ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PAR ARTICLES PRÉSENTÉE À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DU
DOCTORAT EN GÉNIE
Ph.D.

PAR
MINVILLE, Marie

POTENTIEL D'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES DE LA GESTION D'UN SYSTÈME HYDRIQUE EXPLOITÉ POUR LA PRODUCTION HYDROÉLECTRIQUE : ÉTUDE DE LA RIVIÈRE PÉRIBONKA (QUÉBEC, CANADA)

MONTRÉAL, LE 6 SEPTEMBRE 2008

© Marie Minville, 2008

CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. François Brissette, ing., Ph.D., directeur de thèse
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Robert Leconte, ing., Ph.D., codirecteur de thèse
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Christian Masson, ing., Ph.D., président du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Frédéric Monette, ing., Ph.D., membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Vincent Fortin, Ph.D., examinateur externe indépendant
Environnement Canada

M. René Roy, Ph.D., examinateur externe
Institut de recherche d'Hydro-Québec (IREQ)

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 4 SEPTEMBRE 2008

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Le format de thèse par articles en annexe a été privilégié au détriment des articles en corps de texte. Cette présentation, sous forme de thèse classique abrégée, facilite la lecture. Elle permet aussi d'établir des liens directs entre les articles pour une plus grande fluidité.

L'auteure est consciente de la dispersion des informations qu'entraîne le choix d'une thèse par articles et s'excuse auprès du lecteur s'il y a désagrément encouru. Elle croit toutefois qu'il s'agit d'une excellente alternative à la thèse traditionnelle, de par sa contribution à l'état de l'art pendant la progression des travaux. En effet, les travaux dont font l'objet cette thèse se prêtaient bien à la publication de résultats intermédiaires en raison de leur caractère linéaire.

Cette thèse présente en corps de document les grandes lignes du projet de recherche : la problématique, la revue bibliographique, le domaine d'étude, un résumé de la recherche et les recommandations. Le résumé des travaux est un complément aux articles situés en annexe. Dans cette partie, l'accent est mis davantage sur la méthodologie des travaux et les résultats intermédiaires complémentaires. Les principaux résultats sont donc explicites dans les articles et n'y sont pas répétés, à l'exception des éléments clés. Les figures et tableaux ne sont pas répétés dans le résumé, sauf pour les résultats principaux. De plus, les figures qui impliquaient de nombreuses projections climatiques sont présentées pour un seul sous-bassin représentatif des autres, afin d'alléger la présentation.

Les appendices qui succèdent les articles présentent les graphiques et figures supplémentaires, qui ne sont pas jugés essentiels à la compréhension. Les résultats y sont regroupés par thèmes. La liste de références à la fin de la thèse renferme les ouvrages consultés pour la rédaction de la thèse et des articles. La thèse étant en français et les articles majoritairement en anglais, les références citées sont dans la langue correspondant au texte duquel elles proviennent. La structure et la mise en page des articles en annexes ne sont pas uniformes car ils respectent les règles imposées par les journaux où ils ont été soumis.

REMERCIEMENTS

Accomplir un projet qui nous passionne jusqu'à la fin, c'est bien. Mais le réaliser tout en étant entourée de gens formidables, c'est encore mieux.

J'aimerais remercier dans un premier temps, toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à mes travaux.

Mille fois mercis à mes directeurs de thèse, François Brissette et Robert Leconte, pour m'avoir initiée à la recherche et guidée dans mes études supérieures. Le dosage entre votre encadrement et l'autonomie que vous m'avez laissée était plus que parfait. Merci de m'avoir encouragée à me surpasser, notamment en m'incitant à participer à des conférences et à donner des cours. Il peut être anodin pour certains de s'exprimer devant un auditoire. Pour moi, c'est sans doute un des plus grands défis professionnel et personnel que j'ai eu à relever.

Merci aux membres du jury qui ont évalué cette thèse : René Roy (Institut de recherche d'Hydro-Québec), Vincent Fortin (Environnement Canada), Christian Masson (ÉTS) et Frédéric Monette (ÉTS). Votre complémentarité a fait en sorte que tous les aspects du document ont pu être bonifiés, autant sur la forme que sur le fond. Vos commentaires étaient pertinents, constructifs et clairs. Malgré la mention d'excellence que vous avez décernée à mon travail, vos observations témoignent du fait qu'il y a toujours place à l'amélioration.

Merci aux membres du jury de l'examen doctoral : Vincent Fortin (Environnement Canada), Frédéric Monette (ÉTS) et Jean-Sébastien Dubé (ÉTS). Vos judicieux conseils ont permis dès le départ d'aligner le projet de recherche.

Merci à tous les scientifiques Ouranossiens (ou partenaires d'Ouranos) qui ont participé à leur façon au projet : Isabelle Chartier, Diane Chaumont, Georges-E. Desrochers, Isabelle Doré, Frédéric Guay, Stéphane Krau, Travis Loggan, Ghuenter Patcher, Luc Roy et Dominique Tapsoba. Les études en changements climatiques sont multidisplinaires, votre expertise m'était indispensable. Une pensée spéciale à Claudette et Anne pour leur extrême gentillesse.

Merci aux gestionnaires du système hydrique de la rivière Péribonka : Bruno Larouche et Stéphane Lavallée (Rio Tinto Alcan). Sans votre support et vos données, l'étude n'aurait pu avoir lieu.

Dans un deuxième temps, je dois avouer que j'ai eu la chance d'œuvrer dans une discipline en pleine effervescence, pour laquelle de nombreux organismes manifestaient de l'intérêt à financer la recherche. Merci au Conseil de recherches en sciences naturelles et génie du Canada (CRSNG), à Ouranos (fond Réal-Décoste), à l'École de technologie supérieure, à Rio Tinto Alcan, au Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies (FQRNT), au fond Gérard-D. Lévesque et à la fondation de l'Université du Québec. Votre contribution financière m'a évité bien des soucis.

Dans un troisième temps, je tiens à adresser des remerciements plus personnels à l'endroit de ma famille et mes amis.

Merci à ma mère, l'ingénieuse artiste, et à mon père, l'ingénieux terre à terre. Vous m'avez tout donné. Merci de m'avoir sans cesse encouragée et motivée, merci de m'avoir tant aimée, merci de m'avoir soutenue. Je vous adore. Merci à mes grands-parents. Votre fierté envers mon cheminement me touche profondément. Je vous aime tellement.

Merci à Olivier. « Une chance que je t'ai ».

Merci à mes amies pour toujours : Vicky, Mif, Pout, Chantal, Annie, Val et Mel. Je vous ai négligées ces derniers temps, je vais y remédier.

Merci à la gang du DRAME : ceux qui sont passés, ceux qui restent. J'espère sincèrement que nos chemins se croiseront sur le marché du travail. Merci aux amis gradués des autres labos et amis employés de l'ÉTS. Les jasettes de corridor, c'est toujours agréable.

Merci à Joe Nigaud et Maître Edgar. Vous avez ce don de me rendre de bonne humeur. Merci à Josette et compagnie, vous me permettez de m'évader.

À toutes et à tous, que la vie vous soit douce.

POTENTIEL D'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES DE LA GESTION D'UN SYSTÈME HYDRIQUE EXPLOITÉ POUR LA PRODUCTION HYDROÉLECTRIQUE : ÉTUDE DE LA RIVIÈRE PÉRIBONKA (QUÉBEC, CANADA)

MINVILLE, Marie

RÉSUMÉ

Des tendances significatives dans les régimes hydrologiques ont été observées au cours des dernières décennies et elles pourraient s'accentuer au cours du prochain siècle. Les exploitants de systèmes hydriques devront envisager d'ajuster la gestion afin d'atténuer les effets des fluctuations du climat. Cependant, l'incertitude des changements climatiques, l'inertie des organisations et les habitudes des exploitants freinent l'adaptation.

Les rares publications parues à présent sur le sujet se sont consacrées aux impacts sur la gestion, sans considération explicite de l'adaptation et de l'incertitude. La présente recherche vise à évaluer le potentiel d'adaptation aux changements climatiques d'un système hydrique d'après plusieurs projections climatiques. L'étude est réalisée pour la rivière Péribonka (Québec, Canada), exploitée pour la production hydroélectrique par Rio Tinto Alcan.

Les impacts des changements climatiques sur la gestion du système hydrique ont d'abord été quantifiés en ne modifiant pas la gestion actuelle. Les principaux résultats démontrent que les réservoirs seraient moins fiables, que la production hydroélectrique diminuerait et que les déversements non productibles augmenteraient sous la plupart des projections climatiques. Par la suite, le potentiel d'adaptation sur la période 2010-2099 a été investigué en modifiant les règles de gestion avec un modèle d'optimisation dynamique et stochastique. Les régimes hydrologiques qui ont servi d'intrants ont été simulés selon deux approches : (i) modélisation hydrologique conceptuelle globale et projections climatiques selon la méthode des deltas, et (ii) modélisation hydrologique distribuée à base physique et projection climatique d'un modèle régional de climat.

L'adaptation de la gestion se manifesterait par des modifications saisonnières des niveaux d'eau moyens des réservoirs. De plus, la production hydroélectrique annuelle change de -2 à +22 % par rapport à la période de référence, dépendamment de la projection climatique, du modèle hydrologique et de l'horizon. Les déversements non productibles moyens annuels augmenteraient pour toutes les projections climatiques, malgré des baisses d'hydraulicité. Cette situation serait conséquente aux changements de variabilité des apports hydrologiques.

La principale conclusion de la recherche est que l'adaptation de la gestion du système hydrique de la rivière Péribonka pourrait atténuer les effets des fluctuations du climat dans le futur. L'adaptation pourrait aussi améliorer sa performance par rapport à la période de référence 1961-1990.

Mots-clés : changements climatiques, adaptation, incertitude, système hydrique, hydrologie, production hydroélectrique, gestion des réservoirs

ADAPTATION TO CLIMATE CHANGE OF A WATER RESOURCE SYSTEM EXPLOITED FOR HYDROPOWER: STUDY OF THE PERIBONKA RIVER (QUÉBEC, CANADA)

MINVILLE, Marie

ABSTRACT

Significant trends in the hydrological regimes were observed during the last decades and they will be accentuated during next century. Water resource systems' owners will have to adjust their management to mitigate the effects of climate fluctuations. However, the uncertainty of the climate changes slows down the adaptation process.

The papers published thus far have dealt with the impacts on management, without considerating the adaptation strategies and uncertainties. The present research aims to evaluate the potential of a water resource system to adapt to climate changes, according to several climate projections. The study is carried out on the Péribonka River (Quebec, Canada), exploited for hydropower by Rio Tinto Alcan.

The possible impacts of climate changes on water resource management were initially quantified with no modifying of current operating policies, with several climatic projections. The main results show that the reservoirs would be less reliable, hydropower would decrease and unproductive spills would increase. The potential of adaptation over the period 2010-2099 was investigated thereafter by modifying the operating rules with a dynamic and stochastic optimization model. The hydrological regimes in the context of climate change were simulated according to two approaches: (i) lumped hydrological modeling and climate projections according to the delta change approach, and (ii) distributed hydrological modeling and climate projection of a regional climate model.

The adaptation is manifested by seasonal modifications of the reservoirs' average water level. Moreover, the annual average hydropower changes from -2 to +22% compared to the base period, depending on the climate projection and horizon. Annual mean unproductive spills increase for all climate projections, even combined with a decrease in hydropower. This situation is consequent with the changing variability of the hydrological regimes.

The overall conclusion of the research is that adaptation of the Péribonka water resource system could mitigate the effects of future climate fluctuations. Adaptation could also improve its performance in the future, compared to the base period 1961-1990.

Keywords : climate change, adaptation, uncertainty, water resource system, hydrology, hydropower, reservoirs

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE 4
1.1 Problématique 4
1.2 Contexte d'application 5
1.3 Objectifs des travaux 6
1.4 Hypothèses de recherche 7
1.4.1 Hypothèses initiales 7
1.4.2 Hypothèses sur le domaine d'étude 7
1.4.3 Hypothèses méthodologiques 8

CHAPITRE 2 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE 9
2.1 Impacts des changements climatiques sur les systèmes hydriques et stratégies d'adaptation 9
2.1.1 Impacts sur les systèmes hydriques 9
2.1.2 Adaptation des systèmes hydriques 11
2.2 Incertitude en impacts et adaptation 12
2.2.1 Changements climatiques 13
2.2.2 Modèles de circulation générale 13
2.2.3 Réduction d'échelle des données 14
2.2.4 Modélisation hydrologique 15
2.2.5 Modélisation des systèmes hydriques 17

CHAPITRE 3 DOMAINE D'ÉTUDE 20
3.1 Bassin versant de la rivière Péribonka 20
3.1.1 Occupation et utilisation du sol 21
3.1.2 Types de sol 21
3.1.3 Données hydroclimatiques historiques 22
3.2 Système hydrique de la rivière Péribonka 23
3.2.1 Opérations du système hydrique 24
3.2.2 Données de gestion historiques 24

CHAPITRE 4 RÉSUMÉ DE LA RECHERCHE 25
4.1 Liens entre les articles 25
4.2 Méthodologie 26
4.2.1 Vue d'ensemble 26
4.2.2 Limites temporelles de l'étude 27
4.2.3 Projections climatiques 28
4.2.4 Simulations hydrologiques 33
4.2.5 Simulations des opérations du système hydrique 36

4.3 Résultats 40
4.3.1 Projections de changements climatiques 40
4.3.2 Simulations hydrologiques 46
4.3.3 Simulation des opérations du système hydrique 51
4.4 Interprétation des résultats et discussion 58

CHAPITRE 5 CONTRIBUTIONS ET RECOMMANDATIONS 64
5.1 Contributions de la recherche 64
5.2 Recommandations, limitations et pistes de recherche 67
5.2.1 Gestion de systèmes hydriques en contexte de changements climatiques 67
5.2.2 Sources d'incertitude 69
5.2.3 Changement dans la variabilité 70

CONCLUSIONS 72

ANNEXE I Article 1: Minville (2007) 77

ANNEXE II Article 2 : Minville *et al.* (2008a) 87

ANNEXE III Article 3 : Minville *et al.* (2008b) 117

ANNEXE IV Article 4 : Minville *et al.* (2008c) 156

ANNEXE V Article 5 : Minville *et al.* (2008d) 183

ANNEXE VI Article 6 : Minville *et al.* (2008e) 211

APPENDICE A : Données climatiques 246

APPENDICE B : Données hydrologiques 252

APPENDICE C : Indicateurs de gestion du système hydrique 259

LISTE DE RÉFÉRENCES 263

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 3.1 Stations météorologiques au bassin versant de la rivière Péribonka 22

Tableau 4.1 Projections climatiques de la méthode des deltas 29

Tableau 4.2 Critères d'étalonnage et de validation du modèle hydrologique HSAMI... 34

Tableau 4.3 Sous-modèles pour la simulation des processus hydrologiques dans Hydrotel 35

Tableau 4.4 Critères d'étalonnage et de validation du modèle hydrologique Hydrotel 35

Tableau 4.5 Dates moyennes de passage du point de congélation 42

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 2.1 Amplification des incertitudes dans les études d'impacts 12

Figure 3.1 Sous-bassins, réservoirs et centrales hydroélectriques au bassin versant de la rivière Péribonka 20

Figure 3.2 Occupation du sol au bassin versant de la rivière Péribonka 21

Figure 3.3 Schéma du système hydrique de la rivière Péribonka 23

Figure 4.1 Vue macroscopique des travaux de recherche 27

Figure 4.2 Grilles des données climatiques (a) du modèle régional canadien de climat (MRCC) et (b) des observations (obs) interpolées par krigeage 31

Figure 4.3 Deltas annuels et saisonniers pour les horizons 2020, 2050 et 2080 41

Figure 4.4 Températures et précipitations moyennes sur l'ensemble du bassin versant pour la période de référence 1961-1990, comparées aux moyennes observées (MRCC) 43

Figure 4.5 Températures moyennes annuelles et saisonnières sur l'ensemble du bassin versant, pour la période de référence 1961-2099 (MRCC) 45

Figure 4.6 Précipitations moyennes annuelles et saisonnières sur l'ensemble du bassin versant, pour la période 1961-2099 (MRCC) 45

Figure 4.7 Hydrogrammes moyens annuels des horizons 2020, 2050 et 2080 (HSAMI-Deltas) 46

Figure 4.8 Hydrogrammes moyens annuels, pour la période de référence 1961-1990 (Hydrotel-MRCC) 49

Figure 4.9 Hydrogrammes moyens annuels, pour la période de référence 1961-1990 et les horizons 2020, 2050 et 2080 (Hydrotel-MRCC) 49

Figure 4.10 Hydrogrammes moyens de la période de référence 1961-1990 et les horizons 2020, 2050 et 2080, pour chaque combinaison de projections climatiques et de modèles hydrologiques 51

Figure 4.11 Production moyenne annuelle, pour la période de référence 1961-1990 et l'horizon 2050 (HSAMI-Deltas-ResSim) 52

Figure 4.12 Niveaux moyens des réservoirs, pour la période de référence 1961-1990 et les horizons 2020, 2050 et 2080 (HSAMI-Deltas-SimÉTS/OptPoly). 54

Figure 4.13 Production moyenne annuelle et saisonnière, pour la période de référence 1961-1990 et les horizons 2020, 2050 et 2080 (HSAMI-Deltas-SimÉTS/OptPoly). 55

Figure 4.14 Niveaux moyens des réservoirs, pour la période de référence 1961-1990 et les horizons 2020, 2050 et 2080 (Hydrotel-MRCC-SimÉTS/OptPoly). 56

Figure 4.15 Production hydroélectrique moyenne pour la période de 1961-2099 (Hydrotel-MRCC-SimÉTS/OptPoly). 57

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

CCSRNIES	Modèle de circulation générale du *Center for climate system research* du Japon
CEHQ	Centre d'expertise hydrique du Québec
CGCM3	Modèle de circulation générale du Centre canadien de la modélisation et de l'analyse climatique, version 3
CSIRO	Modèle de circulation générale du *Australian commonwealth scientific and research organization*
ECHAM4	Modèle de circulation générale du *Max Planck institute for meteorology*, version 4
ENSO	*El-Nino southern oscillation*
GES	Gaz à effet de serre
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
HadCM3	Modèle de circulation générale du *Hadley Centre*, version 3
HEC-ResSim	*Reservoir-system simulation model* du *Hydrologic Engineering Center of the United-States Army Corps of Engineers*
HSAMI	Modèle hydrologique des apports améliorés
MRC	Modèle régional de climat
MRCC	Modèle régional canadien du climat
MCG	Modèle de circulation générale
ONA	Oscillation nord-atlantique
OptPoly	Modèle d'optimisation de la gestion de systèmes hydriques de l'École Polytechnique de Montréal (l'abréviation est une suggestion de l'auteure)
PoWDT	Seuil des précipitations observées
PsWDT	Seuil des précipitations simulées
SimÉTS	Modèle de simulation du système hydrique de la rivière Péribonka (l'abréviation est une suggestion de l'auteure)
WeaGETS	Générateur stochastique de climat de l'École de technologie supérieure

INTRODUCTION

Des tendances significatives dans les régimes hydrologiques des moyennes à hautes latitudes ont été observées au cours des dernières décennies (Regonda *et al.*, 2005; Whitfield et Cannon, 2000). La communauté scientifique internationale reconnaît que ces tendances s'accentueront au cours du prochain siècle (GIEC, 2001a; GIEC, 2007b). Des changements dans l'hydrologie des bassins versants auraient nécessairement des répercussions sur la performance et la gestion des systèmes hydriques.

En 2004, la province du Québec, au Canada, était le quatrième producteur mondial d'hydroélectricité, avec 7 % de la production internationale (Gouvernement du Québec, 2004). La production hydroélectrique étant modulée par la ressource en eau, les exploitants devraient envisager d'adapter la gestion pour atténuer les effets des fluctuations du climat. Cependant, un facteur freinant l'adaptation est l'incertitude des changements climatiques et des modèles qui interviennent dans la simulation des apports et la gestion du système hydrique.

