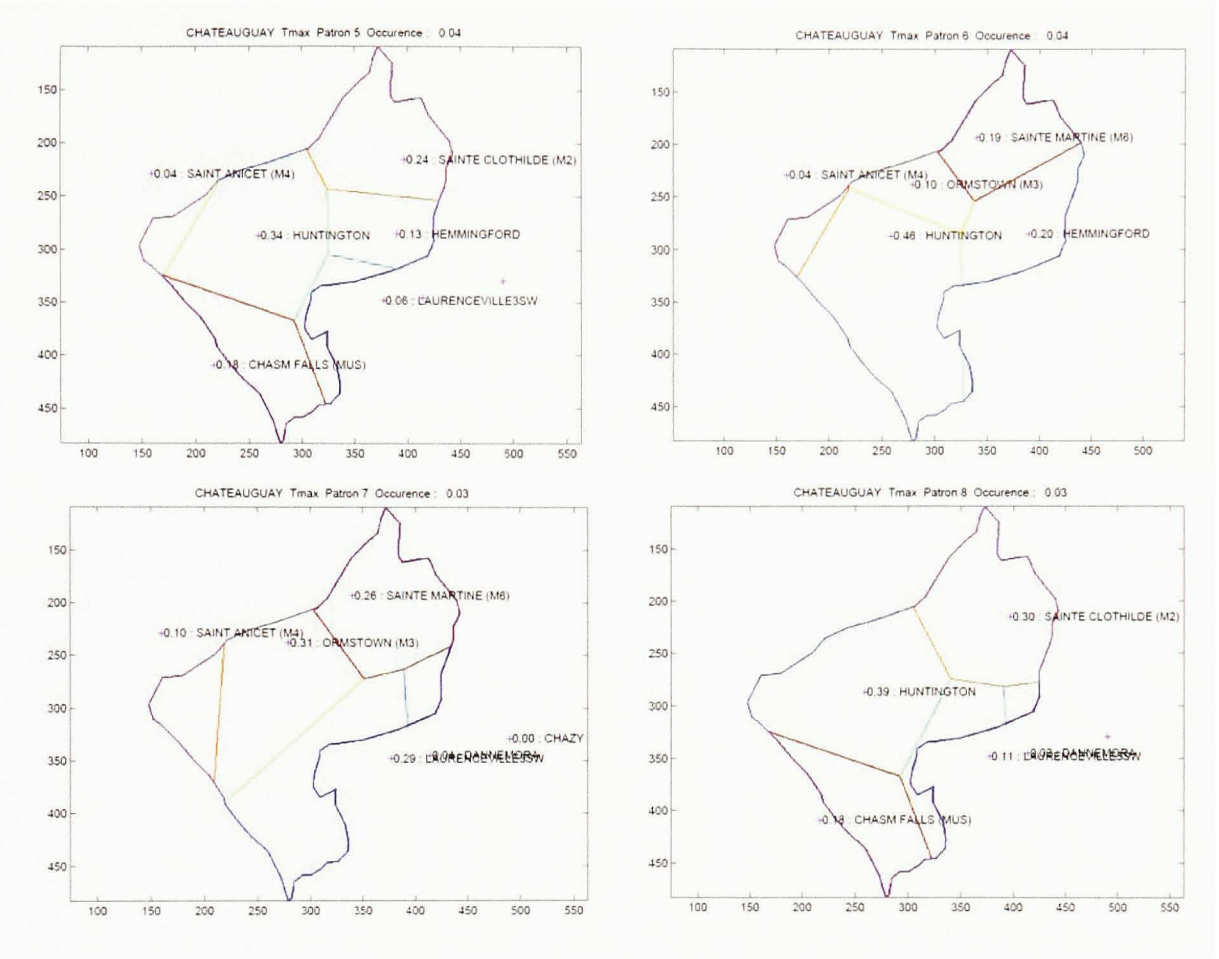
Le Québec, à lui seul, possède 20 % de l'eau douce canadienne et une grande partie des réserves mondiales. C'est donc dire l'importance de bien connaître cette ressource et de bien la gérer.

ANNEXE I

PATRONS DE DISTRIBUTION DE LA VARIABLE TEMPÉRATURE MAXIMALE UTILISÉS POUR LA GÉNÉRATION DE LA MÉTÉOROLOGIE À L'ÉCHELLE DU BASSIN-VERSANT

Température maximale



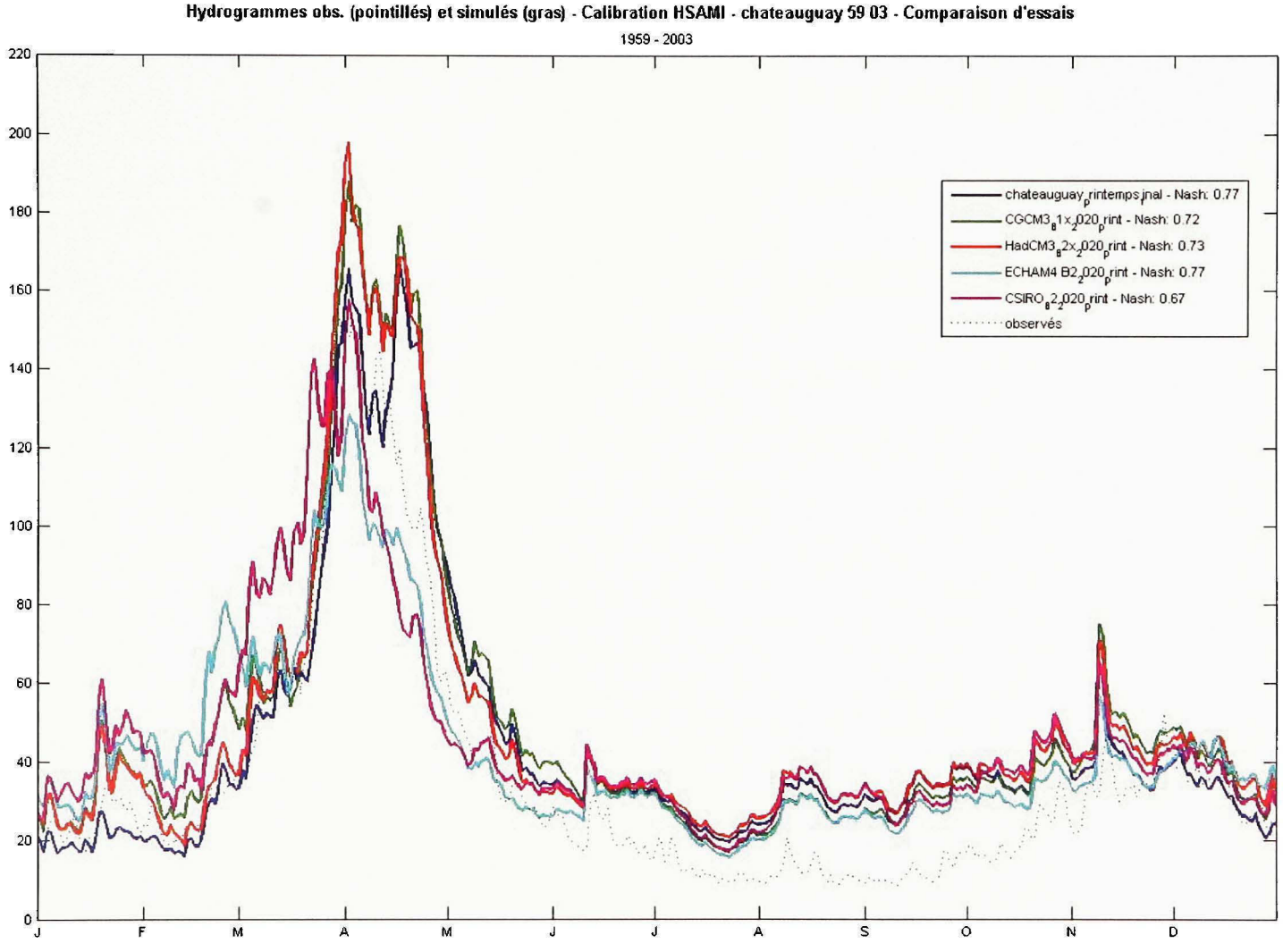

CHATEAUGUAY Tmax Patron 5 Occurence : 0.04
+0.04 : SAINT ANICET (M4)
+0.24 : SAINTE CLOTHILDE (M2)
+0.34 : HUNTINGTON
+0.13 : HEMMINGFORD
+0.06 : LAURENCEVILLE3SW
+0.18 : CHASM FALLS (MUS)
CHATEAUGUAY Tmax Patron 6 Occurence : 0.04
+0.19 : SAINTE MARTINE (M6)
+0.04 : SAINT ANICET (M4)
+0.10 : ORMSTOWN (M3)
+0.46 : HUNTINGTON
+0.20 : HEMMINGFORD
CHATEAUGUAY Tmax Patron 7 Occurence : 0.03
+0.26 : SAINTE MARTINE (M6)
+0.10 : SAINT ANICET (M4)
+0.31 : ORMSTOWN (M3)
+0.00 : CHAZY
CHATEAUGUAY Tmax Patron 8 Occurence : 0.03
+0.30 : SAINTE CLOTHILDE (M2)
+0.39 : HUNTINGTON
+0.18 : CHASM FALLS (MUS)