Les publications parues à présent sur le sujet se sont intéressées aux impacts des changements climatiques sur la gestion de systèmes hydriques ou tout au plus à une analyse de sensibilité du potentiel d'adaptation. Elles ne considéraient ni l'adaptation de la gestion selon des approches d'optimisation, ni l'incertitude des projections climatiques.

Dans ce contexte, la présente recherche vise à évaluer le potentiel d'adaptation aux changements climatiques d'un système hydrique en milieu nordique, selon plusieurs projections de changements climatiques et approches de modélisation hydrologique. L'étude est réalisée pour le système hydrique de la rivière Péribonka (Québec, Canada), qui est exploité pour la production hydroélectrique par Rio Tinto Alcan.

Ce rapport se divise en sept sections majeures. Les cinq premières parties constituent les chapitres de la thèse : problématique de recherche, revue bibliographique, domaine d'étude, résumé de la recherche ainsi que contributions et recommandations. La sixième partie correspond aux annexes qui comprennent les articles. Les appendices renferment des résultats complémentaires qui ne sont pas indispensables à la compréhension.

Le chapitre 1, qui porte sur la problématique de recherche, énonce les motivations et les objectifs des travaux. Les répercussions des changements climatiques sur la ressource en eau et les moyens actuels pour évaluer le potentiel d'adaptation sont mis en évidence. L'intérêt du bassin versant de la rivière Péribonka est ensuite justifié. Les objectifs et les hypothèses de recherche sont énoncés.

Le chapitre 2 comprend une revue bibliographique. Il fixe le cadre théorique des travaux en les situant parmi les articles scientifiques publiés sur le sujet. Les études qui se sont penchées sur la gestion de systèmes hydriques en contexte de changements climatiques sont recensées. Les différents moyens de considérer les sources d'incertitudes des changements climatiques, des projections climatiques, de la modélisation hydrologique et de la simulation de systèmes hydriques, sont exposés.

Le chapitre 3 présente le domaine d'étude. Les principales caractéristiques du bassin versant de la rivière Péribonka sont abordées et son contexte hydroclimatique est résumé. Les composantes du système hydrique sont détaillées et les principes guidant sa gestion sont expliqués.

Le chapitre 4 résume substantiellement la recherche. Les principaux jalons de la méthodologie sont présentés et les résultats sont synthétisés. Les sujets abordés sont essentiellement les projections climatiques, les régimes hydrologiques qui en résultent et les impacts sur les indicateurs de gestion. Une discussion permet de formuler des réponses à la problématique en regard aux résultats obtenus.

Le chapitre 5 souligne la contribution originale de la recherche et les principales recommandations. La contribution est présentée, avec en perspective la revue bibliographique du premier chapitre. L'apport à l'avancement des connaissances dans le créneau de recherche concerné est aussi mis en lumière. Les principales recommandations touchent les aspects qui ne faisaient pas partie des objectifs de la recherche, mais qu'il est recommandé d'investiguer en réaction aux résultats obtenus.

La sixième partie de la thèse comprend les articles scientifiques qui font ou feront l'objet de publications. Il s'agit des annexes 1 à 6. Le premier article découle de l'examen doctoral

réalisé avant l'exécution des travaux. Il justifie l'importance de s'adapter aux changements climatiques, en plus d'atténuer les gaz à effet de serre. Le second article présente les régimes hydrologiques résultant de nombreuses projections climatiques. Le troisième article propose une analyse croisée des simulations réalisées avec les différentes combinaisons de modèles hydrologiques et projections climatiques, afin de mettre en évidence les incertitudes transmises aux régimes hydrologiques. Le quatrième article est dédié à l'évaluation des impacts des changements climatiques sur la performance d'un système hydrique, dans la situation où les règles de gestion ne seraient pas adaptées aux nouveaux régimes hydrologiques. Le cinquième article évalue le potentiel d'adaptation aux changements climatiques de la gestion d'un système hydrique. L'approche de modélisation hydrologique préconisée est globale et les projections climatiques multiples sont issues de la méthode des deltas. Le sixième article traite aussi de l'adaptation aux changements climatiques de la gestion d'un système hydrique, mais selon une approche de modélisation distribuée et une projection climatique issue d'un modèle régional de climat.

Enfin, la dernière partie de la thèse renferme des résultats complémentaires, mais qui ne sont pas essentiels à la compréhension. Ils sont regroupés par thèmes aux appendices A à C.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE DE RECHERCHE

Ce chapitre met en perspective le projet de recherche. En premier lieu, la problématique est exposée. En second lieu, les objectifs du projet en regard à cette problématique sont énoncés. En troisième lieu, les hypothèses qui ont servi de base à la recherche sont présentées.

1.1 Problématique

Jusqu'à récemment, le climat de la terre fluctuait selon la variabilité naturelle. La gestion des réservoirs s'appuyait et s'appuie toujours sur la variabilité naturelle du climat du passé récent. Ils sont opérés en présumant que les apports observés sont représentatifs de ceux du futur. Or, les observations climatiques des dernières décennies ne s'inscrivent plus dans cette variabilité en raison des émissions accrues des gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique (GIEC, 2007a).

La situation actuelle est qu'une hausse de la température moyenne mondiale de 0,7 °C a été enregistrée depuis un siècle (GIEC, 2007b). Ce réchauffement a perturbé le système climatique et les processus du cycle de l'eau. Au Québec, les variations se sont répercutées sur les régimes hydrologiques. Au cours des dernières décennies, des cours d'eau ont présenté des baisses de débits en été et des hausses en hiver, en plus de crues printanières prématurées (Whitfield et Cannon, 2000).

En ce qui a trait au futur, les modèles de circulation générale suggèrent que les températures et précipitations annuelles continueront d'augmenter au Québec, avec d'importantes variations saisonnières et spatiales. Dans ce contexte, un enjeu concerne la perturbation des régimes hydrologiques et de la gestion des systèmes hydriques (Lemmen *et al.*, 2008). Des études effectuées sur des systèmes hydriques aux États-Unis et au Canada ont évalué la performance potentielle future de la gestion des réservoirs avec les règles d'opération actuelles. Ces études ont conclu que les systèmes hydriques seraient moins performants et plus vulnérables, à moins que leur gestion ne soit adaptée.

Un facteur majeur freinant la mise en place de mesures d'adaptation des règles d'opération des réservoirs est l'incertitude des changements climatiques et des modèles qui interviennent dans le processus. Les principales sources d'incertitude sont les scénarios d'émissions des GES, les projections de climat des différents modèles climatiques et techniques de réduction d'échelle et, conséquemment, les débits simulés par les modèles hydrologiques utilisant ces intrants. Les approches multiscénario et multimodèle constituent des manières de considérer ces sources d'incertitude. Les résultats de ces approches pourraient servir de guide aux gestionnaires de systèmes hydriques pour l'élaboration de politiques de gestion à long terme. La détection de tendances pourrait indiquer les tangentes à envisager pour l'adaptation de la gestion et ainsi déloger l'inertie organisationnelle quant aux habitudes de gestion.

1.2 Contexte d'application

Le contexte de la problématique étant régional, le projet de recherche l'aborde pour le bassin versant de la rivière Péribonka.

Un premier intérêt repose sur l'usage principal de la ressource en eau au bassin versant de la rivière Péribonka : la production hydroélectrique. L'énergie produite par les centrales sert à alimenter les usines de production d'aluminium de la compagnie Rio Tinto Alcan. Cet usage spécifique fait en sorte que la demande est moins influencée par les changements climatiques, comparativement aux besoins énergétiques résidentiels ou commerciaux.

Un second intérêt de ce bassin réside dans la disponibilité et la qualité des données nécessaires à l'accomplissement des études hydrologiques et de gestion du système hydrique. La collaboration avec les gestionnaires de Rio Tinto Alcan contribue largement à l'accessibilité de ces données.

Enfin, un troisième intérêt du domaine d'étude est dans sa situation géographique dans la province du Québec. Les résultats obtenus seront nécessairement représentatifs des conséquences des changements climatiques sur d'autres systèmes hydriques à proximité (Saguenay, Mauricie et Côte-Nord).

1.3 Objectifs des travaux

À la lumière de ce qui précède, la recherche vise ultimement à évaluer le potentiel d'adaptation aux changements climatiques du système hydrique de la rivière Péribonka, sous plusieurs projections climatiques. Ce potentiel d'adaptation est estimé en simulant le comportement du système hydrique soumis à divers régimes hydrologiques en contexte de changements climatiques. Les indicateurs de production hydroélectrique, de rendement des centrales, de déversements non productibles et de fiabilité des réservoirs permettent de quantifier la capacité du système hydrique à s'adapter.

Le produit final de ce travail constituera une référence méthodologique pour les travaux futurs qui porteront sur l'évaluation des impacts des changements climatiques sur la gestion de systèmes hydriques et sur le déploiement de stratégies d'adaptation. De plus, les résultats seront un indicateur des tendances dans le centre du Québec, au cours du prochain siècle, de la gestion de l'eau et de la performance éventuelle des systèmes hydriques existants.

En ce qui a trait aux objectifs intermédiaires, ils consistent à générer des scénarios de changements climatiques régionaux, à évaluer les régimes hydrologiques sous ces scénarios et à simuler les opérations des réservoirs. Ces objectifs sont abordés de manière à considérer les incertitudes par l'entremise d'une approche multiscénario et multimodèle. D'une part, deux approches distinctes interviennent pour la production des scénarios de changements climatiques applicables à l'échelle d'un bassin versant : la méthode des deltas et la réduction d'échelle dynamique. D'autre part, deux modèles hydrologiques sont utilisés pour la simulation des régimes hydrologiques résultant de ces scénarios climatiques : HSAMI, un modèle conceptuel global, et HYDROTEL, un modèle distribué à base physique.

Pour l'étude d'adaptation de la gestion du système hydrique, le modèle global est jumelé aux projections de changements climatiques de la méthode des deltas, alors que le modèle distribué est associé à la projection de la réduction d'échelle dynamique. La première combinaison est conceptuelle, alors que la seconde est physique. De plus, les modèles hydrologiques et les projections climatiques sont combinés, dans le cadre d'analyse croisée, pour investiguer l'incertitude des projections climatiques et des modèles hydrologiques dans les études d'impacts hydrologiques des changements climatiques.

1.4 Hypothèses de recherche

Les hypothèses de recherche ont permis d'orienter et de circonscrire les travaux de la thèse. Elles sont de trois types : hypothèses initiales, hypothèses sur le domaine d'étude et hypothèses méthodologiques.

1.4.1 Hypothèses initiales

Le développement du sujet de la thèse s'est articulé dès le départ autour de quatre hypothèses initiales.

La première hypothèse est que les changements climatiques auront des conséquences sur l'hydrologie des bassins versants, qui se répercuteront sur la performance et la gestion des systèmes hydriques. Ces changements seraient à l'échelle annuelle et saisonnière.

La seconde hypothèse initiale est que l'adaptation de la gestion des systèmes hydriques pourrait atténuer les effets des fluctuations du climat dans le futur.

La troisième hypothèse est que sous certaines projections climatiques, l'adaptation pourrait améliorer la performance du système hydrique, par rapport à la période de référence.

La dernière hypothèse est que les résultats d'une approche de modélisation hydrologique distribuée et d'une projection de réduction d'échelle dynamique, seraient dans la plage d'incertitude des résultats de nombreuses modélisations hydrologiques globales avec des projections climatiques de la méthode des deltas.

1.4.2 Hypothèses sur le domaine d'étude

Le système hydrique de la rivière Péribonka fait partie du système du Saguenay-Lac-Saint-Jean. Plus particulièrement, la gestion des opérations du système hydrique de la rivière Péribonka est liée à la gestion du système hydrique de la rivière Saguenay et du Lac-Saint-Jean, situé en aval. Les travaux de cette thèse considèrent celui de la rivière Péribonka comme une entité indépendante et font abstraction des autres systèmes hydriques. Cette hypothèse est admissible dans la mesure où les impacts des changements climatiques sont comparés à un passé récent simulé et non aux observations. La capacité des modèles à reproduire les observations est tout de même validée pour justifier leur utilisation.

La seconde hypothèse sur le domaine d'étude est que les travaux ne considèrent pas la centrale hydroélectrique récente, mise en service par Hydro-Québec en 2008, pour exploiter le potentiel hydroélectrique résiduel. Les raisons de ce choix sont multiples. D'abord, aucune donnée observée n'était disponible pour valider le modèle hydrologique du bassin versant intermédiaire. Ensuite, cette centrale influencerait peu les apports en eau aux centrales situées en aval car elle est au fil de l'eau.

De plus, la dérivation partielle de la rivière Manouane, en vigueur depuis 2003 vers le système hydrique Bersimis, a aussi été négligée en raison de l'absence de données historiques pour la validation des modèles.

1.4.3 Hypothèses méthodologiques

Les hypothèses d'ordre méthodologique touchent les contextes d'application des modèles.

En particulier, il est supposé que les modèles hydrologiques calibrés avec les données météorologiques du passé récent sont transférables dans le futur. La première hypothèse méthodologique est que les équations des différents processus hydrologiques ne sont pas extrapolées à l'extérieur de leur domaine d'application. Les différentes combinaisons de modèles hydrologiques globaux et distribués, des projections climatiques des deltas et de la réduction d'échelle dynamique, sont donc appropriées pour projeter les changements de régimes hydrologiques en contexte de changements climatiques (Chartier, 2006).

Une seconde hypothèse est qu'il y a davantage d'incertitude dans la projection climatique que dans la modélisation hydrologique.

La troisième hypothèse méthodologique est que les contraintes de gestion en contexte de changements climatiques seraient les mêmes que celles du passé récent dans les modèles de simulation du système hydrique et d'optimisation des règles d'opération. Les capacités des équipements, tels les groupes turbine-alternateur et ouvrages de régularisation, demeurent aussi inchangées.

Enfin, les objectifs de gestion, qui visent la maximisation de la production hydroélectrique sans contrainte dans la demande, restent aussi les mêmes.

CHAPITRE 2

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

Ce chapitre introduit dans un premier temps les études publiées se rapprochant le plus des travaux proposés, c'est-à-dire qui ont pour but d'évaluer les impacts des changements climatiques sur la gestion de systèmes hydriques. Dans un deuxième temps, des études qui se sont consacrées à l'évaluation des incertitudes des changements climatiques, de la modélisation hydrologique et de la simulation des systèmes hydriques, sont recensées.

Il est à noter que les revues bibliographiques propres aux articles en annexe sont davantage précises et détaillées.

2.1 Impacts des changements climatiques sur les systèmes hydriques et stratégies d'adaptation

Cette section synthétise dans un premier temps les études qui ont tenté d'évaluer les impacts des changements climatiques sur les systèmes hydriques et la production hydroélectrique. Dans un deuxième temps, celles, plus rares, qui ont suggéré des stratégies d'adaptation sont résumées.

2.1.1 Impacts sur les systèmes hydriques

Les gestionnaires de systèmes hydriques devront développer des plans de gestion pour atténuer les effets des fluctuations du climat anticipées avec les changements climatiques (Snover *et al.*, 2003). Actuellement, la ressource en eau est gérée en supposant que les statistiques des événements historiques sont un bon estimé des probabilités des événements futurs (Salathé *et al.*, 2007).

Déjà, les observations des dernières décennies en Amérique du Nord présentent des tendances dans les variables hydroclimatiques. Kalra *et al.* (2007) ont réalisé de nombreux tests statistiques pour détecter les tendances et les changements dans les débits et l'équivalent en eau de la neige aux États-Unis, pendant la période 1951-2002, à l'échelle annuelle et saisonnière. Leurs résultats indiquent qu'il y a une tendance graduelle à l'augmentation des

débits dans le nord-est et dans l'est des États-Unis. De plus, des changements de débits moyens annuels et printaniers statistiquement significatifs ont été détectés dans la région des Grands-Lacs. Toutefois, aucune tendance ou changement significatifs dans l'équivalent en eau de la neige n'a été observé.

Dans le même ordre d'idées, Stewart *et al.* (2005) ont analysé les crues printanières de 1948 à 2002 au nord-ouest des États-Unis. Ils ont constaté des devancements de crue printanière statistiquement significatifs de l'ordre d'une à quatre semaines. Ils ont aussi conclu que les variations interannuelles dans l'amplitude de la crue étaient corrélées avec les hausses de températures hivernales et printanières.

Le climat étant en changement à l'échelle globale depuis 1960 (Ouranos, 2004), quelques recherches ont été effectuées pour vérifier si les règles actuelles seraient appropriées dans le futur. La plupart des études se sont limitées aux impacts des changements climatiques sur certains indicateurs de gestion avec les règles actuelles. Tout au plus, une analyse de sensibilité a été effectuée afin de mesurer la réponse du système sous de nouvelles règles arbitraires.

Dans ce sens, Christensen *et al.* (2004) ont lié un MCG à un modèle hydrologique distribué pour une étude de changements climatiques au vaste bassin versant de la rivière Colorado. La méthodologie a d'abord consisté à préparer des scénarios de changements climatiques selon l'approche des deltas pour un scénario de GES. Ensuite, ces scénarios ont été introduits dans un modèle hydrologique. Ils ont évalué les impacts sur le système hydrique du bassin en entrant les séries d'apports potentiels futurs dans un modèle de simulation programmé pour les besoins de l'étude, où les règles d'opération actuelles étaient intégrées. Les critères analysés pour l'étude d'impacts étaient la production hydroélectrique, l'approvisionnement en eau et le contrôle des inondations. Leur principale conclusion est que des baisses de production hydroélectriques se produiraient en contexte de changements climatiques avec leurs scénarios d'apports hydrologiques.

Markoff et Cullen (2008) ont étudié les impacts des changements climatiques sur la production hydroélectrique des installations du Pacific Northwest Power and Conservation Council aux États-Unis. En tout, 35 projections climatiques fabriquées selon la méthode des

deltas, pour les horizons 2020 et 2050, ont été incorporées à un modèle hydrologique à grande échelle. Les apports hydrologiques futurs ont par la suite été incorporés à deux modèles de gestion des réservoirs, de concert avec les règles de gestion non adaptées, afin de déterminer les impacts des changements climatiques sur la production hydroélectrique. Ils concluent que la production hydroélectrique diminue pour la plupart des projections climatiques dans le futur. Toutefois, ils précisent que les résultats sont pessimistes, en raison de leur méthodologie qui n'optimise pas les règles de gestion avec les régimes hydrologiques futurs.

2.1.2 Adaptation des systèmes hydriques

L'adaptation aux changements climatiques de la gestion des systèmes hydriques est un sujet peu abordé dans les publications scientifiques. Un rapport rédigé par Arnell et Hulme (2000) avance que les États-Unis, la Chine, la Grèce, la Suisse et l'Allemagne ne tenaient pas encore compte des changements climatiques dans les procédures d'évaluation de la sécurité des barrages. Ceux-ci ont proposé une série de recommandations. Ils affirment que les évaluations des effets des changements climatiques sur la gestion de la ressource en eau devraient être effectuées à partir de plusieurs modèles et qu'il devrait être considéré de replanifier les règles de gestion des réservoirs existants afin de les adapter en optant pour une approche adaptative basée sur plusieurs scénarios.

L'une des stratégies d'adaptation de la gestion de la ressource en eau est par le changement des règles d'opération des systèmes (GIEC, 2001b). L'étude réalisée par Payne *et al.* (2004) est l'une des rares qui ont tenté d'adapter concrètement les règles d'opération des réservoirs dans un contexte de changements climatiques par l'utilisation successive de modèles climatique, hydrologique et de gestion des systèmes hydriques. Ils n'ont toutefois pas eu recours à des techniques d'optimisation des opérations. Ils ont suivi sensiblement la même méthodologie que Christensen *et al.* (2004), dans le cadre d'un article « compagnon » résumé à la rubrique 2.1.1, mais pour le bassin versant de la rivière Columbia dans le sud-ouest canadien. Les apports futurs ont été introduits dans le modèle de simulation de la ressource hydrique, de pair avec des règles d'opération modifiées par l'entremise d'une analyse de sensibilité (non optimisées). Payne *et al.* (2004) ont donc proposé un avant-goût de mesures

d'adaptation pour contrer la baisse de performance de la gestion en regard aux nouvelles situations hydrologiques anticipées. Ils ont analysé les impacts sur les critères de fiabilité, de dommages causés par les inondations et de revenus provenant de la production hydroélectrique. Ces pistes de solution se rapportaient à des changements dans les dates de remplissage et de vidage des réservoirs pour contenir la crue, des modifications quant à la saisonnalité de la demande en énergie, et des augmentations des niveaux d'emmagasinement minimums.