ANNEXE II

SIMULATIONS FUTURES DES CRUES PRINTANIÈRES ET ESTIVALES/AUTOMNALES POUR 2020 ET 2080 POUR LA FAMILLE DE SCÉNARIOS B

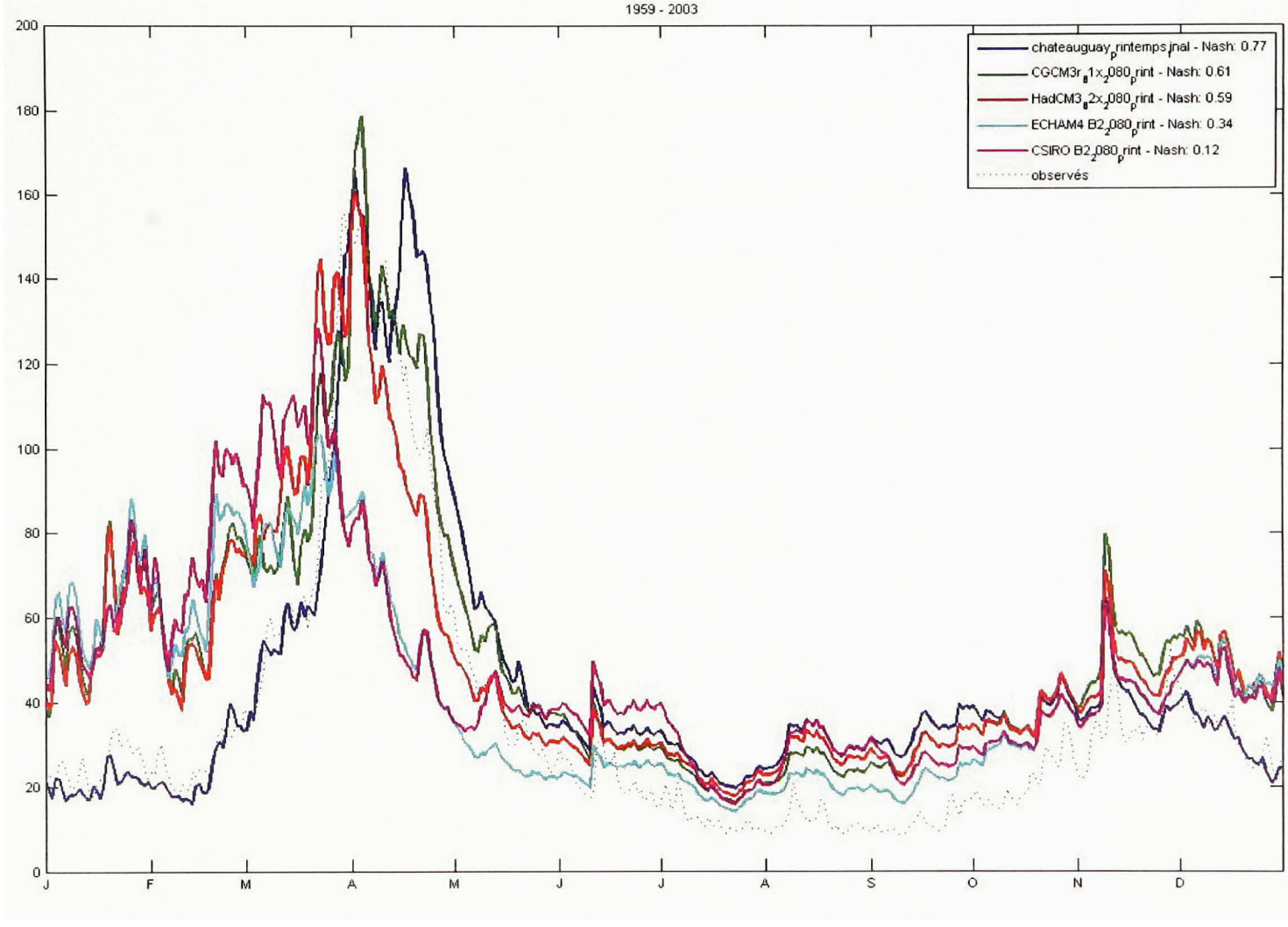
Valeur des débits pour le printemps 2020 – scénarios de la famille B

	Passé				Futur							
	Observés		Simulés		CGCM3r B1x		HadCM3 B2x		Echam4 B2		CSIRO B2	
T	XT	Écart-type	XT	Écart-type	XT	Écart-type	XT	Écart-type	XT	Écart-type	XT	Écart-type
200	1080	119	1020	102	1250	136	1090	106	972	109	1030	113
100	988	104	939	89.6	1130	119	1000	92.8	884	95.7	943	98.8
50	890	89.7	855	76.9	1020	102	918	79.7	794	82.1	851	84.8
20	761	70.2	744	60.2	872	80	802	62.4	676	64.3	728	66.4
10	660	55.6	658	47.7	757	63.4	713	49.4	584	50.9	633	52.5
5	556	41.2	568	35.3	636	46.9	620	36.6	488	37.7	534	38.9
3	473	31.1	497	26.6	541	35.4	546	27.6	412	28.4	456	29.4
2	398	24.4	433	21	455	27.9	480	21.7	344	22.4	385	23.1


Hydrogrammes obs. (pointillés) et simulés (gras) - Calibration HSAMI - chateauguay 59 03 - Comparaison d'essais
1959 - 2003
chateauguay_p_rintemps_final - Nash: 0.77
CGCM3_B1x_2020_p_rint - Nash: 0.72
HadCM3_B2x_2020_p_rint - Nash: 0.73
ECHAM4 B2_2020_p_rint - Nash: 0.77
CSIRO_B2_2020_p_rint - Nash: 0.67
observés
0
20
40
60
80
100
120
140
160
180
200
220
J
F
M
A
M
J
J
A
S
O
N
D

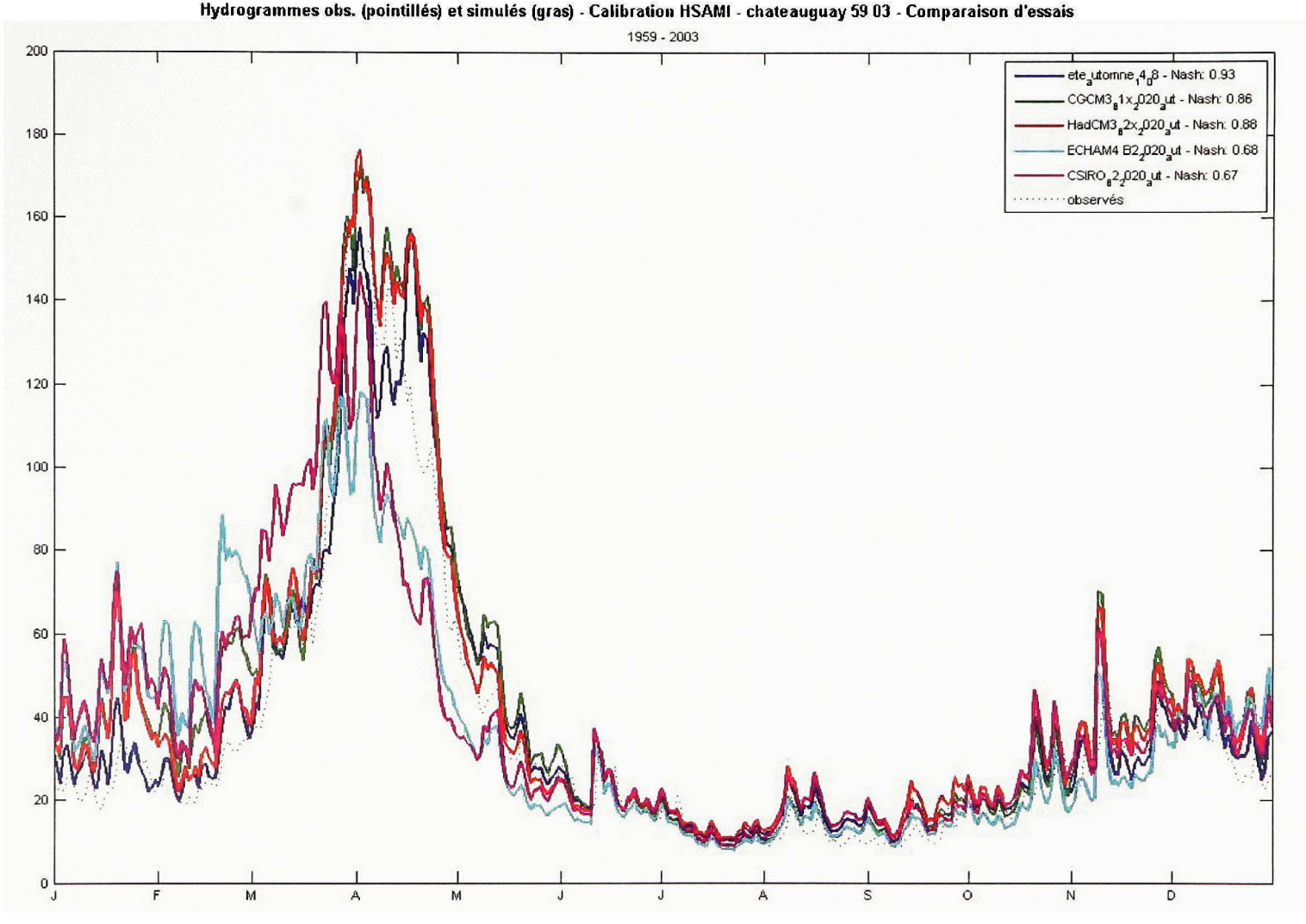
Valeur des débits pour le printemps 2080 – scénarios de la famille B

	Passé				Futur							
	Observés		Simulés		CGCM3r B1x		HadCM3 B2x		Echam4 B2		CSIRO B2	
T	XT	Écart-type	XT	Écart-type	XT	Écart-type	XT	Écart-type	XT	Écart-type	XT	Écart-type
200	1080	119	1020	102	1240	137	1140	125	1040	159	1050	121
100	988	104	939	89.6	1130	120	1040	109	919	130	952	106
50	890	89.7	855	76.9	1020	103	935	93.8	804	104	854	91
20	761	70.2	744	60.2	870	80.6	799	73.4	659	74.1	722	71.3
10	660	55.6	658	47.7	755	63.8	694	58.1	551	54.5	620	56.4
5	556	41.2	568	35.3	635	47.3	585	43	444	37.8	514	41.8
3	473	31.1	497	26.6	540	35.7	498	32.5	363	27.7	430	31.5
2	398	24.4	433	21	454	28.1	420	25.5	294	21.5	354	24.8


Hydrogrammes obs. (pointillés) et simulés (gras) - Calibration HSAMI - chateauguay 59 03 - Comparaison d'essais
1959 - 2003
chateauguay_p_rintemps_final - Nash: 0.77
CGCM3r_g1x_2_080_p_rint - Nash: 0.61
HadCM3_g2x_2_080_p_rint - Nash: 0.59
ECHAM4 B2_2_080_p_rint - Nash: 0.34
CSIRO B2_2_080_p_rint - Nash: 0.12
observés
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
J
F
M
A
M
J
J
A
S
O
N
D