2.2 Incertitude en impacts et adaptation

Les publications rapportées à la section précédente sont les plus avancées sur les impacts et l'adaptation de systèmes hydriques. Ces études ne tiennent pas explicitement compte de l'incertitude à plusieurs niveaux, attribuable aux changements climatiques, à la modélisation du climat et des régimes hydrologiques ainsi qu'à la simulation des opérations des systèmes hydriques. Or, l'incertitude s'amplifie à chaque étape de modélisation, comme schématisé à la figure 2.1.

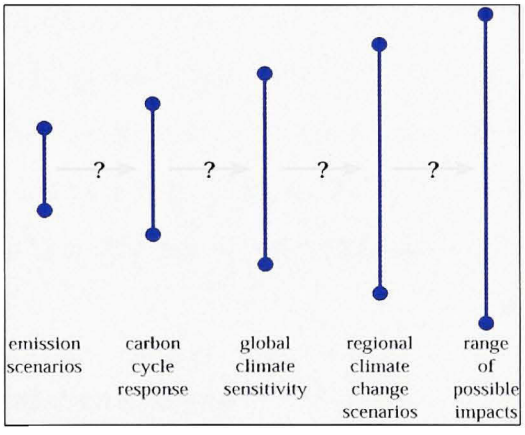


Figure 2.1 ***Amplification des incertitudes dans les études d'impacts.***
Source : GIEC (2001b)

Dans le cas d'une étude d'impacts des changements climatiques sur un système hydrique considérant explicitement les incertitudes globale et partielles, les travaux de Schäfli (2005) constituent une référence. Une méthode est proposée pour quantifier l'incertitude pour un petit bassin versant dans les Alpes suisses. Particulièrement, l'incertitude liée à chaque étape et l'incertitude totale sont quantifiées en combinant successivement les diverses sources liées

aux projections climatiques, aux scénarios climatiques et aux apports. Les incertitudes sont représentées avec les critères de performance de vulnérabilité, fiabilité, résilience et production hydroélectrique. Aucune mesure d'adaptation n'a été suggérée, compte tenu du fait que le système hydrique étudié n'est pas géré selon des règles d'opération rigoureuses. De plus, les conséquences sur les débits de l'utilisation d'un MCG et de scénarios d'évolution de GES en particulier ne sont pas illustrées. Les statistiques associées aux résultats de l'ensemble des scénarios sont plutôt montrées.

En bref, les études d'impacts sont soumises à des sources d'incertitude et cette section propose des avenues pour les considérer. Ces exemples ne sont pas nécessairement dans un cadre de travaux sur les changements climatiques ou d'impacts sur les systèmes hydriques. Néanmoins, il est spéculé qu'elles bénéficieraient à ce contexte.

2.2.1 Changements climatiques

Une source d'incertitude relevant des changements climatiques provient du comportement des sociétés et par conséquent de l'évolution des émissions de GES. À ce sujet, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2000) a élaboré des scénarios d'émission de GES équiprobables. Une façon de quantifier cette incertitude est par l'utilisation de projections climatiques découlant de plusieurs familles de scénarios d'émissions de GES. Le choix d'un scénario d'émissions de GES s'avère une source d'incertitude d'importance moindre par rapport au choix du modèle climatique (Schäfli, 2005).

2.2.2 Modèles de circulation générale

L'incertitude des projections climatiques se manifeste par la réponse d'un modèle unique ou de plusieurs modèles.

Les MCG sont différents les uns des autres en raison de leur paramétrisation et équations internes reproduisant le système climatique et ses interactions. L'incertitude d'un modèle unique provient de la paramétrisation du modèle. Elle peut être cernée en effectuant des simulations Monte-Carlo, c'est-à-dire en générant plusieurs combinaisons de paramètres internes des modèles climatiques en leur attribuant des densités de probabilité. Prudhomme *et*

al. (2003) mentionnent que les erreurs de ce type dans les simulations de la période de référence seront du même ordre de grandeur que pour les simulations futures.

Une façon de limiter le nombre de projections climatiques dans une étude d'impacts hydrologiques est la méthode d'encadrement des incertitudes. À ce sujet, Croley (2003) suggère d'utiliser quatre modèles, soit à tendances plus ou moins chaudes et plus ou moins humides. Cette méthode permet de maximiser le champ des réalisations hydrologiques potentielles.

2.2.3 Réduction d'échelle des données

Les MCG génèrent des variables climatiques à grandes échelles conséquentes à des forçages radiatifs. Ils ne permettent pas de capturer les effets régionaux occasionnés par exemple par les montagnes ou les variations de l'utilisation du sol, s'ils sont en-deçà de la résolution des modèles.

Les méthodes de réduction d'échelle des données établissent le lien entre le climat global et les impacts locaux (Salathé *et al.*, 2007). Une part de l'incertitude des impacts hydrologiques des changements climatiques provient de la technique de réduction d'échelle utilisée. Les techniques de réduction d'échelle sont statistiques ou dynamiques.

Selon Salathé *et al.* (2007), les techniques de réduction d'échelle statistiques ont comme avantage, par rapport à la réduction d'échelle dynamique, d'exiger moins de ressources informatiques et de permettre une plus large gamme de scénarios climatiques. La méthode se base sur l'établissement de liens entre les prédicteurs à grande échelle des MCG et les variables dépendantes à petite échelle (observations aux stations). Un inconvénient est qu'elle repose sur la supposition que le lien établi selon le passé et valable dans le futur. En ce qui a trait à la méthode dynamique, les modèles régionaux de climat (MRC) en sont l'application même. Un inconvénient de cette méthode est que les MRC transportent l'incertitude des modèles globaux, car ils y sont emboîtés. Bref, la qualité de ces modèles est aussi limitée par les incertitudes des modèles globaux. Toutefois, leur intérêt repose sur la simulation du système climatique à plus petite échelle que les MCG selon les lois de la physique et de la thermodynamique.

Il importe de mentionner qu'une approche élémentaire, ni statistique ni dynamique, a été développée afin d'utiliser les résultats des modèles globaux à une échelle régionale. Il s'agit de la méthode des deltas. Cette technique applique aux données journalières historiques la différence entre les données mensuelles simulées futures et de la période de contrôle. Son principal reproche est qu'elle ne modifie pas les structures temporelles et spatiales de précipitations et de températures (Diaz-Nieto et Wilby, 2005; Fowler *et al.*, 2005).

Néanmoins, une démarche visitée par Mareuil *et al. (2007)* et Minville *et al.* (2008) consiste à lier les scénarios provenant de la méthode des deltas à un générateur stochastique de climat, afin de produire plusieurs séries synthétiques représentatives de la série originale. Cette approche combinée permettait de tenir compte en partie de la variabilité naturelle du climat, donc d'une plus grande variabilité interannuelle.

2.2.4 Modélisation hydrologique

La transférabilité dans le futur d'un modèle hydrologique est une incertitude fondamentale (Salathé *et al.*, 2007). Les modèles hydrologiques jouent un rôle central pour l'évaluation de la disponibilité de la ressource en eau et il est pertinent de se questionner sur l'utilisation des modèles calibrés selon le passé à des études futures (Bergström *et al.*, 2002). Selon Odgen et Julien (2002) et Wigmosta *et al.* (2002), les modèles numériques à base physique sont supérieurs aux autres types en ce qui concerne la prévision des conditions hydrologiques futures produites par les changements climatiques ou par des modifications dans l'aménagement du territoire, puisqu'ils s'appuient sur les propriétés du bassin. Jones *et al.* (2006) soutiennent que bien qu'il est souvent statué que les modèles à base physique sont à privilégier pour des études en contexte de changements climatiques, cette hypothèse n'a jamais été rigoureusement testée. Les modèles conceptuels distribués ou globaux peuvent aussi être utilisés en vérifiant leur applicabilité dans le futur, notamment en évaluant le comportement des modèles spécifiquement pour des événements extrêmes observés dans l'historique (Dietterick *et al.*, 1999). Carpenter et Georgakakos (2006) mentionnent que même si les modèles distribués offrent un bon potentiel pour améliorer les simulations hydrologiques, ils sont plus sensibles à la qualité des données de patrons précipitations.

Dans un autre ordre d'idées, Prudhomme *et al.* (2003) mentionnent que la plus grande incertitude pour une étude d'impacts hydrologiques relève du modèle climatique. Toutefois, il y a des incertitudes liées à la modélisation hydrologique et elles sont de trois ordres : la paramétrisation interne des modèles, la réponse d'un seul modèle et de plusieurs modèles.

En premier lieu, les incertitudes liées à la paramétrisation interne des modèles peuvent être limitées en ayant recours à plusieurs arrangements de paramètres, notamment en effectuant des simulations Monte-Carlo, de concert avec des analyses bayésiennes, afin de déterminer les combinaisons offrant de bonnes performances à l'étalonnage (Engeland *et al.*, 2005; Kuczera et Parent, 1998). Afin de diminuer les incertitudes de l'étalonnage des paramètres des modèles hydrologiques, Bergström *et al.* (2002) proposent une méthode pour calibrer sur d'autres observations, telles la hauteur de neige ou l'humidité du sol, à divers endroits du bassin versant. Cet étalonnage permet d'abaisser les sources d'incertitudes liées à des résultats qui sont acceptables globalement, mais qui peuvent dissimuler des problèmes liés à la représentation des processus internes bassin versant (Bathurst *et al.*, 2004).

En second lieu, l'incertitude liée à un modèle unique provient des processus simulés et de sa structure (sa discrétisation par exemple). Booij (2003) propose d'abaisser les sources d'incertitude liée à la modélisation hydrologique en choisissant la discrétisation optimale de la grille des modèles distribués. Dans ce sens, il présente une méthodologie afin de choisir une résolution pouvant saisir le processus dominant du bassin versant simulé. Une autre façon de diminuer l'incertitude liée à la réponse d'un modèle unique est par l'approche multistructure de Butts *et al.* (2004). Cette méthode consiste à produire plusieurs modèles pour lesquels les résolutions et les équations utilisées pour décrire un processus hydrologique sont différentes.

En troisième lieu, une manière de limiter les incertitudes de la modélisation hydrologique est par l'approche multimodèle (Georgakakos *et al.*, 2004; Regonda *et al.*, 2006). Il s'agit d'utiliser plusieurs sorties de modèles et de considérer l moyenne comme étant la certitude, afin de quantifier l'incertitude d'un modèle en particulier au détriment des autres.

D'un tout autre point de vue, Pietroniro (2001) remet en cause la façon traditionnelle de lier les données climatiques aux modèles hydrologiques, communément appelée couplage

unidirectionnel. Bien qu'un grand nombre de recherches aient été effectuées selon cette approche, Hu (1997) et Pietroniro (2001) la qualifient de trompeuse puisque certains processus atmosphériques et hydrologiques de surface y sont indépendamment et doublement traités. Ils avancent que l'approche de liaison de modèle est inadéquate et que les études futures devront incorporer une méthode prenant en charge la rétroaction à l'interface atmosphère-surface. Pour cette raison, l'utilisation du couplage unidirectionnel peut être substituée par l'approche du couplage bidirectionnel (Pietroniro, 2001). Le couplage bidirectionnel est le couplage d'un modèle climatique à un modèle hydrologique par l'entremise d'un schéma de surface commun pour simuler les interactions à l'interface. Bien que cette approche soit très attrayante pour obtenir des données plus réalistes et ainsi diminuer les sources d'incertitudes (Pietroniro, 2001), les modèles couplés ne sont accessibles qu'aux organisations qui développent les modèles de climat et qui disposent d'équipements informatiques relativement performants.

2.2.5 Modélisation des systèmes hydriques

Les sections précédentes ont couvert les outils pouvant être utilisés conjointement afin d'évaluer les impacts des changements climatiques sur les régimes hydrologiques. Dans le cas où les apports sont régularisés par des ouvrages, cette approche ne mène pas à une fin puisque les écoulements sont naturels et contrôlés. Les bassins gérés font donc intervenir des outils de gestion des systèmes hydriques : des modèles d'optimisation et de simulation. Ils sont basés sur différentes approches mathématiques, statistiques et physiques. Jusqu'à récemment, peu de chercheurs se sont intéressés à l'application de ces modèles dans le cadre d'études de changements climatiques. Ils sont tout de même présentés succinctement car ils doivent nécessairement être utilisés pour mener à terme une étude d'impacts et d'adaptation de systèmes hydriques. L'accent est mis sur leur applicabilité en contexte d'incertitude.

D'un point de vue général, les modèles de gestion sont source d'incertitude puisqu'ils requièrent des simplifications (discrétisation, regroupement d'usagers ou de réservoirs). La modélisation est aussi limitée par les ressources informatiques, particulièrement en raison du « curse of dimensionality » (Karamouz *et al.*, 2005), c'est-à-dire la présence d'un trop grand nombre de variables qui empêchent la résolution d'un problème d'optimisation complexe.

2.2.5.1 Modèle d'optimisation

Il existe plusieurs façons de calculer des règles de gestion d'un système hydrique. Labadie (2004) dresse l'état de l'art des méthodes.

Les problèmes de gestion de réservoir sont plus souvent statués comme étant des problèmes d'optimisation. Les buts sont variés : maximisation de profits liés à la distribution à des usagers (production hydroélectrique, approvisionnement en eau ou irrigation), minimisation de déversements, optimisation de certains critères de performance associés au contrôle des inondations et bien d'autres. Leur solution est compliquée en raison de la grande quantité de variables impliquées, la non-linéarité des systèmes dynamiques et la nature stochastique des variables (Mousavi *et al.*, 2004).

Les modèles d'optimisation permettent de déduire des règles d'opération de réservoirs qui déterminent la quantité d'eau à relâcher ou à transférer à un autre réservoir (Wurbs, 1993). Concrètement, une règle d'opération de réservoir peut se présenter sous forme de graphiques, d'équations ou de tableaux. Ces opérations peuvent être sur des bases saisonnière, mensuelle, journalière ou horaire (Karamouz *et al.*, 2003). Karamouz *et al.* (2003) les classifie en deux catégories, soit statique ou dynamique.

Une règle statique ne considère pas l'état du système et les conditions hydrologiques. Elle sert généralement de guide pour les gestionnaires et l'expérience de ces derniers est le principal moteur de décision quant aux opérations. L'un des désavantages des règles statiques est qu'elles ne tiennent pas compte des apports et de leur incertitude ainsi que de la présence d'un système à plusieurs réservoirs. En effet, l'environnement des systèmes hydriques est dynamique de par leur nature, l'économie, les lois et les sciences (Brass et Schumann, 2003).

Une règle dynamique peut se présenter sous forme d'un tableau dictant les déversements en fonction de l'état d'emmagasinement et des apports prévus (Karamouz *et al.*, 2003). Ce type de règles est utile afin de tenir compte de ces fluctuations parce que la gestion de l'eau peut être affectée par la variabilité du climat, la demande et le marché, (Georgakakos *et al.*, 2005)

Les modèles mathématiques qui résolvent les problèmes d'optimisation sont linéaires, non-linéaires, dynamiques, déterministes, stochastiques, discrets ou continus. Les modèles dynamiques et stochastiques à variables discrètes permettent de considérer l'incertitude des apports (nature stochastique), l'état du système dans le temps (dynamique) et se résolvent plus aisément (variables discrétisées). Pour ces raisons, il est jugé qu'ils constituent une avenue à privilégier pour une étude en contexte de changements climatiques.

2.2.5.2 Modèle de simulation

Les modèles de simulation sont une représentation du système hydrique qui sert à simuler son comportement selon des règles d'opération préétablies par un modèle d'optimisation (Oliveira et Loucks, 1997; Rao *et al.*, 2001; Wurbs, 1993). Ils permettent donc de faire cheminer l'eau d'un système hydrique de l'amont vers l'aval.

Malgré le développement de modèles d'optimisation, la majorité des études portant sur la gestion des réservoirs se base sur un modèle de simulation uniquement (Lund et Guzman, 1999). Les scénarios d'opération sont effectués selon une technique d'essais et erreurs et le but est d'obtenir une solution quasi optimale (Loucks *et al.*, 1981; Rao *et al.*, 2001).

En résumé, les modèles de simulation utilisés conjointement avec plusieurs scénarios dans un processus itératif constituent une alternative aux modèles d'optimisation. Srikanthan et McMahon (2001) soutiennent qu'une difficulté majeure dans les opérations des systèmes est la quantification des incertitudes qui résultent de la variabilité naturelle du climat, c'est-à-dire la nature stochastique des apports. Pour les systèmes complexes, la façon de tenir compte de cette incertitude est par l'incorporation de la nature stochastique implicitement dans le modèle, en générant des séries d'apports synthétiques à entrer en tant que séries déterministes, afin de rechercher un optimum local (Rao *et al.*, 2001). Les règles de gestion peuvent aussi être fabriquées de manière explicite en tenant compte de la variabilité des apports par le biais de densité de probabilités (Labadie, 2004). Turgeon (2005) a intégré cette méthode dans un modèle d'optimisation de la gestion.

CHAPITRE 3

DOMAINE D'ÉTUDE

Ce chapitre expose le domaine d'étude, en particulier les caractéristiques du bassin versant et du système hydrique de la rivière Péribonka. Les données historiques sont aussi présentées.

3.1 Bassin versant de la rivière Péribonka

Le bassin versant de la rivière Péribonka est localisé dans le centre-sud de la province du Québec au Canada (figure 3.1), au nord du Lac-Saint-Jean. Sa superficie est de 27 000 km^2 et son altitude varie entre 50 et 1000 m. Il est subdivisé en quatre sous-bassins principaux : Passes-Dangereuses (11 000 km^2), Lac-Manouane (5 000 km^2), Chute-du-Diable (9 700 km^2) et Chute-à-la-Savane (1 300 km^2).

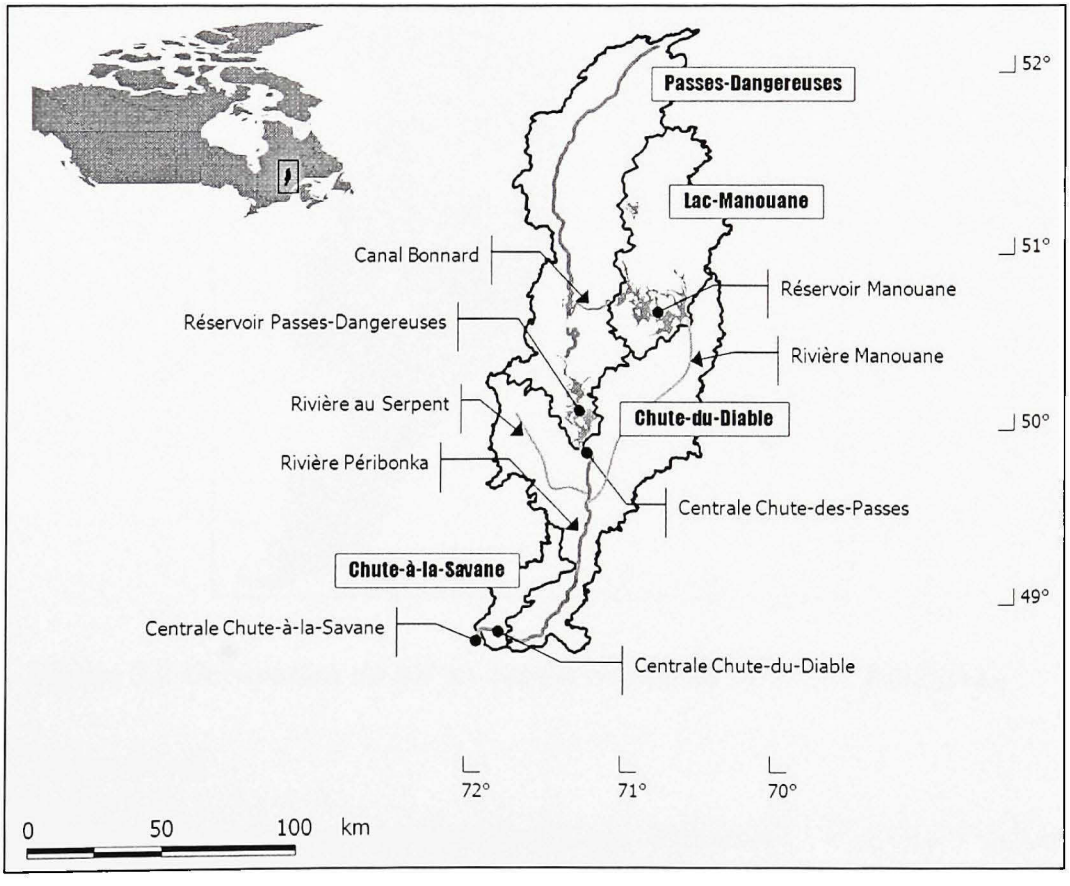


Figure 3.1 ***Sous-bassins, réservoirs et centrales hydroélectriques au bassin versant de la rivière Péribonka.***

3.1.1 Occupation et utilisation du sol

Le territoire du bassin versant de la rivière Péribonka est occupé majoritairement par des forêts (figure 3.2). Des forêts résineuses occupent le nord du 50^{e} parallèle alors que des forêts mixtes sont au sud. L'embouchure de la rivière Péribonka est en milieu rural et elle est encerclée de champs agricoles. L'utilisation du sol est néanmoins essentiellement pour les activités forestières.

Les données sur l'affectation du territoire sont tirées de la Base de données topographiques du Québec (BDTQ), de résolution 100 mètres (Ministère des Ressources naturelles et de la faune du Québec, 2006).

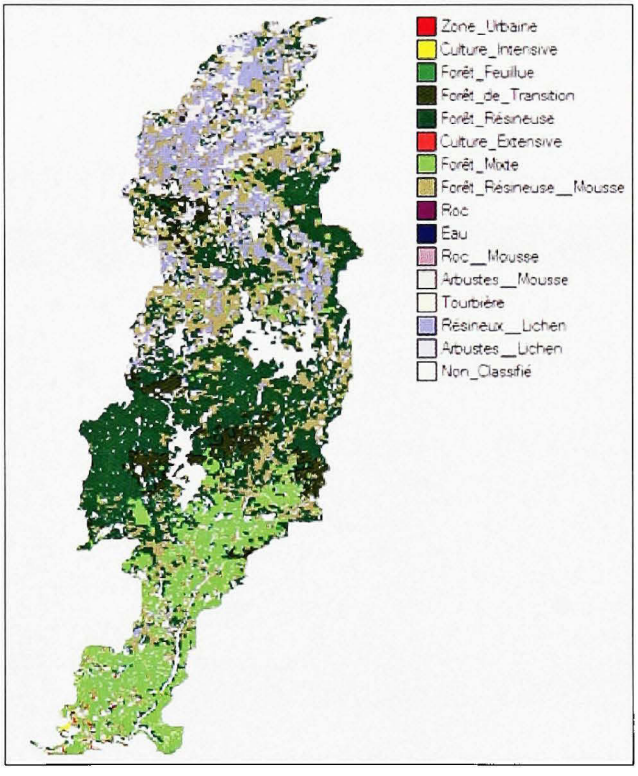


Figure 3.2 ***Occupation du sol au bassin versant de la rivière Péribonka.***

3.1.2 Types de sol

Les dépôts de surface sont majoritairement du till non différencié. Le sol est à affleurement rocheux dans le secteur du réservoir Manouane. La région près de l'exutoire est caractérisée par la présence de dépôts organiques.

Les types de sol sont identifiés à partir des cartes de dépôts de surface, à l'échelle 1 :50 000 (Ministère des Ressources naturelles et de la faune du Québec, 2003).

3.1.3 Données hydroclimatiques historiques

Les stations météorologiques pour lesquelles les données de précipitations et de températures minimales et maximales étaient disponibles sur et à proximité du bassin de la rivière Péribonka sont énumérées au tableau 3.1.

Le climat de la région est tempéré, avec une température moyenne annuelle de 0,5°C. Les précipitations moyennes annuelles sont de 1010 mm, dont 40 % tombent sous forme de neige selon l'historique de 1953-2003. La période de gel, où les températures moyennes journalières sont inférieures à 0°C, s'échelonne sur environ six mois entre novembre et avril.

Tableau 3.1

Stations météorologiques au bassin versant de la rivière Péribonka

Latitude	Longitude	Station météorologique	Historique	
50,73	71,03	Bonnard	1961-01-01	2002-12-31
49,84	71,17	Chute-des-Passes	1960-03-01	2002-12-31
48,75	71,70	Chute-du-Diable	1951-07-01	2002-12-31
49,06	72,59	Hémon	1963-11-01	2002-01-31
51,53	71,11	Lac Benoît	1985-11-15	2003-12-31
50,89	71,83	Machisque	1983-10-01	2002-12-31
50,66	70,53	Manouane Est	1989-10-15	2002-12-31
49,37	71,94	Mistassibi 2	1983-10-22	2002-12-31
48,84	72,55	Normandin CDA	1936-07-01	1992-08-31
48,76	72,02	Péribonka	1951-08-01	2002-11-30
48,67	71,53	St-Léon de Labrecque	1963-01-01	1997-07-01

Les données hydrométriques historiques utilisées sont les débits à la rivière au Serpent et les apports naturels à chaque sous-bassin de la rivière Péribonka. L'historique de la rivière au Serpent (bassin versant de 2220 km^2), un affluent de la rivière Péribonka sur le sous-bassin Chute-du-Diable, était disponible de 1979 à 1984.

Les apports naturels contrôlés ont été calculés et fournis par les gestionnaires du système hydrique de la rivière Péribonka (Rio Tinto Alcan) pour la période 1953 à 2003. Les débits

printaniers comptent pour 43 % du débit moyen annuel, alors que les apports hivernaux comptent pour 10 % et ceux de l'été-automne pour 47 %.

3.2 Système hydrique de la rivière Péribonka

Tel qu'illustré à la figure 3.3, le système hydrique de la rivière Péribonka est composé de réservoirs et de centrales hydroélectriques en série sur le cours de la rivière Péribonka. Les aménagements sont exploités et gérés par Rio Tinto Alcan.

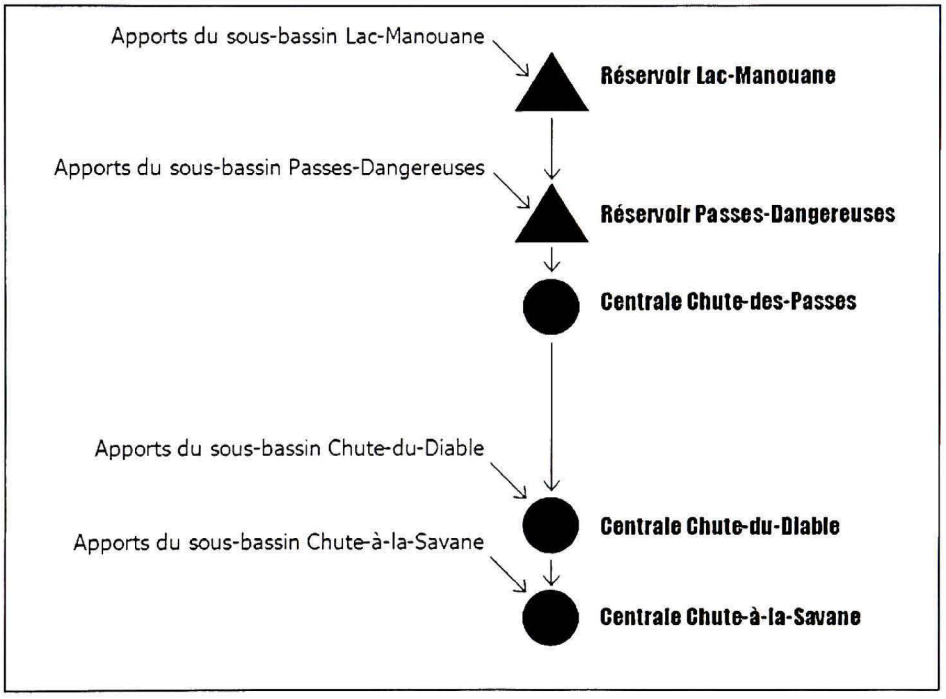


Figure 3.3 ***Schéma du système hydrique de la rivière Péribonka.***

Trois centrales hydroélectriques sont disposées en série sur la rivière Péribonka : Chute-des-Passes, Chute-du-Diable et Chute-à-la-Savane. La puissance installée est 1165 MW. Les centrales Chute-du-Diable (224 MW) et Chute-à-la-Savane (245 MW) sont gérées au fil de l'eau alors que Chute-des-Passes (833 MW) est à réservoir.

Deux réservoirs de tête alimentent ces centrales : Lac-Manouane (2700 hm^3) et Passes-Dangereuses (5200 hm^3). Le réservoir Lac-Manouane se situe en amont de la rivière Manouane. L'écoulement y est dérivé vers la rivière Péribonka par le canal Bonnard depuis la fin des années 1950. Les eaux déversées du réservoir Lac-Manouane alimentent le réservoir Passes-Dangereuses, situé en amont de la centrale Chute-des-Passes. L'eau chemine

ensuite vers les centrales au fil de l'eau Chute-du-Diable et Chute-à-la-Savane. Le temps de parcours entre les aménagements est inférieur à sept jours (Alcan métal primaire, 2004).

L'usage principal de la ressource en eau est pour la production hydroélectrique. Les réservoirs aménagés pour cet usage servent aussi aux activités récréatives, telles la navigation et la pêche.

3.2.1 Opérations du système hydrique

La gestion du système hydrique est étroitement liée au contexte hydrologique à trois saisons distinctes : hiver, printemps et été-automne. L'hiver s'étend de décembre à mars, le printemps d'avril à juin et l'été-automne de juillet à novembre. Le système hydrique est géré de manière à maximiser les niveaux d'eau dans les réservoirs tout en minimisant les dépassements du niveau normal d'exploitation.

L'année hydrologique débute l'hiver, alors que les températures moyennes journalières sont sous le point de congélation. Les précipitations neigeuses s'accumulent au sol et ne contribuent pas au ruissellement. Quelques événements pluvieux peuvent survenir et augmenter le débit de base. Les apports aux réservoirs sont minimums et les réservoirs sont maintenus à leur niveau normal d'exploitation, pour ensuite être abaissés graduellement pour contenir la crue printanière. Au printemps, les températures remontent au dessus du point de congélation et la neige au sol fond et ruisselle vers le réseau hydrographique. Les apports aux réservoirs au printemps constituent une grande part des débits moyens annuels.

L'été et l'automne, les fluctuations de débits sont occasionnées par des événements pluvieux. Les réservoirs sont alors gérés de manière à maximiser leur niveau d'eau tout en déversant lorsque des événements risquent de compromettre la sécurité des ouvrages.

3.2.2 Données de gestion historiques

Les données relatives aux opérations disponibles pour cette étude sont les débits turbinés et déversés, les niveaux d'eau des réservoirs et la production hydroélectrique journalière à chaque installation, de 1990 à 2005. Elles ont été fournies par la division Énergie électrique de Rio Tinto Alcan, les exploitants du système hydrique.

CHAPITRE 4

RÉSUMÉ DE LA RECHERCHE

Ce chapitre présente un résumé substantiel de la recherche. Dans un premier temps, les liens entre les articles composant cette thèse sont établis. Dans un deuxième temps, la méthodologie suivie pour compléter les travaux est présentée. Dans un troisième temps, les principaux résultats obtenus sont illustrés et commentés.

La méthodologie et les résultats sont séparés en catégories : projections climatiques, simulations hydrologiques et simulations du système hydrique. De plus, certains aspects des travaux, qui appuient la démarche mais qui n'ont pas été abordés dans les articles, sont incorporés en guise de complémentarité. Tout au long du résumé de la recherche, le lecteur est dirigé vers les articles en annexes pour davantage de précisions.

4.1 Liens entre les articles

Le développement de stratégies d'adaptation aux changements climatiques devra être complémentaire aux mesures d'atténuation des GES selon les principes d'équité et de développement durable (*Voir* Minville (2007) à l'annexe 1).

La ressource en eau figure parmi l'un des secteurs les plus potentiellement touchés par les changements climatiques et qui nécessitera le déploiement de mesures d'adaptation. À ce sujet, le GIEC signale que les pratiques de gestion actuelles seront manifestement inadéquates pour réduire les effets négatifs des changements climatiques sur l'approvisionnement en eau, les risques d'inondations et l'énergie (Kundzewicz *et al.*, 2007).

Minville *et al.* (2008c), à l'annexe 4, appuie cette position en démontrant que la performance du système hydrique de la rivière Péribonka diminue en contexte de changements climatiques si les règles de gestion des réservoirs ne sont pas adaptées aux régimes hydrologiques potentiels futurs. Ces changements dans les régimes hydrologiques sont au niveau des débits moyens annuels et saisonniers et dans leur variabilité (*Voir* Minville *et al.* (2008a) à l'annexe 2). En revanche, la simulation des opérations avec des règles de gestion adaptées à des

régimes hydrologiques potentiels futurs réduit les impacts et peut même améliorer la performance. Les simulations des opérations des réservoirs avec des apports hydrologiques découlant de deux approches de modélisation (approche globale, *voir* Minville *et al.* (2008d) de l'annexe 5 et approche distribuée, *voir* Minville *et al.* (2008e) de l'annexe 6) permettent de tirer cette conclusion.

L'incertitude des projections climatiques et de la modélisation hydrologique est considérée avec les approches de modélisation multiscénario et multimodèle. Les régimes hydrologiques futurs sont incertains, en raison de différences significatives dans leur tendance, moyenne et variance (*Voir* Minville *et al.* (2008b) à l'annexe 3).

4.2 Méthodologie

La présentation de la méthodologie est subdivisée en quatre sections : vue d'ensemble, projections climatiques, simulations hydrologiques et simulations du système hydrique. Il s'agit d'un résumé des principales étapes de la démarche suivie pour compléter les travaux. Pour plus de détails, le lecteur est dirigé vers les publications en annexe.

4.2.1 Vue d'ensemble

L'idée générale est d'évaluer le potentiel d'adaptation de la gestion du système hydrique de la rivière Péribonka selon deux combinaisons d'approches de modélisation hydrologique et de fabrication de projections climatiques : HSAMI-Deltas et Hydrotel-MRCC. Ces approches se distinguent par le degré de complexité des outils utilisés.

Pour parvenir à cette fin, une séquence d'opérations doit être réalisée : fabrication de projections climatiques, simulations des impacts hydrologiques, simulations du système hydrique et adaptation de la gestion du système hydrique.

D'abord, des projections climatiques sont produites selon deux approches (Deltas et MRCC). Ces projections sont introduites dans des modèles hydrologiques (HSAMI et Hydrotel respectivement) afin de déterminer les impacts hydrologiques. Les apports hydrologiques sont engagés dans un modèle de simulation du système hydrique (ResSim), avec les règles de gestion actuelles, pour évaluer la performance du système hydrique en contexte de

changements climatiques. Enfin, les régimes hydrologiques sont utilisés avec un modèle de simulation du système hydrique (SimÉTS) et des règles de gestion adaptées aux changements climatiques. Ces règles sont générées avec un modèle d'optimisation (OptPoly).

Par la suite, une analyse des régimes hydrologiques est effectuée afin d'évaluer l'incertitude des modèles hydrologiques et des projections climatiques. Les simulations hydrologiques découlant de combinaisons de deux modèles hydrologiques et deux projections climatiques (HSAMI-MRCC, HSAMI-Deltas, Hydrotel-MRCC et Hydrotel-Deltas) sont comparées.

La figure 4.1 offre une vue macroscopique de la méthodologie.

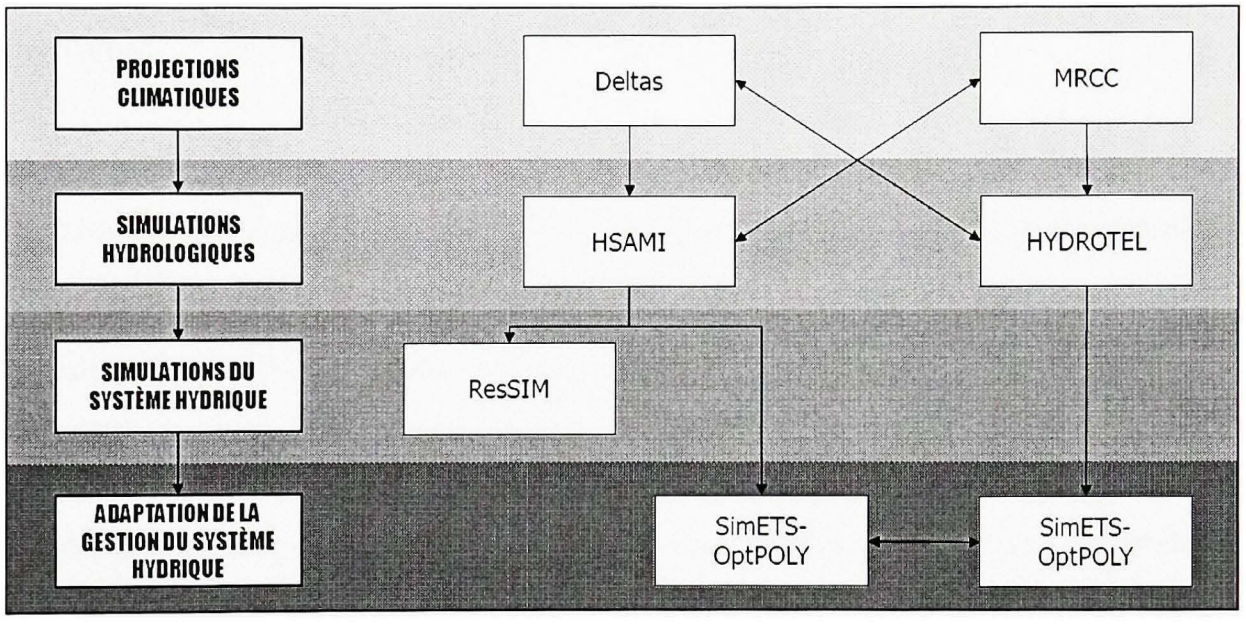


Figure 4.1 ***Vue macroscopique des travaux de recherche.***

4.2.2 Limites temporelles de l'étude

La période de changements climatiques étudiée s'étend de 2010 à 2099. Cette période est fractionnée en trois horizons de 30 ans : 2020 (2010 à 2039), 2050 (2040 à 2069) et 2080 (2070 à 2099).

Les différentes variables en contexte de changements climatiques sont comparées à celles de la période de contrôle (1961-1990). Cette période, aussi appelée période de référence, constitue une base pour comparer les résultats en contexte de changements climatiques.

4.2.3 Projections climatiques

Les projections climatiques sont les données de températures et de précipitations journalières. Elles proviennent de variables à grande échelle des modèles de circulation générale (MCG), qui ont été réduites d'échelle pour être applicables à l'échelle d'un bassin versant.

Dans le cadre des travaux de recherche, les projections climatiques sont produites selon deux approches : les deltas et la réduction d'échelle dynamique. La première méthode suppose que le climat est stationnaire sur chaque horizon de 30 ans, alors que le climat évolue en régime transitoire sur la période étudiée avec la seconde.

Cette sous-section décrit les deux approches utilisées pour la fabrication des projections climatiques.

4.2.3.1 Approche des deltas

Les informations propres aux projections climatiques de la méthode des deltas sont détaillées dans Minville *et al.* (2008a) à l'annexe 2.