Valeur des débits pour l'été/automne 2020 – scénarios de la famille B

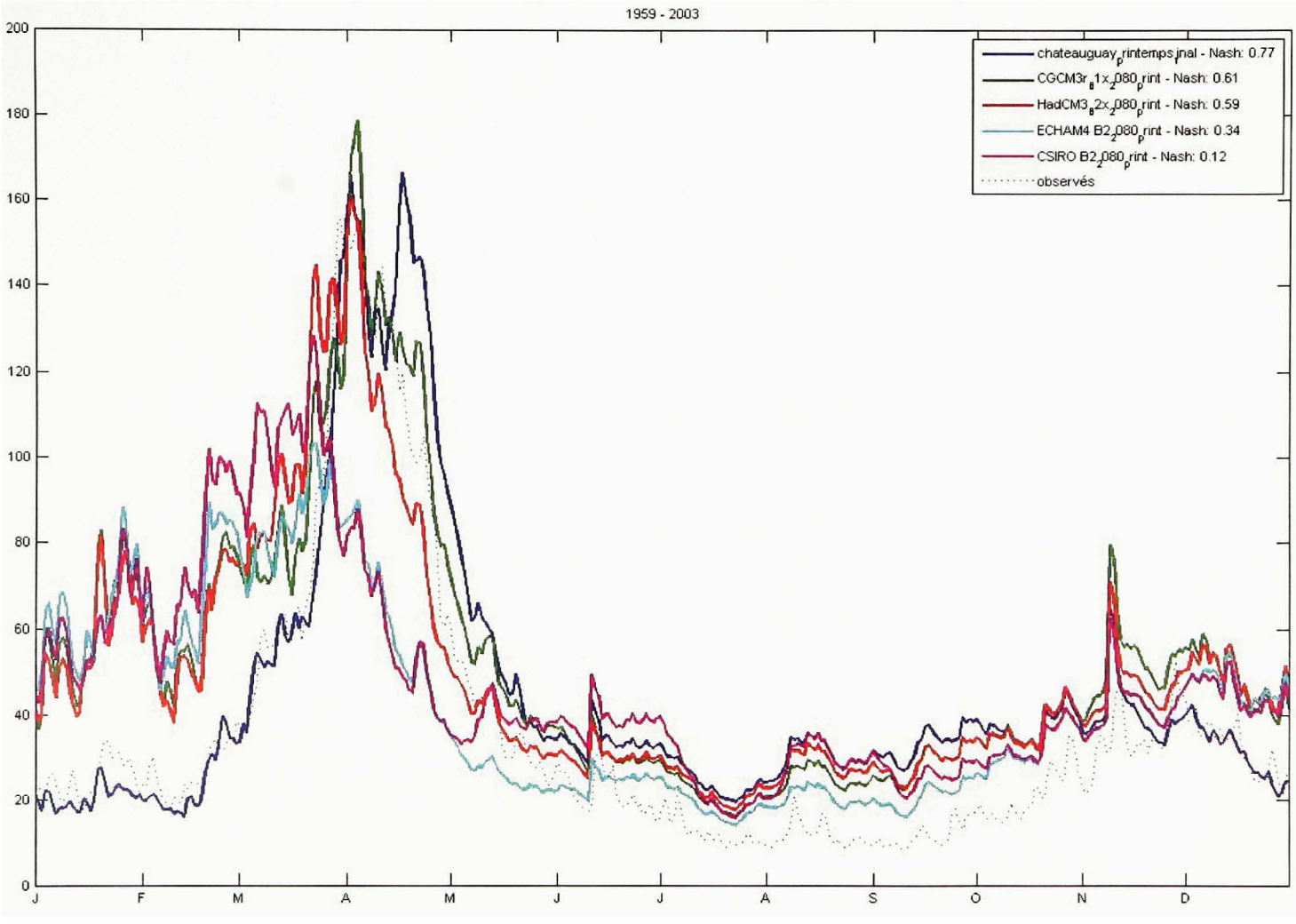
	Passé				Futur							
	Observés		Simulés		CGCM3r B1x		HadCM3 B2x		Echam4 B2		CSIRO B2	
T	XT	Écart-type	XT	Écart-type	XT	Écart-type	XT	Écart-type	XT	Écart-type	XT	Écart-type
200	907	244	923	227	833	205	1010	247	365	56.7	968	238
100	732	183	759	173	684	156	826	188	323	46.4	796	181
50	578	132	612	127	552	115	667	139	282	37.1	642	134
20	407	80.7	444	80.3	400	72.5	483	87.5	230	26.3	466	84.3
10	297	51.8	334	53	301	47.8	363	57.7	192	19.3	350	55.6
5	203	30.5	236	32.3	213	29.1	257	35.2	154	13.3	247	33.9
3	143	19.2	171	21	154	18.9	186	22.8	126	9.75	179	22
2	98.4	12.6	122	14.3	110	12.9	133	15.5	102	7.53	128	15


Hydrogrammes obs. (pointillés) et simulés (gras) - Calibration HSAMI - chateauguay 59 03 - Comparaison d'essais
1959 - 2003
ete_automne_1_0_8 - Nash: 0.93
CGCM3_8_1x_2_020_a_ut - Nash: 0.86
HadCM3_8_2x_2_020_a_ut - Nash: 0.88
ECHAM4 B2_2_020_a_ut - Nash: 0.68
CSIRO_8_2_020_a_ut - Nash: 0.67
observés
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
J
F
M
A
M
J
J
A
S
O
N
D