En résumé, la méthode des deltas consiste à appliquer la différence, pour les températures, ou le quotient, pour les précipitations, entre les données simulées par un MCG à la période de référence et à chaque horizon climatique. Cette différence, appelée delta, est appliquée aux données journalières historiques de la période de contrôle pour former une projection climatique. Il s'agit d'une manière de perturber les moyennes mensuelles, sans toutefois modifier la variance, afin de préparer les scénarios futurs journaliers utilisables en modélisation hydrologique. L'application de la méthode est simple et permet d'obtenir une large gamme de projections climatiques rapidement. Une alternative à la méthode, qui permet de tenir compte de la variance, consiste à perturber le delta en fonction de la variance intra-mensuelle des MCG (Shabalova *et al.*, 2003). Toutefois, la variance à ce pas de temps n'était pas disponible lors de la préparation des projections.

Les projections climatiques disponibles proviennent de cinq MCG pour trois scénarios d'émissions de GES différents. Les combinaisons sont présentées au tableau 4.1. Les

numéros réfèrent aux identifiants des projections climatiques réutilisés dans les figures et tableaux.

Tableau 4.1

Projections climatiques de la méthode des deltas

MCG	GES		
	A2	B1	B2
HadCM3	1		2
ECHAM4	3		4
CSIRO	5		6
CCSRNIES	7		8
CGCM3	9	10	

Ces MCG ont été choisi selon les critères établis par l'IPCC Data distribution center (2005) :

- Être un modèle couplé atmosphère-océan
- Avoir été documenté dans la littérature
- Avoir été initialisé par une simulation de contrôle sur plusieurs siècles
- Avoir participé au second projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP2)

Les MCG HadCM3, ECHAM4, CSIRO, CCSRNIES, CGCM3, GFDL et NCAR-PCM répondaient à ces critères. Ces derniers sont décrits et comparés dans Lambert et Boer (2001). GFDL a été disqualifié puisque les températures moyennes seulement étaient disponibles, et les modèles hydrologiques requièrent les températures minimales et maximales. NCAR-PCM a aussi été éliminé car la Baie d'Hudson n'y est pas représentée et cela induit un biais sur les températures en raison de l'effet régulateur de ce plan d'eau. Pour ce qui a trait aux scénarios de GES, ils sont choisis en fonction de la disponibilité des données.

L'étape qui a suivi la fabrication des projections climatiques par la méthode des deltas a consisté à générer des séries climatiques synthétiques représentatives de chacune des projections climatiques avec le générateur stochastique de climat WeaGETS (Caron, 2005), basé sur l'approche de Richardson (1981). Cet outil permet de décrire les données climatiques en distribution de probabilités et de les employer afin de produire une série chronologique synthétique de températures et précipitations d'une durée quelconque. La série

comporte les mêmes propriétés statistiques que la série originale. En tout, 30 séries synthétiques de 30 ans chacune ont été générées, pour chaque projection climatique et horizon, ainsi que pour la période de référence.

L'intérêt des données synthétiques est de simuler les régimes hydrologiques sous plusieurs séries climatiques représentatives d'une projection climatique. La variabilité naturelle du climat est alors considérée en partie.

4.2.3.2 Réduction d'échelle dynamique

Les informations propres aux projections climatiques de la réduction d'échelle dynamique sont détaillées dans Minville *et al.* (2008e) à l'annexe 6.

La réduction d'échelle dynamique est effectuée par des modèles régionaux de climat (MRC). Les MRC sont des simulateurs informatiques qui reproduisent les principales caractéristiques du système climatique avec des équations de la physique et de la thermodynamique.

Les projections climatiques proviennent du Modèle régional canadien de climat (MRCC) (Caya et Laprise, 1999; Plummer *et al.*, 2006). Les conditions aux frontières sont prescrites par le modèle de circulation générale CGCM3 A2. Le choix du pilote repose sur la disponibilité des données. Les données climatiques sont disponibles au pas de temps journalier pour la période 1961 à 2099, sur une grille d'environ 45 kilomètres de résolution, pour un total de 30 points de grille sur et à proximité du bassin versant de la rivière Péribonka (*Voir* figure 4.2 (a)).

Les données climatiques brutes du MRCC n'ont pas été utilisées directement dans le cadre des travaux, car elles présentaient un biais par rapport aux observations de la période de référence 1961-1990. Les observations qui ont permis cette comparaison sont des données climatiques interpolées par krigeage à partir de stations météorologiques (Tapsoba *et al.*, 2005). Elles étaient disponibles sur une grille de 10 km de résolution (*Voir* figure 4.2 (b)).

La correction du biais a pour conséquence de détruire les bilans de masse, d'énergie et de momentum, qui sont au cœur de l'avantage de l'outil de réduction d'échelle dynamique. La correction du biais aurait pu être évitée en supposant que le biais aux horizons de

changements climatiques est le même que celui à la période de référence. Les analyses peuvent généralement être réalisées avec des comparaisons de changements (relatifs au détriment d'absolus) pour les impacts hydrologiques des changements climatiques. Cette méthodologie aurait été privilégiée si les impacts hydrologiques des changements climatiques seulement avaient été évalués. Toutefois, l'étape supplémentaire concernant les études sur la gestion du système hydrique a justifié la correction du biais. Il aurait été plus difficile de justifier les impacts sur la fiabilité et la vulnérabilité des réservoirs en terme relatifs car l'introduction d'un biais aurait pu induire de fausse tendance. Par exemple, un doublement du ruissellement en été (tel que remarqué en ne corrigeant pas le biais) aurait pu conduire à des baisses de fiabilité importantes autant à la période de référence et aux horizons de changements climatiques, alors qu'elle est près de 100 % si le biais est ajusté. La même remarque s'applique pour les déversements non-productibles.

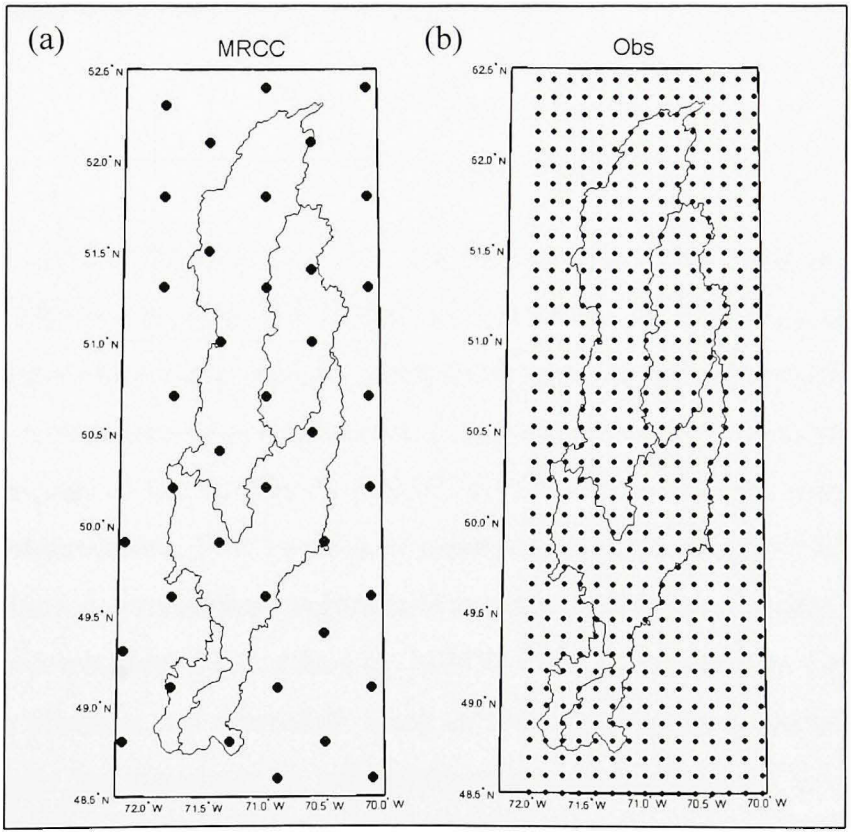


Figure 4.2 ***Grilles des données climatiques (a) du modèle régional canadien de climat (MRCC) et (b) des observations (obs) interpolées par krigeage.***

Les données de températures et de précipitations du MRCC ont été corrigées sur la période 1961-2099, de façon à en retirer le biais entre le MRCC et les observations à la période 1961-1990. La méthode suppose que le biais du MRCC dans le futur est le même qu'à la période de contrôle.

La correction des biais a été effectuée pour les températures mensuelles minimales et maximales (*Biais_T*) du MRCC (équation 4.1). Pour la période de référence, les températures mensuelles à chaque tuile du MRCC (T_{MRCC}), et la moyenne des observations correspondant à cette tuile (T_{Obs}), ont été calculées. La différence entre la moyenne des températures observées et la moyenne des températures simulées pour la période de contrôle 1961-1990 a été appliquée aux données du MRCC 1961-2099 (équation 4.2). Cette technique fait en sorte que les données climatiques journalières simulées par le MRCC à la période de contrôle, corrigées du biais à chaque tuile ($T_{MRCC\ ajustée}$), ont les mêmes moyennes mensuelles que les données climatiques moyennes observées sur cette tuile.

$$Biais_T = T_{MRCC} - T_{Obs} \tag{4.1}$$

$$T_{MRCC\ ajustée} = T_{MRCC} + Biais_T \tag{4.2}$$

Les données de précipitations (P_{MRCC}) ont été corrigées du biais selon la méthode LOCI (équation 4.3) adaptée de Schmidli (2006). Chaque tuile du MRCC a été couplée à la moyenne des observations correspondant à cette tuile afin d'ajuster localement les fréquences et les intensités mensuelles de précipitations. La méthode nécessite dans un premier temps d'égaliser les fréquences mensuelles du MRCC (fraction mensuelle des jours pluvieux) aux fréquences des observations. Pour ce faire, le nombre moyen de jours pluvieux observé dans un mois (précipitations journalières supérieures au seuil *PoWDT* de 1 millimètre) est calculé et le seuil des précipitations journalières du MRCC *PsWDT*, qui permet d'obtenir le même nombre de jours pluvieux, est déterminé. Dans un deuxième temps, un facteur mensuel *s* est calculé pour égaler les moyennes de précipitations mensuelles du MRCC de la période de contrôle 1961-1990 à la moyenne des précipitations mensuelles des observations. Dans un troisième temps, les seuils (*PsWDT*) et facteurs (*s*) mensuels qui ont permis d'ajuster les précipitations de la période de contrôle sont réutilisés pour ajuster les précipitations de la période 1990-2099.

$$P_{MRCC\ ajustée} = \begin{cases} si\ P_{MRCC} \geq PoWDT \\ PoWDT + s\ (P_{MRCC} - PsWDT) \\ autre \\ 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

Cette méthode fait en sorte que les précipitations mensuelles corrigées du MRCC à la période de contrôle ont les mêmes intensités et fréquences moyennes mensuelles que les observations. La méthode suppose que le biais du MRCC dans le futur est le même qu'à la période de contrôle.

4.2.4 Simulations hydrologiques

La simulation des régimes hydrologiques a été réalisée avec les modèles hydrologiques HSAMI et Hydrotel. Il s'agit de modèles utilisés pour la prévision des débits à Hydro-Québec et au Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) respectivement. Le recours à ces modèles hydrologiques est donc justifié par le fait qu'ils constituent les principaux outils pour la prévision des apports aux réservoirs dans la province du Québec. Ils ont fait leurs preuves pour les simulations hydrologiques en région nordique.

4.2.4.1 Modélisation hydrologique globale

Le modèle hydrologique HSAMI est utilisé de manière opérationnelle par Hydro-Québec depuis une vingtaine d'années. Il permet de simuler les apports naturels d'un bassin versant géré ou les débits à l'exutoire d'un bassin où les écoulements sont naturels, selon les observations ou prévisions de variables météorologiques tels les températures minimales et maximales, les précipitations et l'ensoleillement. Il s'agit d'un modèle conceptuel global constitué de trois réservoirs linéaires en cascades qui génèrent le ruissellement à partir de deux hydrogrammes unitaires. Les processus simulés sont l'évapotranspiration, l'interception de la pluie et de la neige, l'infiltration ainsi que les écoulements verticaux et horizontaux (Bisson et Roberge, 1983; Fortin, 2000). Il est conçu pour fonctionner à un pas de temps d'une heure à une journée.

Les résultats de l'étalonnage et de la validation du modèle hydrologique HSAMI pour les quatre sous-bassins sont présentés au tableau 4.2. Une valeur négative représente une sous-

estimation du modèle par rapport aux données observées. Les écarts pour le débit et de temps de pointe, ainsi que pour le volume annuel, sont pour la période d'étalonnage et validation.

Tableau 4.2

Critères d'étalonnage et de validation du modèle hydrologique HSAMI

Sous-bassin	Nash-Sutcliffe		Débit de pointe de crue (%)	Temps de pointe de crue (jour)	Volume annuel (%)
	Calibration	Validation			
Chute-à-la-Savane	0,78	0,68	- 3	0	- 12
Chute-du-Diable	0,92	0,89	- 2	- 3	+ 8
Lac-Manouane	0,68	0,51	- 11	+ 4	- 10
Passes-Dangereuses	0,81	0,77	- 5	+ 1	- 3

L'étalonnage est effectué pour chaque sous-bassin du bassin versant de la rivière Péribonka avec une série météorologique moyenne fabriquée avec les données historiques 1984-2003 des stations météorologiques environnantes. Ces séries ont été moyennées selon la méthode des polygones de Thiessen pour chacun des sous-bassins.

4.2.4.2 Modélisation hydrologique distribuée

Le modèle Hydrotel (Fortin *et al.*, 2001a) est développé par l'Institut national de recherche scientifique secteur Eau terre et environnement. Il est implanté de manière opérationnelle par le Centre d'expertise hydrique du Québec pour la prévision des apports hydrologiques de certains ouvrages hydrauliques du domaine de l'état.

Hydrotel est un modèle distribué à base physique qui opère selon six sous-modèles : l'interpolation des données météorologiques, l'évolution du couvert nival, l'évapotranspiration potentielle, le bilan d'eau vertical, l'écoulement sur la partie terrestre du bassin et l'écoulement dans le réseau hydrographique. Différentes options sont offertes à l'utilisateur pour la simulation des processus hydrologiques. Dans le cadre des travaux présentés, les données météorologiques ont été importées sous forme d'une grille préalablement interpolée par krigeage (Tapsoba *et al.*, 2005). Les autres processus hydrologiques ont été simulés avec les options des sous-modèles au tableau 4.3.

Tableau 4.3

Sous-modèles pour la simulation des processus hydrologiques dans Hydrotel

Sous-modèles	Options
Interpolation des données climatiques	Importation d'une grille externe
Évolution du couvert nival	Approche mixte degré-jours et bilan thermique
Évapotranspiration	Hydro-Québec
Bilan d'eau vertical	BV3C
Écoulement sur la partie terrestre	Onde cinématique
Écoulement dans le réseau hydrographique	Onde cinématique

La performance d'étalonnage et de validation du modèle hydrologique Hydrotel pour les quatre sous-bassins est montrée au tableau 4.4. Les écarts pour le débit et de temps de pointe, ainsi que pour le volume annuel, sont présentés pour la période d'étalonnage et validation. Une valeur négative représente une sous-estimation du modèle par rapport aux observations.

Tableau 4.4

Critères d'étalonnage et de validation du modèle hydrologique Hydrotel

Sous-bassin	Nash-Sutcliffe		Débit de pointe de crue (%)	Temps de pointe de crue (jour)	Volume annuel (%)
	Calibration	Validation			
Chute-à-la-Savane	0,70	0,66	- 11	0	- 2
Chute-du-Diable	0,85	0,78	- 18	+ 5	0
Lac-Manouane	0,54	0,47	- 10	+ 2	- 14
Passes-Dangereuses	0,76	0,69	- 8	0	- 5

4.2.4.3 Modélisation hydrologique en contexte de changements climatiques

Les simulations des débits pour les études d'adaptation de la gestion ont été complétées en introduisant, d'une part, les projections climatiques de l'approche des deltas dans le modèle hydrologique HSAMI (HSAMI-Deltas), et d'autre part, en incorporant la projection

climatique issue de la réduction d'échelle dynamique dans le modèle hydrologique Hydrotel (Hydrotel-MRCC).

En plus des simulations spécifiquement réalisées pour le volet adaptation de la gestion de la ressource en eau de la thèse, d'autres modélisations ont été réalisées afin d'investiguer l'incertitude des modèles hydrologiques et des projections climatiques dans les études d'impacts. Pour ce faire, les projections climatiques de l'approche des deltas et de la réduction d'échelle dynamique ont été introduites dans les modèles hydrologiques HSAMI et Hydrotel, pour un total de quatre combinaisons : HSAMI-Deltas, HSAMI-MRCC, Hydrotel-Deltas et Hydrotel-MRCC. Les projections climatiques de chaque approche étaient basées sur le modèle de circulation générale CGCM3, forcé avec le scénario de GES A2. L'utilisation d'un même MCG et scénario de GES pour les deux approches permet de tenir compte de l'incertitude de la réduction d'échelle.

Les débits des combinaisons de modèles hydrologiques et de projections climatiques ont été comparés afin de mesurer l'incertitude de la projection et du modèle à l'échelle saisonnière.

4.2.5 Simulations des opérations du système hydrique

Le ruissellement au bassin versant de la rivière Péribonka est contrôlé par des barrages et ouvrages de régularisation des débits. Les apports hydrologiques naturels simulés avec les modèles hydrologiques sont retenus dans les réservoirs. Le cheminement de l'eau vers l'aval du système hydrique s'effectue avec un modèle de simulation des opérations. Les règles de gestion, incorporées au modèle de simulation, dictent les apports contrôlés à soutirer des réservoirs. Les débits soutirés sont turbinés par les centrales hydroélectriques, ou déversés lorsque le soutirage suggéré par la règle excède la capacité hydraulique des centrales.

Les simulations du système hydrique ont d'abord été effectuées avec le modèle HEC-ResSim. Le but était d'analyser la gestion des réservoirs de la rivière Péribonka, soumis à des scénarios hydrologiques futurs, en conservant les règles de gestion actuelles. La gestion simulée a aussi été comparée à la gestion observée.

Par la suite, le comportement du système hydrique a été étudié en utilisant de nouvelles règles de gestion optimisées avec les apports en eau en contexte de changements climatiques.

Un modèle de simulation développé spécifiquement pour les travaux a été utilisé avec des règles de gestion adaptées. Le modèle ResSim n'a pas été utilisé en raison de l'impossibilité de lui arrimer dans sa structure le format des règles de gestion optimisées.

4.2.5.1 Impacts des changements climatiques sur la gestion

Les informations propres à la gestion du système hydrique avec les règles de gestion actuelles sont présentées dans Minville *et al.* (2008c) à l'annexe 4.

La modélisation du système hydrique a été dans un premier temps réalisée avec le modèle de simulation ResSim du US Army Corps of Engineers (2003). Il s'agit de la dernière génération du logiciel HEC-5 largement utilisé pour la gestion des systèmes hydriques de domaine public aux États-Unis. Les étapes de simulation du système hydrique comprennent l'étalonnage du modèle avec les apports observés et l'évaluation des impacts des changements climatiques sur la gestion avec les règles d'opération actuelles.

ResSim est un modèle de simulation des réservoirs qui permet de simuler les débits turbinés et déversés ainsi que la production hydroélectrique selon des règles d'opération, des contraintes et des objectifs spécifiques. C'est un logiciel modulaire qui offre à l'utilisateur de combiner différentes configurations de systèmes hydriques, géométries de réservoirs, contraintes, conditions initiales et scénarios d'apports hydrologiques.

Les principales données d'entrée sont les apports naturels aux réservoirs, les propriétés physiques des cours d'eau et réservoirs, la capacité d'évacuation des ouvrages ainsi que les caractéristiques des centrales hydroélectriques, notamment la capacité installée, leur efficacité ainsi que les courbes de tarage.