Valeur des débits pour les crues d'été/automne 2080 – scénarios de la famille B

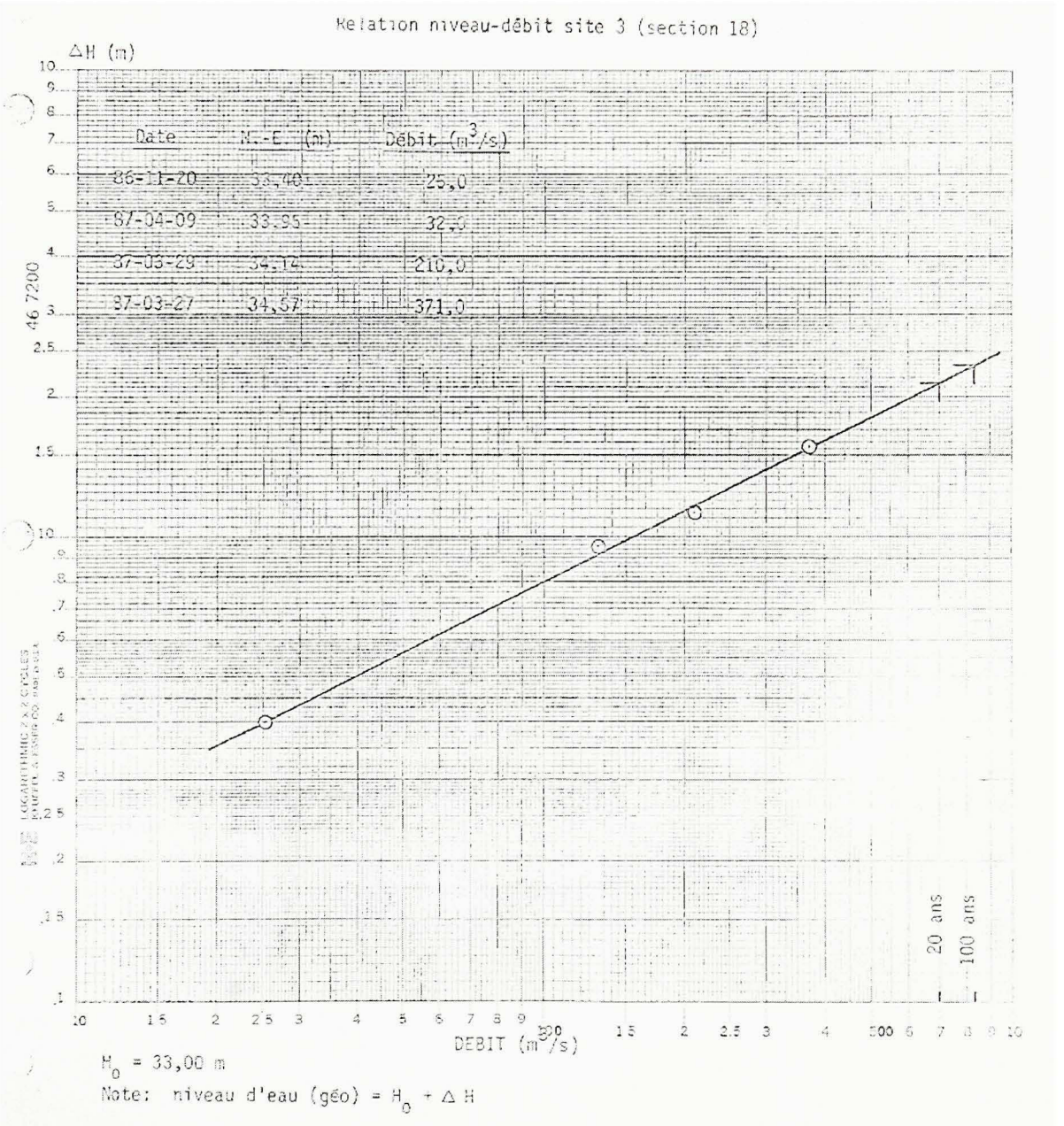
	Passé				Futur							
	Observés		Simulés		CGCM3r B1x		HadCM3 B2x		Echam4 B2		CSIRO B2	
T	XT	Écart-type	XT	Écart-type	XT	Écart-type	XT	Écart-type	XT	Écart-type	XT	Écart-type
200	907	244	923	227	788	196	842	208	628	160	855	207
100	732	183	759	173	646	149	691	158	513	121	705	158
50	578	132	612	127	520	110	557	117	411	88.5	571	117
20	407	80.7	444	80.3	376	68.8	403	73.4	295	55.2	416	74.1
10	297	51.8	334	53	281	45.3	302	48.3	219	36.1	314	49.1
5	203	30.5	236	32.3	198	27.4	213	29.4	153	21.7	223	30.1
3	143	19.2	171	21	143	17.7	154	19	110	13.9	163	19.6
2	98.4	12.6	122	14.3	101	12	110	12.9	77.3	9.37	117	13.4

Hydrogrammes obs. (pointillés) et simulés (gras) - Calibration HSAMI - chateauguay 59 03 - Comparaison d'essais



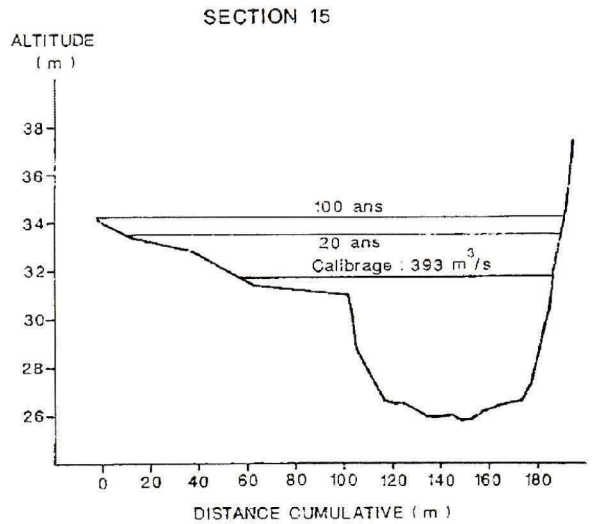
ANNEXE III

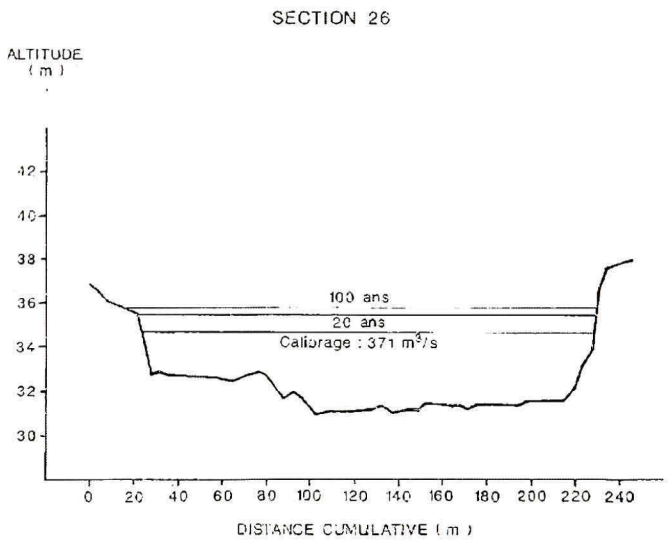
COURBE DE TARAGE DU MODÈLE HYDRAULIQUE

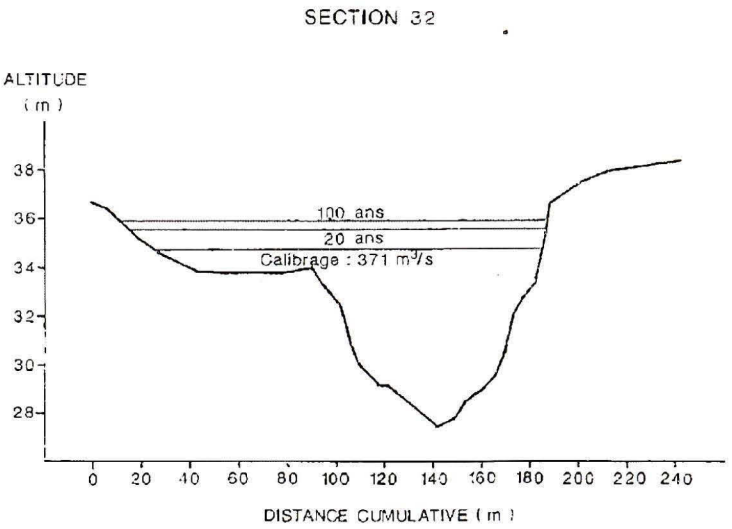


ANNEXE IV

HAUTEURS D'EAU GÉNÉRÉES PAR LES CRUES DE 20 ET 100 ANS AUX SECTION 15, 26 ET 32 DU MODÈLE HYDRAULIQUE







(Source des figures : Boucher *et al.*, 1990)

LISTE DE RÉFÉRENCES

Anctil, F., J. Rousselle, et N. Lauzon. 2005. *Hydrologie : Cheminements de l'eau*, 1er édition, Presses Internationales Polytechnique, 320p.

Arora, V.K. et G. J. Boer. 2001. «Effects of simulated climate change on hydrology of major rivers basins». *Journal of Geophysical Research*, vol. 106D, p. 3335-3348.

Awadallah, A.G., J. Rousselle et R. Leconte. 1999. «Évolution du risque hydrologique sur la rivière Châteauguay.» *Revue canadienne de génie civil*, vol. 26, p. 1-14.

Barrow E, B. Maxwell et P. Gachon. 2004. *La Variabilité et Le Changement Climatique au Canada : Le Passé, Le Présent et Le Futur*, Coll «DSCA Séries d'Évaluation Scientifique», N° 2. Toronto (Ont) : Service Météorologique du Canada, Environnement Canada, 114 p.

Bergeron, L. 1997. *Chapitre québécois de l'étude pan-canadienne sur les impacts et l'adaptation à la variabilité et au changement climatique : Tome V.* Toronto (Ont.) : Service Météorologique du Canada, Environnement Canada, , 270pp.

Boucher, J.-P., L. Hébert, et P. Bergeron. 1990. *Cartographie des zones inondables : Rivière Châteauguay à Ste-Martine.* Coll. « Rapport technique du CEHQ», MH-90-09. Québec (Qc.) : CEHQ, 98 p.

Bouillon, M.C. 1998. «Évolution historique du risque de pertes économiques dues aux inondations sur la rivière Châteauguay. Cas d'étude : ville de Huntingdon et municipalité de Hinchinbrooke.» Mémoire de maîtrise en génie civil, géologique et des mines, Montréal : École polytechnique de Montréal, 150 p.

Bouillon, M.C., F.P. Brissette, et C. Marche, 1999. «Risque d'inondation et son évolution sur la rivière Châteauguay.» *Can. J. Civ. Eng.*, Vol. 26, n°2, p. 186-196.

Breton, C. 1999. «Une méthode d'analyse et de minimisation du risque d'inondation appliquée à la rivière Châteauguay.» Mémoire de maîtrise en génie civil, géologique et des mines, Montréal : École polytechnique de Montréal, 128 p.

Brissette, F.P., R. Leconte, C. Marche, et J. Rousselle. 2003. «Historical evolution of the flooding risk in a USA/Quebec river basin», *Journal of the Water Resources Assoc.*, vol.39, n°6, p. 1385-1396.

Brooks, G.R., S.G. Evans, et J.J. Clague. 2001. «Flooding in a Synthesis of Natural Geological Hazards in Canada». *Geological Survey of Canada*, Bulletin 548, p. 101–143.

Cantin, J-F et A. Bourque. 2004. «Formation d'un programme Changements climatiques et Saint-Laurent fluvial : Pour l'évaluation des impacts et adaptations possibles». Présentation. *1er symposium Ouranos sur les changements climatiques*, (Montréal, 9-10 juin 2004).

Chaumont, D., G. Desrocher, C. Desjarlais, , P. Gachon, et R. Roy. 2005. *Développement de scénarios climatiques à des fins de prévision de la demande énergétique au Québec pour les besoins de chauffage et de climatisation.* OUR-102, Montréal (Qc.) : Ouranos inc. 23 p.

Chow, V.T., D.R. Maidment, et L.W. Mays. 1988. *Applied hydrology*, 1er édition, New York (U.S.A.): McGraw-Hill International Editions, 573 p.

Daniel Lavallée, L. Roy et C. Marche, 2000. «Un système de prévision appliqué aux crues subites de la rivière Châteauguay», *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 27, n° 6, p.1311–1315.

Desmeules, J., et J.-P. Gélinas. 1981. *Caractéristiques physiques et démographiques, eaux de surface, bassin versant de la rivière Châteauguay.* Québec (Qc.) : Ministère de l'Environnement du Québec, Direction générale des inventaires et de la recherche.

Duan, Q., S. Sorooshian, et V. Gupta. 1992. «Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall–runoff models», *Water Resources Research*, vol. 28, n° 4, p. 1015–1031.

DWD. 1996. «Artic precipitation data archiv». En ligne. Deutscher Wetterdienst (DWD) in Offenbach/Main (Germany). En ligne. <http://www.dwd.de/en/FundE/Klima/KLIS/int/GPCC/Projects/APDA/index.htm> Consulté le 31 janvier 2008.

Environnement Canada. 2004. «La voie verte». En ligne. < http://www.ec.gc.ca/ >. Consulté le 31 janvier 2008.

Fortin, V. 2000. «Le modèle météo-apport HSAMI : historique, théorie et application» Coll. «Rapport de recherche» Varenne (Qc.) : Institut de recherche en énergie d'Hydro-Québec, 68 p.