Le modèle de simulation du système hydrique est validé avec les apports naturels observés aux quatre sous-bassins durant la période 1990-2003 et selon les contraintes de niveaux, les objectifs de production hydroélectrique, les volumes cibles à maintenir dans les réservoirs ainsi que selon le temps de laminage moyen entre les réservoirs.

4.2.5.2 Impacts et adaptation de la gestion aux changements climatiques

Les informations propres à la gestion du système hydrique avec les règles de gestion adaptées sont présentées dans Minville *et al.* (2008d) et Minville *et al.* (2008e) en annexe 5 et 6.

La modélisation du système hydrique a été dans un deuxième temps réalisée avec des règles de gestion adaptées. Le potentiel d'adaptation aux changements climatiques de la gestion du système hydrique de la rivière Péribonka a été évalué pour les scénarios d'apports hydrologiques des approches HSAMI-Deltas et Hydrotel-MRCC. L'outil utilisé pour la génération des règles de gestion est le même pour les deux approches. Néanmoins, il subsiste des différences méthodologiques dans son application.

Généralités sur la production des règles de gestion

Les règles de gestion des réservoirs ont été produites avec un modèle d'optimisation dynamique et stochastique (Turgeon, 2005). L'intérêt des modèles d'optimisation dynamique réside dans le fait qu'ils permettent de décomposer un problème non-linéaire à plusieurs variables, comme la gestion de réservoirs multiples, en sous-problèmes résolus à chaque pas de temps (Yeh, 1985). La composante stochastique du modèle d'optimisation permet de considérer l'incertitude des apports à venir pour l'établissement de la règle optimale, ce qui est un avantage indéniable pour une étude en contexte de changements climatiques.

Concrètement, la règle de gestion dicte la quantité d'eau à soutirer de chaque réservoir de tête. Elle est fonction de la semaine considérée, de l'état du système (volumes d'eau dans les réservoirs) et des apports hebdomadaires à chaque sous-bassin. Il suggère la meilleure opération en fonction de l'état actuel et des gains potentiels aux pas de temps subséquents. Un avantage d'une règle dynamique en contexte de changements climatiques est qu'elle est adaptative.

Le modèle d'optimisation nécessite en entrée une série d'apports hydrologiques et un fichier décrivant le système hydrique. Ce dernier inclut les caractéristiques des groupes turbine-alternateur, les courbes de production, la capacité hydraulique des ouvrages de régularisation, les contraintes d'opération, les pénalités des violations de contraintes et les caractéristiques

des réservoirs. La fonction bénéfice est la production moins les coûts de violations des contraintes d'exploitation.

Les opérations des réservoirs ont été simulées à un pas de temps hebdomadaire avec le modèle programmé dans l'environnement Matlab pour les besoins de l'étude. Les caractéristiques des ouvrages et des centrales y sont incorporées. Il fait appel aux règles d'opération générées par le modèle d'optimisation pour simuler les opérations du système hydrique soumis à des séries d'apports hydrologiques hebdomadaires. Le modèle de simulation distribue l'eau du système hydrique selon les principes de conservation du bilan hydrique.

Les simulations des opérations en contexte de changements climatiques n'ont pas été comparées avec les opérations observées. Elles ont plutôt été comparées aux opérations simulées avec les conditions climatiques de la période de contrôle. Cela permet entre autres de réduire le biais du modèle hydrologique. Toutefois, il est important de mentionner que le modèle reproduisait la gestion observée sur la période 1990-2005 (période de disponibilité des observations) pour le critère de production hydroélectrique moyenne annuelle, avec une surestimation de 1 %.

Pour les simulations des opérations du système hydrique, aucune demande énergétique n'a été spécifiée, ni à la période de contrôle, ni pour les simulations futures.

Spécificités de l'approche HSAMI-Deltas

Les règles de gestion avec l'approche HSAMI-Deltas ont été produites pour chaque projection climatique à chaque horizon. Un ensemble de règles hebdomadaires a été généré pour chacun des 30 scénarios d'apports hydrologiques futurs et pour le scénario d'apports représentatif de la période de contrôle, pour un total de 31 ensembles de règles de gestion hebdomadaires.

À chaque horizon, les régimes hydrologiques sont considérés stationnaires. Les 900 années d'apports hydrologiques composant chaque projection climatique sont donc utilisées pour la génération de chaque ensemble de gestion. Néanmoins, les règles de gestion sont en pratique actualisées chaque année. Cette approche n'a pas été exploitée pleinement avec la méthode

HSAMI-Deltas car il était considéré que cet effort de calcul ne serait nécessaire qu'avec des régimes climatiques transitoires.

La méthodologie est détaillée dans Minville *et al.* (2008d) à l'annexe 5.

Spécificités de l'approche Hydrotel-MRCC

À l'instar de l'approche HSAMI-Deltas, les règles de gestion des réservoirs avec l'approche Hydrotel-MRCC ont été actualisées annuellement pour la période 1990-2099, pour un total de 110 ensembles de règles de gestion hebdomadaires. Cette stratégie a été privilégiée pour exploiter le plein potentiel des données climatiques du MRCC en régime transitoire.

L'actualisation de la règle de gestion chaque année reflète la réalité. En pratique, les règles de gestion sont rafraîchies au début de l'année en ajoutant les apports observés de l'année précédente. L'historique en entier est utilisé lorsque les données sont stationnaires.

Or, en contexte de changements climatiques, les tendances dans les débits moyens annuels de 1990-2099 montrent qu'ils respectent l'hypothèse de stationnarité sur des plages mobiles de 35 ans (test de Mann-Kendall). Les règles de gestion ont donc été produites chaque année en n'utilisant que les 35 dernières années de l'historique des débits, et non l'historique en entier.

La méthodologie est détaillée dans Minville *et al.* (2008e) à l'annexe 6.

4.3 Résultats

La présentation des résultats est subdivisée en trois sections : les projections climatiques, les simulations hydrologiques et les simulations du système hydrique. Il s'agit d'un résumé des principaux résultats des articles. Pour plus de détails, le lecteur est dirigé vers les publications en annexe.

4.3.1 Projections de changements climatiques

Les projections climatiques issues de la méthode des changements des deltas et de la réduction d'échelle dynamique sont maintenant exposées.

4.3.1.1 Méthode des deltas

Les statistiques des projections climatiques réalisées avec la méthode des deltas sont détaillées dans Minville *et al.* (2008a) à l'annexe 2.

Les écarts annuels et saisonniers des variables climatiques de températures et précipitations des MCG, entre les horizons de changements climatiques et la période de contrôle, sont présentés à la figure 4.3. Las figures A.1 à A.3 de l'appendice A montre les deltas mensuels. Il s'agit des deltas qui ont été appliqués aux données journalières historiques.

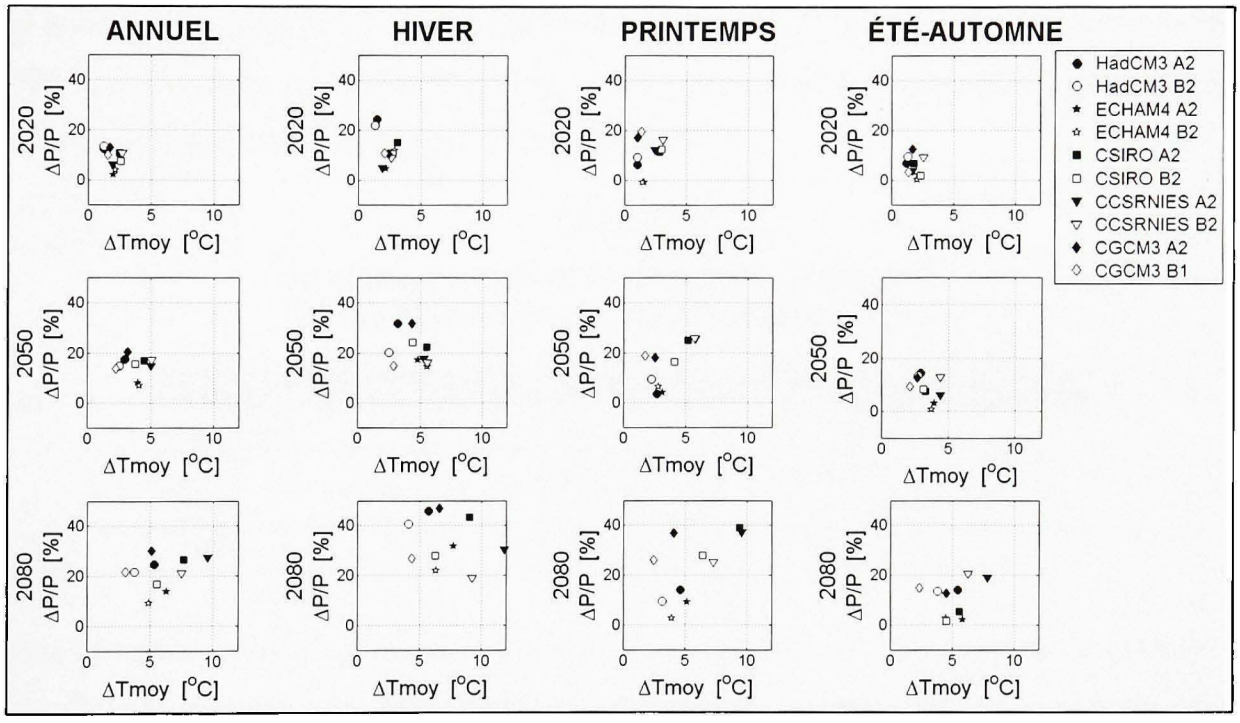


Figure 4.3 ***Deltas annuels et saisonniers pour les horizons 2020, 2050 et 2080.***

La tendance annuelle au bassin versant de la rivière Péribonka est univoque : toutes les projections proposent des augmentations de températures et de précipitations. L'amplitude des changements s'accentue avec le temps, avec des augmentations des températures moyennes annuelles de l'ordre du 2 à 10 °C et des précipitations de 2 à 28 %. les différences intermodèle est aussi plus grande avec le temps : les changements de température en fonction des changements des précipitations sont de plus en plus dispersés à chaque horizon.

À l'échelle saisonnière, la majorité des projections climatiques montrent des augmentations saisonnières des précipitations, à l'exception d'ECHAM4 au printemps qui projette des diminutions de moins de 1 %. Pour la majorité des projections futures, les plus fortes augmentations de température surviendraient l'hiver. À l'horizon 2080, les températures hivernales pourraient augmenter jusqu'à 12 °C sous CCSRNIES A2 et les précipitations jusqu'à 47 % sous CGCM3 A2.

Le tableau 4.5 montre les dates moyennes de passage de la température sous et au-dessus du point de congélation, tirées des cycles annuels des températures. La durée de la période de gel pourrait passer de six mois pour la période de contrôle à environ trois mois à l'horizon 2080. Les cycles annuels de températures, pour chacune des projections climatiques à chaque horizon, sont présentés à la figure A.4 de l'appendice A.

Tableau 4.5

Dates moyennes de passage du point de congélation
Exemple pour le sous-bassin Chute-du-Diable

Période	Dates	
Contrôle	21 octobre	15 avril
2020	7 novembre	7 avril
2050	21 novembre	21 mars
2080	15 décembre	7 mars

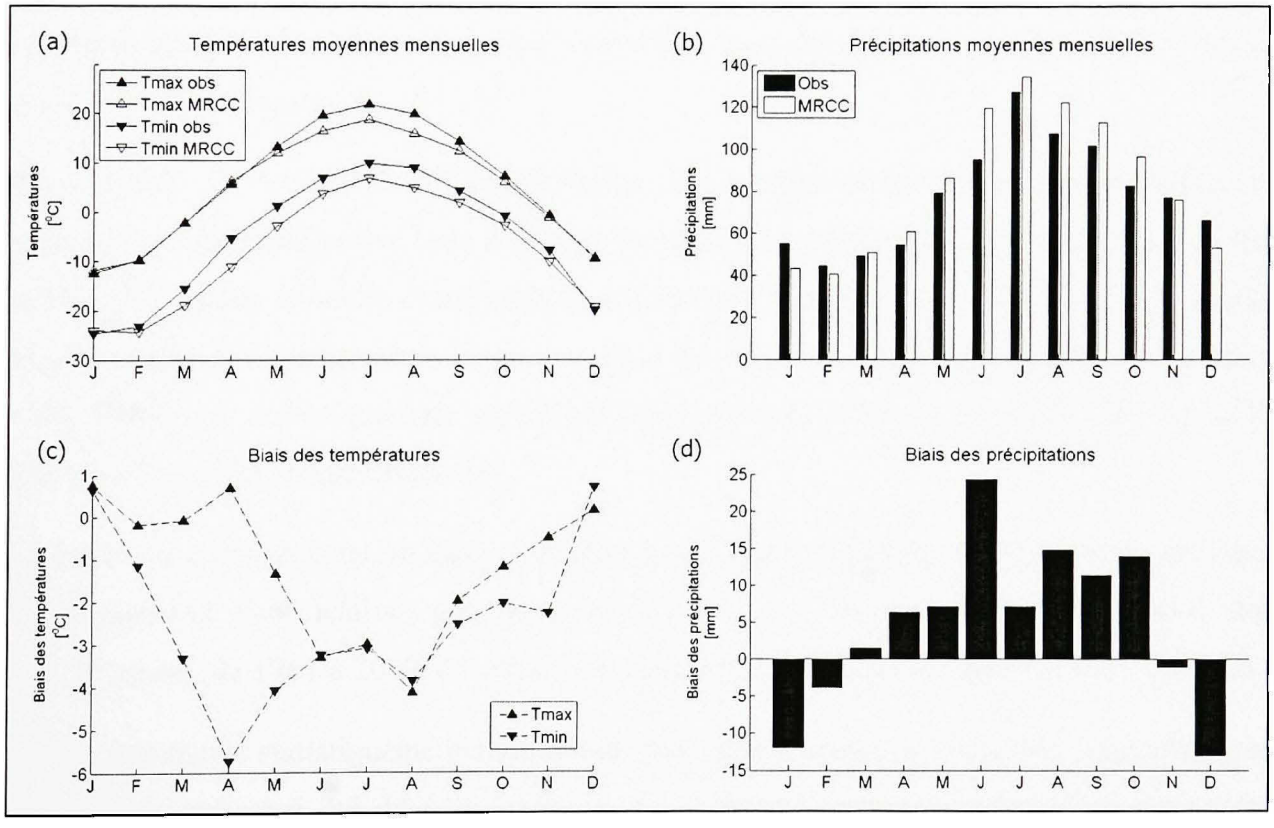
Dans le même ordre d'idées, la figure A.5 de l'appendice A expose, pour la période de contrôle par rapport aux projections de changements climatiques, la répartition de la précipitation pluvieuse par rapport à la précipitation neigeuse en hiver. Elle montre que les précipitations hivernales tendent à augmenter entre 2020 à 2080 avec toutes les projections. En 2020 et 2050, les quantités de précipitations sous forme de neige ne seraient pas inférieures aux quantités de la période de contrôle. L'excédent tomberait sous forme de pluie. En 2080, les quantités de précipitations neigeuses diminueraient de près du quart par rapport à la période de contrôle. Les précipitations hivernales sous forme de pluie pourraient augmenter de plus d'un facteur de 10 par rapport à la période de contrôle.

4.3.1.2 Réduction d'échelle dynamique

Les biais mensuels entre les données climatiques du MRCC et les observations à la période de contrôle 1961-1990 ont d'abord été calculés. Ensuite, les données du MRCC sur la période entière 1961-2099 ont été corrigées de manière à réduire le biais.

Biais entre les données du MRCC et les observations (1961-1990)

Une analyse des moyennes mensuelles des précipitations et des températures de la période de contrôle 1961-1990 du MRCC (piloté avec CGCM3 A2) par rapport aux observations démontrait qu'elles présentaient des différences. Les biais et moyennes mensuelles sont illustrés à la figure 4.4.



(a) Températures mensuelles minimales et maximales des données observées (obs) et du MRCC. (b) Précipitations moyennes mensuelles des données observées (obs) et du MRCC. (c) Biais des températures et (d) des précipitations.

Figure 4.4 ***Températures et précipitations moyennes sur l'ensemble du bassin versant pour la période de référence, comparées aux moyennes observées (MRCC).***

D'une part, les températures minimales mensuelles du MRCC, par rapport aux observations, sont sous-estimées tous les mois, jusqu'à 6°C en avril. Les températures maximales sont sous-estimées à l'été et à l'automne jusqu'à 4°C en août. Les précipitations sont surestimées au printemps, en été et en automne, jusqu'à 25 % en juin, et sous-estimés en hiver, jusqu'à 18 % en décembre.

Projection climatique corrigée du biais (1961-2099)

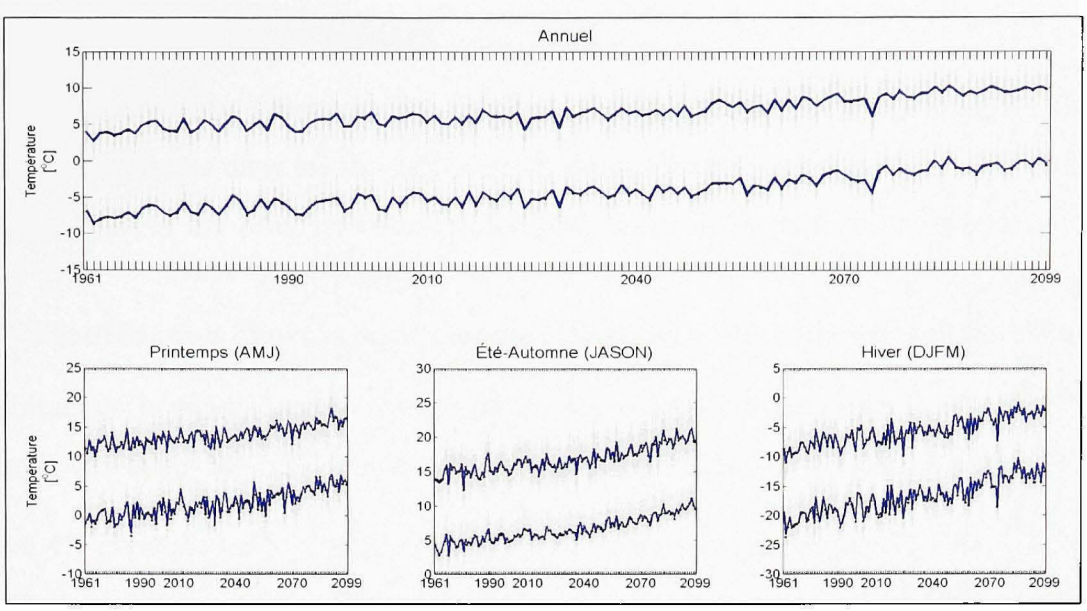
Les données climatiques du MRCC sur la période 1961-2099 ont été ajustées en fonction des biais. Après cette opération, les données climatiques du MRCC présentaient les mêmes moyennes que les observations à la période de référence. Les précipitations du MRCC avaient de surcroît les mêmes fréquences mensuelles.

Les statistiques des variables climatiques du MRCC sont détaillées et discutées dans Minville *et al.* (2008e) à l'annexe 6.

En résumé, la tendance à l'augmentation des températures moyennes annuelles et saisonnières est significative (test de Mann-Kendall). L'évolution des températures, de 1961 à 2099, à l'échelle annuelle et saisonnière, est illustrée à la figure 4.5. Aux échelles annuelle et saisonnière, les changements de moyennes et de variances des températures, par rapport à 1961-1990, sont statistiquement significatifs aux périodes 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 (t-test et f-test respectivement).

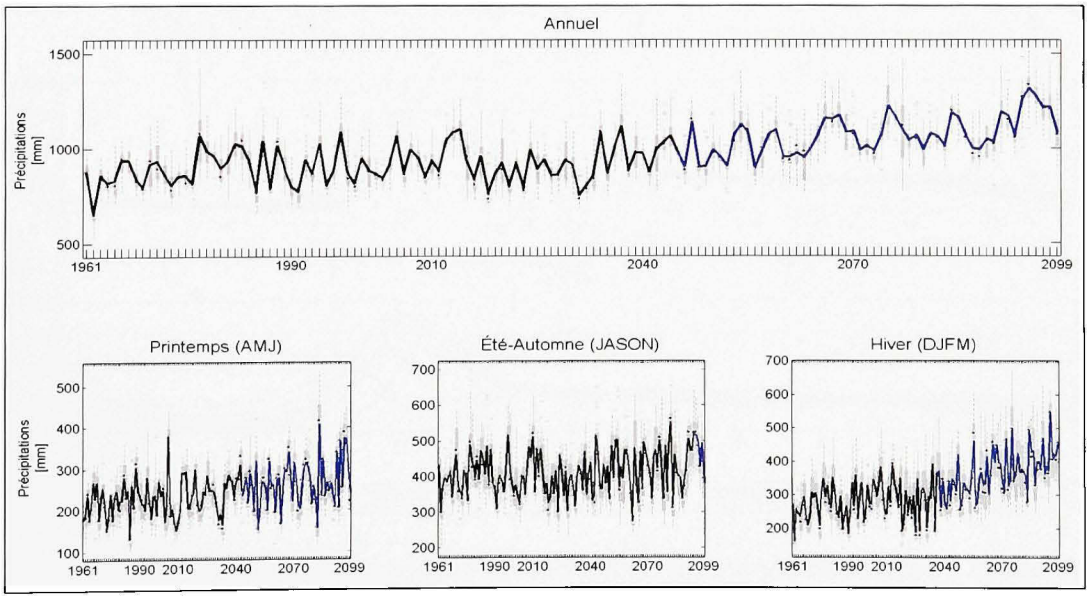
La tendance à l'augmentation des précipitations moyennes annuelles et saisonnières est aussi statistiquement significative, généralement à partir de l'horizon 2050. L'évolution des précipitations, de 1961 à 2099, à l'échelle annuelle et saisonnière, est illustrée à la figure 4.6.

Des changements statistiquement significatifs dans les moyennes et variances des projections climatiques ont aussi été détectés avec des t-test et f-test respectivement. En résumé, les augmentations de précipitations sont plus marquées en hiver et au printemps. À l'été-automne, il n'y a pas de changement statistiquement significatif.



La courbe supérieure de chaque graphique présente la température maximale et la courbe inférieure, la température minimale. Le trait bleu indique que la tendance à la hausse est statistiquement significative. Les boîtes grisées indiquent la dispersion des températures pour tous les points du MRCC sur le bassin versant.

Figure 4.5 ***Températures moyennes annuelles et saisonnières sur l'ensemble du bassin versant, pour la période 1961-2099 (MRCC).***



Le trait noir indique un régime qui respecte l'hypothèse de stationnarité et le trait bleu une tendance statistiquement significative à la hausse. Les boîtes grisées indiquent la dispersion des températures pour tous les points du MRCC sur le bassin versant.

Figure 4.6 ***Précipitations moyennes annuelles et saisonnières sur l'ensemble du bassin versant, pour la période 1961-2099 (MRCC).***

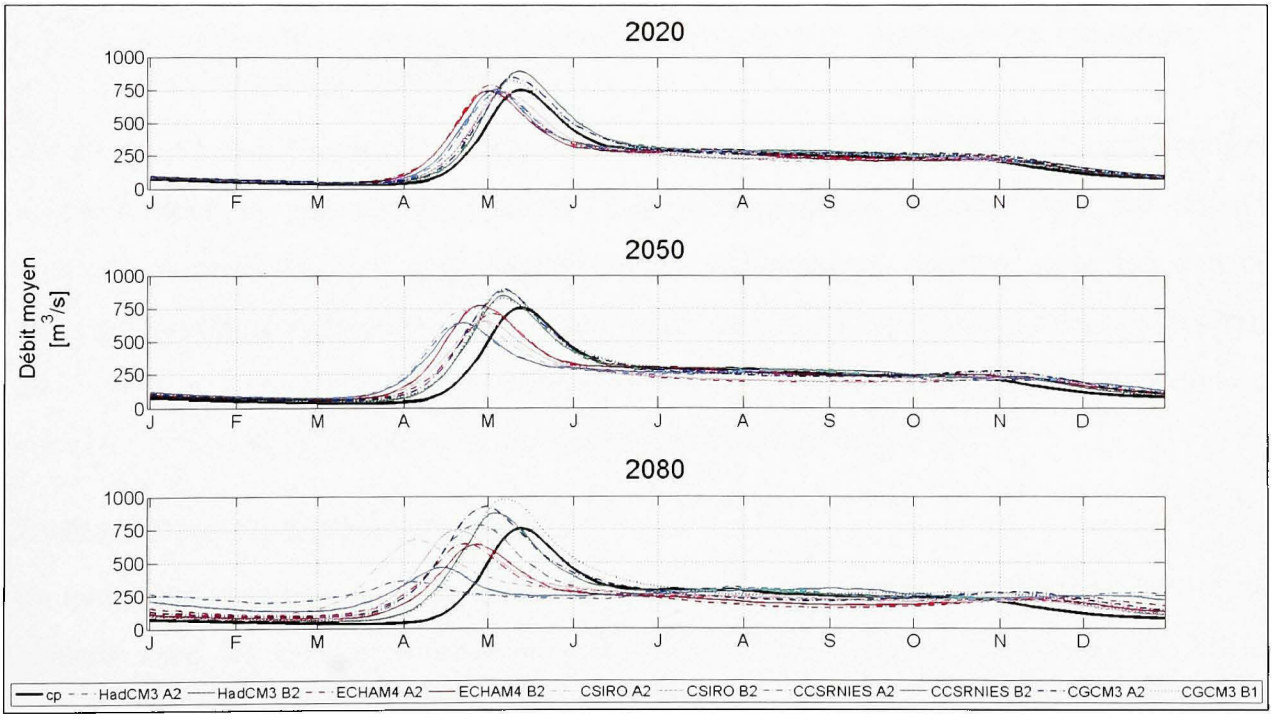
4.3.2 Simulations hydrologiques

Les sections suivantes présentent les résultats des modélisations hydrologiques des deux approches préconisées dans les travaux pour les études portant sur la gestion : HSAMI-Deltas et Hydrotel-MRCC. De plus, les résultats des analyses croisées sont aussi résumés.

4.3.2.1 Modélisation hydrologique globale (HSAMI) – Méthode des deltas (Deltas)

Les résultats de la modélisation hydrologique avec HSAMI et les projections climatiques de la méthode des deltas sont illustrés et discutés dans Minville *et al.* (2008a) à l'annexe 2.

La figure 4.7 présente les hydrogrammes moyens au sous-bassin Chute-du-Diable pour toutes les projections climatiques à chaque horizon. Ils sont comparés à l'hydrogramme moyen annuel, simulé avec les données climatiques de la période de référence, en trait noir gras.



Hydrogrammes moyens annuels avec les projections climatiques des deltas à chaque période future, par rapport à l'hydrogramme de la période de référence 1961-1990 en trait noir gras. Exemple pour le sous-bassin Chute-du-Diable.

Figure 4.7 ***Hydrogrammes moyens annuels des horizons 2020, 2050 et 2080 (HSAMI-Deltas).***

Les hydrogrammes moyens montrent qu'il y a une tendance à l'augmentation des débits hivernaux (novembre à avril) pour tous les MCG à tous les horizons. Une diminution est remarquée à l'été-automne (juin à octobre) pour certains MCG en 2020 et 2050, et pour tous les MCG, sauf CCSRNIES A2, en 2080. La pointe de crue printanière moyenne est précoce jusqu'à deux semaines en 2020 et jusqu'à six semaines en 2080, dépendamment du MCG. Quant au débit moyen de pointe de crue printanière, les MCG CGCM3 et HadCM3 proposent des augmentations pour tous les horizons alors que les autres MCG proposent des diminutions ou le statu quo. Le modèle CCSRNIES se démarque avec de plus importantes diminutions du débit de pointe de crue, augmentations des débits hivernaux et pour sa précocité dans la pointe de crue printanière. Les débits non-moyennés de chaque projections sont représentées aux figures B.1 à B.3 de l'appendice B. Les changements de volumes de crue printanière sont présentés à la figure B.4 de l'appendice B.

4.3.2.2 Modélisation hydrologique distribuée (Hydrotel) – Méthode de réduction d'échelle dynamique (MRCC)

Les régimes hydrologiques découlant de la projection climatique du MRCC ont d'abord été analysés pour la période de contrôle. Les hydrogrammes moyens avec les données climatiques observées ont été comparés aux hydrogrammes moyens avec les données climatiques simulées. Ensuite, les hydrogrammes moyens des périodes futures (2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099) ont été comparés aux hydrogrammes moyens de la période de contrôle (1961-1990), simulés avec les données climatiques du MRCC.

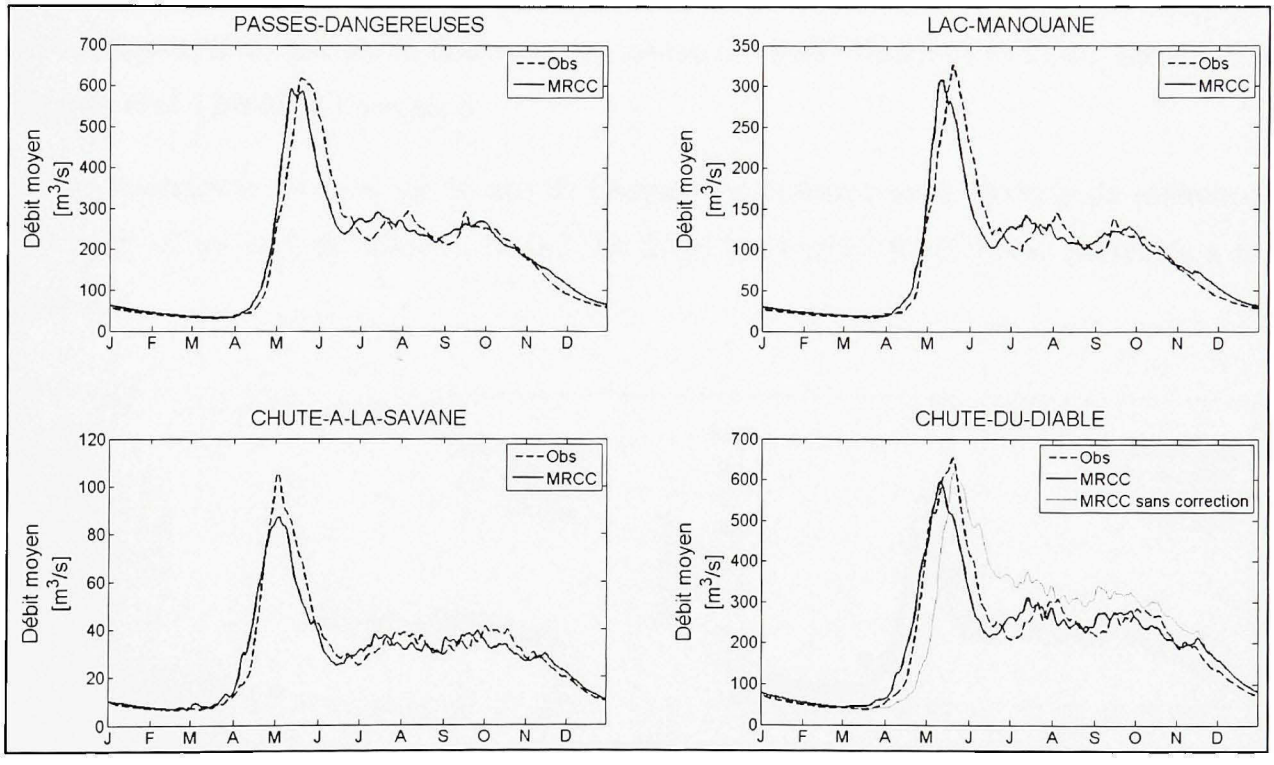
Hydrogrammes de la période de contrôle

En première analyse, les hydrogrammes moyens de la période de référence 1961-1990, générés avec les données climatiques observées et les données climatiques du MRCC corrigées de manière à réduire le biais, ont été superposés (figure 4.8). L'intérêt était de comparer les hydrogrammes résultant de séries climatiques ayant les mêmes moyennes mensuelles.

Des différences au niveau des temps de pointe moyens de la crue printanière ont été remarquées pour les bassins versants Chute-du-Diable, Lac-Manouane et Passes-Dangereuses. La crue printanière moyenne à la période de contrôle, simulée avec les données

du MRCC, est précoce d'une semaine par rapport à la crue observée de la même période. Une analyse approfondie a permis d'identifier que les différences entre la variabilité des données de températures du MRCC et des observations en étaient la cause. La correction du biais des températures s'effectue sur la moyenne mensuelle seulement, et ne permet pas d'ajuster la variabilité journalière à l'intérieur du mois.

Dans un autre ordre d'idées, la figure 4.8 montre, pour le sous-bassin Chute-du-Diable seulement, l'hydrogramme moyen sans la correction du biais des données du MRCC (trait pâle gris).



Hydrogrammes simulés avec les données climatiques observées (obs) et les données du MRCC corrigées du biais (MRCC). La courbe supplémentaire gris pâle, au sous-bassin Chute-du-Diable, représente l'hydrogramme moyen annuel sans la correction du biais du MRCC (MRCC sans correction)

Figure 4.8 ***Hydrogrammes moyens annuels, pour la période de référence 1961-1990 (Hydrotel-MRCC).***

La sous-estimation des températures du MRCC au printemps engendre une crue printanière tardive de deux semaines. La surestimation des précipitations en été provoque des débits plus élevés. Cet hydrogramme démontre la nécessité de corriger les biais des données climatiques du MRCC pour des études d'impacts hydrologiques au bassin versant étudié. Une autre remarque concerne la crue printanière moyenne écrêtée des simulations par rapport aux observations, due à l'effet combinée des précipitations moyennées sur la tuile du MRCC et de l'utilisation d'un modèle hydrologique distribué,

Hydrogrammes des périodes futures et de la période de contrôle

Des analyses statistiques des changements de moyenne et de variance des régimes hydrologiques, ainsi que sur la détection des tendances, sont effectuées et commentées dans Minville *et al.* (2008e) à l'annexe 6.

Les hydrogrammes moyens sur 30 ans de chaque sous-bassin pour la période de référence 1961-1990 et les périodes futures 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 sont présentés à la figure 4.9.

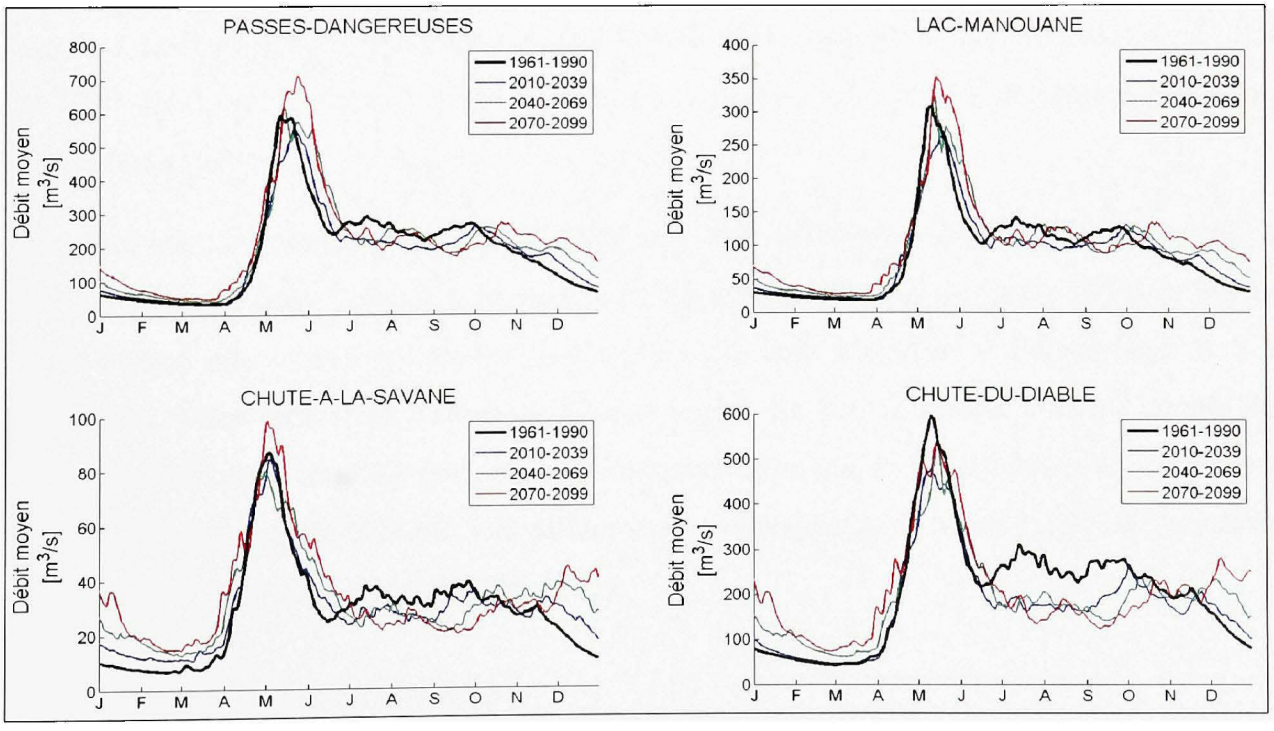


Figure 4.9 ***Hydrogrammes moyens annuels, pour la période de référence 1961-1990 et les horizons 2020, 2050 et 2080 (Hydrotel-MRCC).***

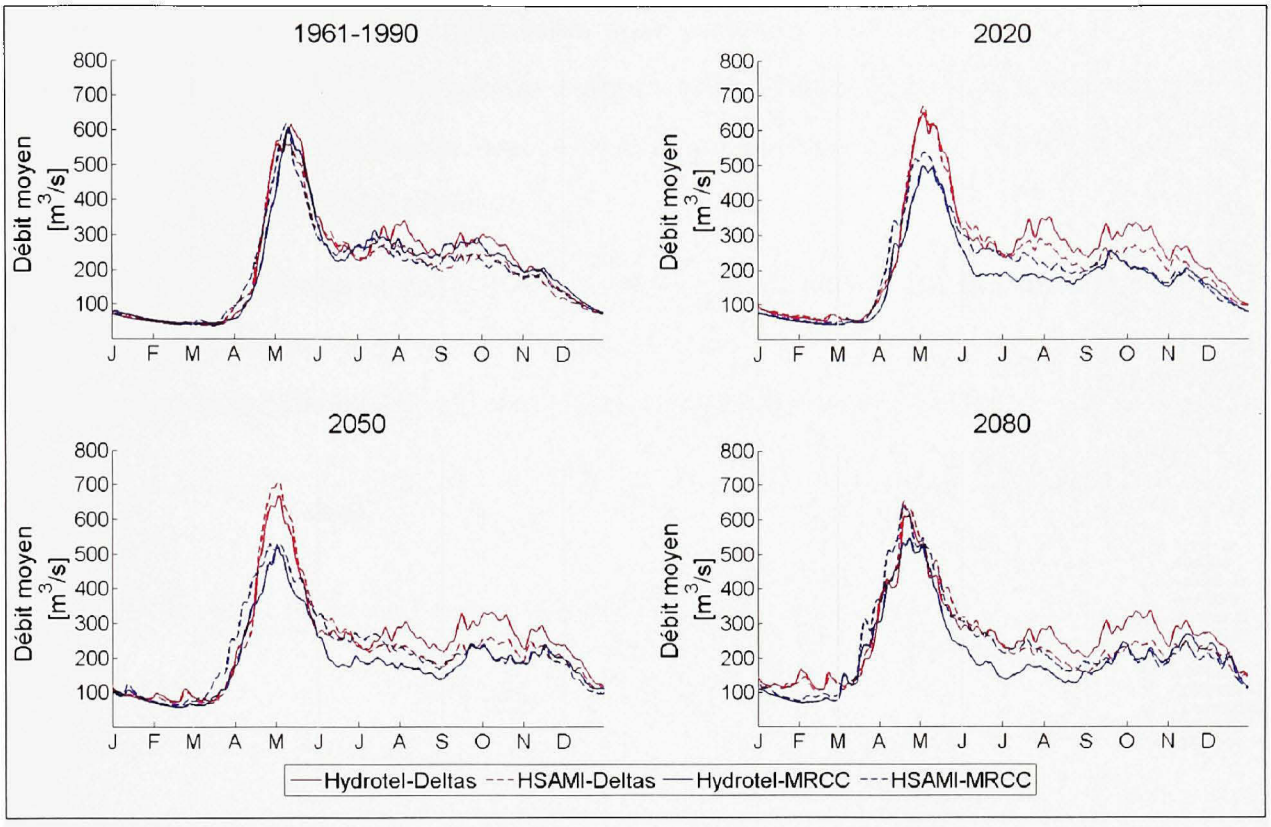
En contexte de changements climatiques, les débits moyens estivaux et automnaux diminuent davantage pour les sous-bassins situés plus au sud (Chute-à-la-Savane et Chute-du-Diable). Ces sous-bassins présentent aussi des débits hivernaux plus élevés et un devancement moyen du début de la crue plus important que les sous-bassins plus au nord (Lac-Manouane et Passes-Dangereuses).