Gachon, P. 2000 «La modélisation du climat : où en sommes-nous ?» *VertigO*, vol. 1, n° 2 , p. 16-24.

GIEC, 2001. *Bilan 2001 de l'évolution du climat : les éléments scientifiques* Contribution du groupe de travail I au troisième tapport d'évaluation du GIEC, Cambridge, (U. K.) and New York (USA) : Cambridge University Press, 97 p.

Haan, C.T. 1977. *Statistical Methods in Hydrology*. 1er édition, Ames (Iowa): Iowa State University Press, 378 p.

INRS-ETE (1999) «HYFRAN». Instinut national de recherche scientifique - Chaire en Hydrologie statistique (Hydro-Québec / CRSNG / Alcan). En ligne. <http://www.inrs-ete.uquebec.ca/activites/groupes/chaire_hydrol/hyfran.html >. Consulté le 31 janvier 2008.

IPCC, 2007: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York , USA : Cambridge University Press, 996 pp.

Kendall, M.G. 1975. *Rank correlation methods*, 4th ed. London (Eng.) : Charles Griffin, 202 p.

Lavallée, D., L. Roy, et C. Marche, 2000. «Un système de prévision appliqué aux crues subites de la rivière Châteauguay.» *Can. J. of Civ. Eng.*, vol. 27, n° 6, p. 1311-1315.

Leconte, R. 1999. *Gestion des ressources hydriques,* Notes du cours CTN-537 du programment de baccalauréat Génie de la construction, Montréal : École de Technologie supérieure, pagination multiple, 223 p.

Mareuil, A. 2005. Impacts des changements climatiques sur les crues extrêmes des rivières : cas de la rivière Châteauguay, Mémoire de maîtrise en génie de la construction, Montréal, École de technologie supérieure, 125 p.

Music B. et D. Caya. 2007. «Evaluation of the Hydrological Cycle over the Mississippi River Basin as Simulated by the Canadian Regional Climate Model (CRCM)», *J. Hydrometeor.*, vol. 8, p. 969-988.

Musy A. 2005. « Cours d'hydrologie générale» En ligne, École polytechnique fédérale de Lausanne, Institut des Sciences et Technologies de l'Environnement < http://hydram.epfl.ch/e-drologie/ > Consulté le 31 janvier 2008.

Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L.,Raihi, K., Roehrl, A., Rogner, H.-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N. et Dadi, Z., 2000. *Emissions Scenarios*. Rapport spécial du Groupe de Travail III du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Cambridge (U.K.) : Cambridge University Press, 599 p.

Parker, D. E., H. Wilson, P. D. Jones, J. R. Christy, et C. K. Folland. 1996 «The impact of Mount Pinatubo on world-wide temperatures.» *International Journal of Climatology* vol. 16, n° 5, p. 487-497.

Peixoto, J.P. et A.H., Oort. 1992. *Physics of Climate*. American Institute of Physics, 520 p.

Penman H. L. 1961. «Weather, plant and sol factor in hydrology». *Weather*, Vol. 16, p. 207-219.

Planton, S, 2002. «Régionalisation des changement climatique.» *Lettre Programme International Géosphère Biosphère-Programme Mondial de Recherches sur le Climat*, vol.14, p. 23-28

Rosenzweig, C., G. Casassa, D.J. Karoly, A. Imeson, C. Liu, A. Menzel, S. Rawlins, T.L. Root, B. Seguin, P. Tryjanowski. 2007. *Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems.* Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge (UK) : Cambridge University Press.

Roy, L. 2000. Évolution du risque hydrologique sur le bassin de la rivière Châteauguay. Mémoire de maîtrise en génie de la construction, Montréal, École de technologie supérieure, 202 p.

Shapiro, S. S. et M. B. Wilk. 1965. «An analysis of variance test for normality (complete samples)», *Biometrika*, vol. 52, n° 3 and 4, p. 591-611.

Simoneau, M. 2007. État de l'écosystème aquatique du bassin versant de la rivière Châteauguay : faits saillants 2001-2004, Québec, MDDEP, direction du suivi de l'état de l'environnement, 16p.

Singh, V. P. et D.A. Woolhiser. 2002. «Mathematical modeling of wathershed hydrology», *Journal of hydrologic engineering*, vol. 7, n° 4, p. 270-292.

Somot S. 2005. Régionalisation des scénarios de changement climatique. *Environnement, Risque et Santé*, vol. 4, n° 2, 89-94

Sottile, M-F. 2006. *Changements climatiques pour la révision des normes d'efficacité énergétique dans les nouveaux bâtiments.* OUR-109. Montréal (QC) : Ouranos Inc., 20 p.

Stern, Nicholas. 2006. «The Economics of Climate Change». En ligne < . http://www.hm-treasury.gov.uk/independent_reviews/stern_review_economics_climate_change/stern_review_report.cfm >. Consulté le 12 avril 2008.

Unesco-OMM, 1992. «Glossaire international d'hydrologie en 11 langues » En ligne. <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/HINDFR.HTM >. Consulté le 31 janvier 2008.

Wald, A. et J. Wolfowitz. 1943. «An Exact Test for Randomness in the Non-Parametric Case Based on Serial Correlation» *The Annals of Mathematical Statistics*, vol. 14, n° 4 (dec.), p. 378-388.

Wilcoxon, F. 1945. «Individual Comparisons by Ranking Methods.» *Biometrics*, vol. 1, p. 80-83.

Zwiers, F.W, et V.V. Kharin. 1998. «Changes in the Extremes of the Climate Simulated by CCC GCM2 under CO2 Doubling. » *J. Climate*, vol. 11, p. 2200-2222.