4.3.2.3 Modélisations hydrologiques croisées (HSAMI-MRCC, Hydrotel-MRCC, HSAMI-Deltas et Hydrotel-Deltas)

Les résultats des simulations hydrologiques croisées avec les combinaisons de modèles hydrologiques et de projections climatiques sont détaillés dans Minville *et al.* (2008b) à l'annexe 3.

L'analyse des régimes hydrologiques des quatre combinaisons de méthodes de réduction d'échelle et de modèles hydrologiques (HSAMI-MRCC, Hydrotel-MRCC, HSAMI-Deltas et Hydrotel-Deltas) montre que l'incertitude liée à la réduction d'échelle (avec CGCM3 A2) est plus importante que celle associée au modèle hydrologique. Toutefois, le modèle hydrologique engendre aussi des incertitudes. La figure 4.10 montre les hydrogrammes moyens annuels des quatre combinaisons à la période de contrôle et aux horizons 2020, 2050 et 2080. Les enveloppes des débits de chacune des combinaisons sont présentées à la figure B.4 de l'appendice B.

En contexte de changements climatiques, la crue printanière est conditionnée par la projection climatique. Toutefois, le modèle HSAMI engendre plus de variabilité pour la crue et la décrue que le modèle Hydrotel. La précocité était identifiée à l'étalonnage et à la validation. Cette variabilité s'accentue avec le temps. En été, le modèle HSAMI simule des débits proches avec les deux projections climatiques alors que le modèle Hydrotel amplifie le sens du changement de HSAMI. Les différences proviendraient de la simulation du processus dominant en été, l'évapotranspiration.



Note : À la période de référence 1961-1990, il ne s'agit pas des deltas mais bien des observations ayant servi à produire la projection des deltas.

Figure 4.10 ***Hydrogrammes moyens de la période de contrôle 1961-1990 et les horizons 2020, 2050 et 2080, pour chaque combinaison de projections climatiques et de modèles hydrologiques***

4.3.3 Simulation des opérations du système hydrique

Les résultats des simulations des opérations du système hydrique en contexte de changements climatiques se scindent en deux catégories majeures : avec les règles de gestion actuelles et avec les règles de gestion adaptées. Ensuite, l'étude avec les règles de gestion adaptées se subdivise de nouveau en deux approches en ce qui a trait aux scénarios d'apports hydrologiques employés : HSAMI-Deltas et Hydrotel-MRCC.

4.3.3.1 Gestion avec les règles actuelles

Les simulations avec les règles de gestion actuelles ont été réalisées avec le modèle HEC-ResSim pour l'horizon 2050. Elles avaient pour but de vérifier le comportement du système hydrique soumis à des régimes hydrologiques différents, sans adaptation de la gestion.

Les résultats détaillés de ces indicateurs sont présentés dans Minville *et al.* (2008c) à l'annexe 4. Les indicateurs de gestion analysés pour évaluer le comportement du système hydrique de la rivière Péribonka sont la production hydroélectrique, les déversements non productibles et la fiabilitédes réservoirs.

En résumé, la production hydroélectrique moyenne totale décroît par rapport à la période de contrôle pour toutes les projections climatiques, jusqu'à 12 % annuellement, à l'exception de la simulation sous CGCM3 A2 qui propose une augmentation de 2 % (figure 4.11).

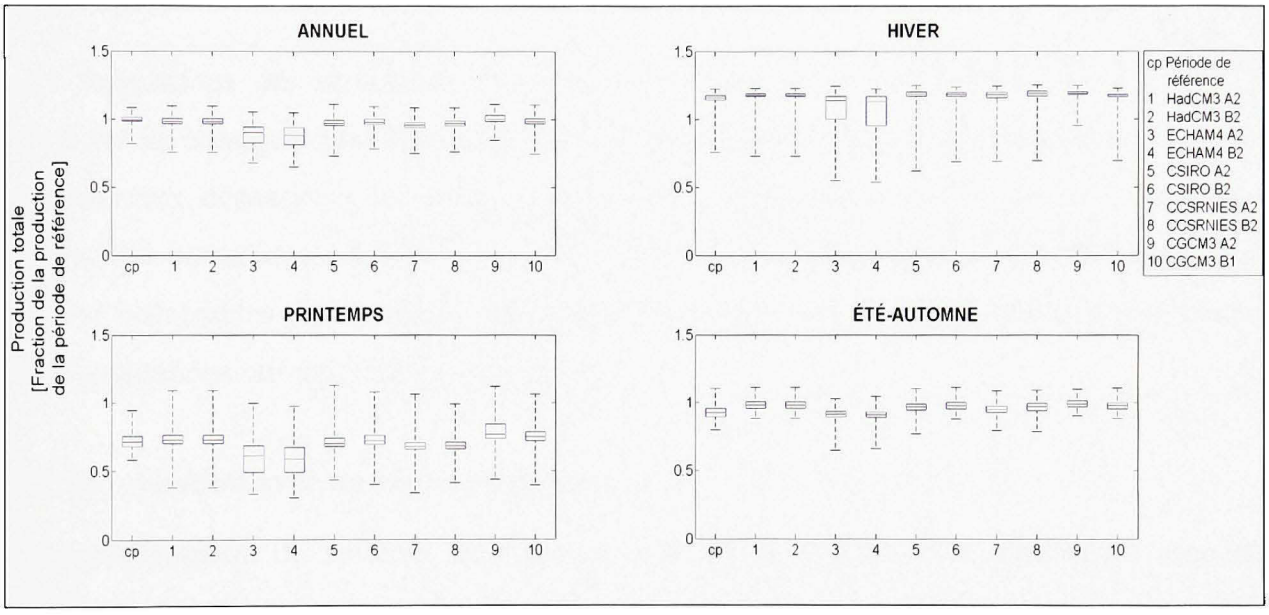


Figure 4.11 ***Production moyenne annuelle et saisonnière en fraction de la production de la période moyenne annuelle de la période de référence, pour la période de référence 1961-1990 (cp) et les projections climatiques (1 à 10) à l'horizon 2050 (HSAMI-Deltas-ResSim).***

À l'échelle saisonnière, la production moyenne en hiver et à l'été-automne augmente avec toutes les projections à l'exception d'ECHAM4 A2 et B2. La production moyenne diminue au printemps sous toutes les projections climatiques sauf la simulation avec CGCM3 A2. Pour ce qui est de la production annuelle à chaque centrale prise individuellement, la tendance est à l'augmentation aux centrales au fil de l'eau et à la diminution à la centrale gérée par réservoir. Les centrales au fil de l'eau bénéficient des augmentations d'hydraulicité et/ou des différences intersaisons moins marquées dans les débits, alors que la centrale par réservoir n'est pas gérée de manière optimale pour la crue printanière.

La tendance générale des déversements non productibles moyens annuels est à l'augmentation, à l'exception des simulations avec ECHAM4 A2 et B2. Cet accroissement est imputable aux importants déversements au printemps par rapport à la période de contrôle et à la règle de gestion actuelle qui n'est pas optimisée pour la gestion de la crue. En réalité, les gestionnaires du système hydrique de la rivière Péribonka optimisent la période où le niveau des réservoirs doit être abaissé au printemps. Toutefois, le modèle ResSim ne permet pas d'optimiser la gestion et ainsi, il ne représente pas fidèlement la réalité à cette saison.Les déversements non productibles diminuent aux autres saisons pour la plupart des projections climatiques.

Les simulations des opérations du système hydrique avec les apports hydrologiques en contexte de changements climatiques ont démontré que les réservoirs étaient moins fiables (les niveaux dépassaient le niveau maximal d'exploitation) annuellement de 1 % pour la projection climatique CGCM3 A2. Les réservoirs Lac-Manouane et Passes-Dangereuses étaient vulnérables (les niveaux dépassaient le niveau normal d'exploitation) avec cinq et trois projections climatiques respectivement.

4.3.3.2 Gestion avec les règles adaptées

Le comportement du système hydrique en contexte de changements climatiques avec des règles de gestion adaptées a été investigué avec les apports hydrologiques des approches HSAMI-Deltas et Hydrotel-MRCC. Dans les deux situations, les critères d'analyse sont la modification des niveaux moyens, la production hydroélectrique moyenne annuelle et saisonnière, le rendement des centrales, les déversements non productibles, la fiabilité et la vulnérabilité des réservoirs.

Comme mentionné dans la méthodologie, les simulations de l'approche HSAMI-Deltas différaient de l'approche Hydrotel-MRCC au point de vue de la production des règles de gestion. Avec l'approche HSAMI-Deltas, les règles de gestion sont optimisées pour chaque projection climatique à chaque horizon, en utilisant les 900 années d'apports de chaque horizon. L'approche Hydrotel-MRCC, avec les données du MRCC transitoires, permettait d'actualiser les règles de gestion chaque année.

Approche HSAMI-Deltas

Les résultats des simulations des opérations du système hydrique selon l'approche HSAMI-Deltas sont détaillés dans Minville *et al.* (2008d) à l'annexe 5.

Les règles de gestion sont représentées avec les niveaux moyens des réservoirs, tel qu'à la figure 4.12 ci-après.

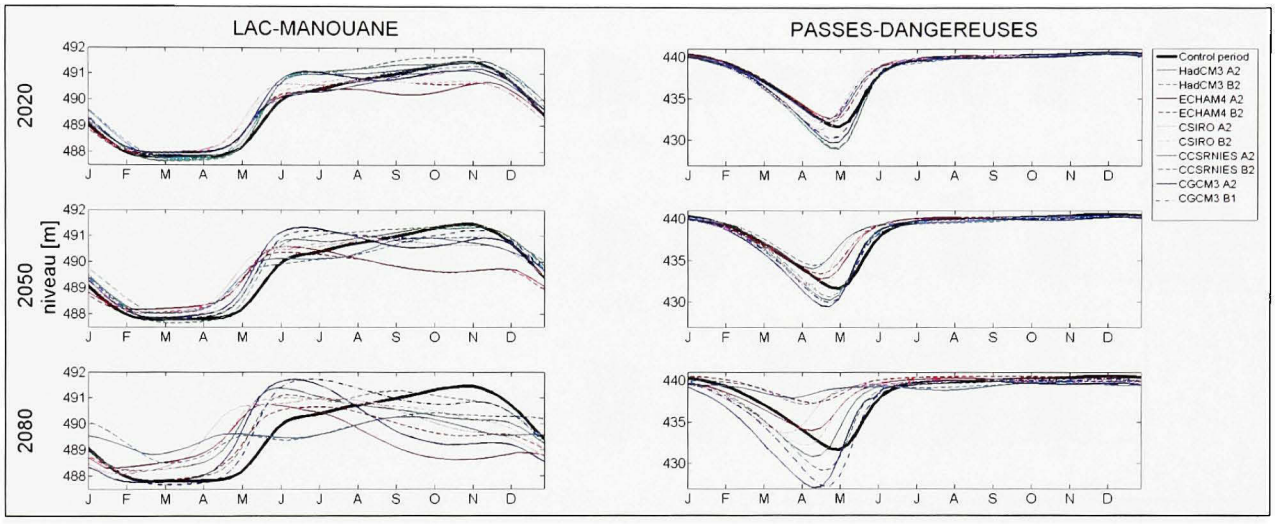


Figure 4.12 ***Niveaux moyens des réservoirs, pour la période de référence 1961-1990 (control period) et les projections climatiques (1 à 10) aux horizons 2020, 2050 et 2080 (HSAMI-Deltas-SimÉTS/OptPoly).***

En résumé, l'adaptation de la gestion se manifeste par un rehaussement progressif des niveaux moyens du réservoir Lac-Manouane de 2020 à 2080 en hiver jusqu'au début de l'été, par rapport aux simulations de la période de contrôle. À l'été et à l'automne, l'inverse se produit, c'est-à-dire que le niveau du réservoir est abaissé. Les niveaux d'eau sont aussi haussés plus tôt à la fin du printemps.

La tendance au réservoir Passes-Dangereuses est moins univoque que pour le réservoir Lac-Manouane selon les projections climatiques. L'adaptation de la gestion s'effectue en devançant la date de vidage du niveau du réservoir au printemps avec la plupart des projections climatiques. De plus, l'adaptation de la gestion au réservoir Passes-Dangereuses se manifeste par un changement dans le niveau moyen minimum du réservoir au printemps.

Ces changements s'accentuent davantage plus la période est éloignée de la période de référence 1961-1990.

En ce qui a trait à la production hydroélectrique moyenne annuelle (figure 4.13), la tendance est à l'augmentation aux trois horizons de changements climatiques. La projection climatique ECHAM4 A2 en 2020 fait exception, avec une diminution d'environ 1 %.

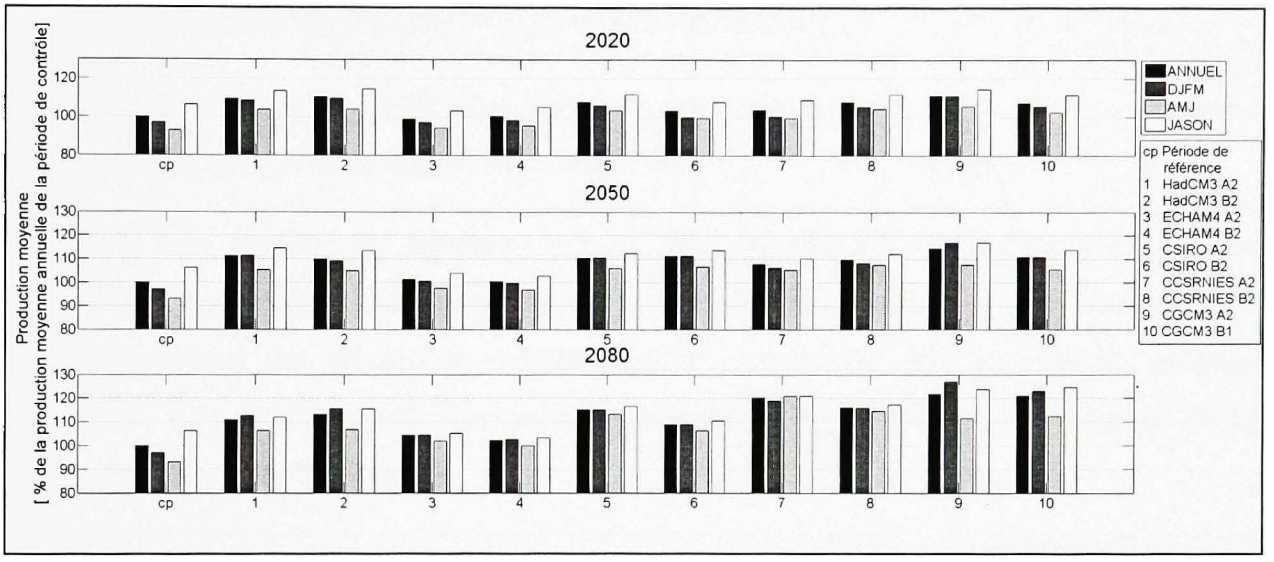


Figure 4.13 ***Production totale moyenne annuelle et saisonnière, pour la période de référence 1961-1990 (période de référence) et les projections climatiques (1 à 10) aux horizons 2020, 2050 et 2080 (HSAMI-Deltas-SimÉTS/OptPoly).***

Les gains de production se produisent majoritairement au printemps pour l'ensemble des projections en 2020, pour se déplacer progressivement en hiveren 2080. La saison estivale-automnale présente les moins importants gains en production. Des diminutions par rapport à la période de contrôle sont aussi simulées avec les projections climatiques ECHAM4 A2 et B2 à tous les horizons.

Les déversements non productibles moyens annuels et saisonniers présentent une tendance à l'augmentation par rapport à la période de contrôle. Ces augmentations s'accentuent aussi plus l'horizon envisagé est loin. À l'échelle saisonnière, le printemps, et dans une moindre mesure l'hiver, se démarquent particulièrement pour les augmentations de déversements non productibles. Les simulations avec des apports des projections climatiques HadCM3 et CGCM3 se distinguent pour leurs importants accroissements de déversements, jusqu'à 300 %

par rapport à la période de contrôle. Ces projections sont aussi celles qui provoquent des dépassements du niveau maximal d'exploitation au réservoir Passes-Dangereuses.

Approche Hydrotel-MRCC

Les résultats des simulations des opérations du système hydrique selon l'approche Hydrotel-MRCC sont détaillés dans Minville *et al.* (2008e) à l'annexe 6. Les tendances et les changements dans les moyennes et variances des indicateurs sont compilés et commentés.

Le changement dans la règle de gestion a été analysé selon les niveaux moyens hebdomadaires aux périodes 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099, par rapport à 1961-1990.

La figure 4.14 montre les niveaux moyens des réservoirs Lac-Manouane et Passes-Dangereuses à ces périodes. Deux modifications dans la gestion des réservoirs ressortent : le décalage temporel des niveaux au printemps et le changement dans les niveaux moyens saisonniers. Ces modifications s'accentuent davantage plus la période est éloignée de la période de référence 1961-1990.

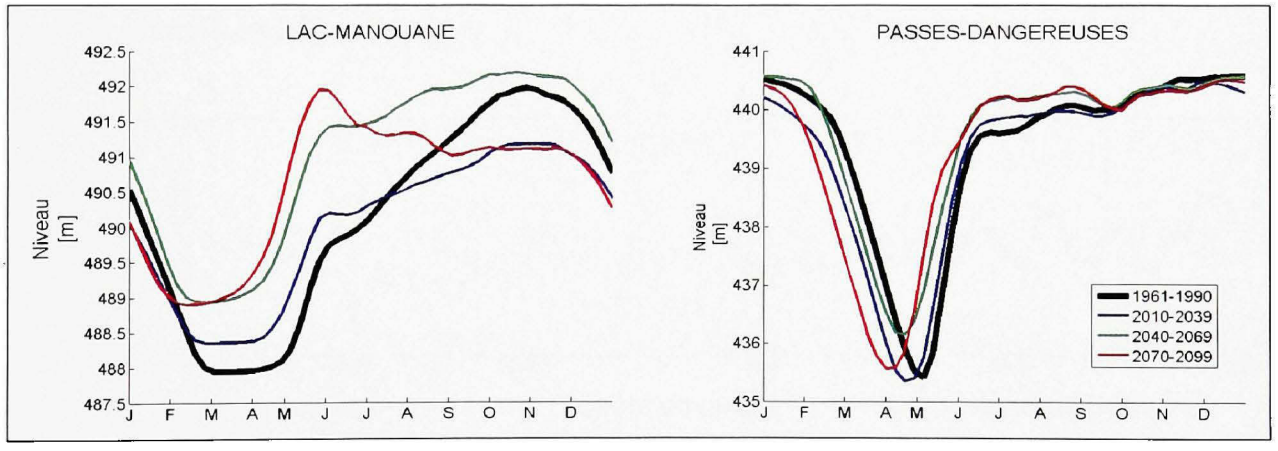


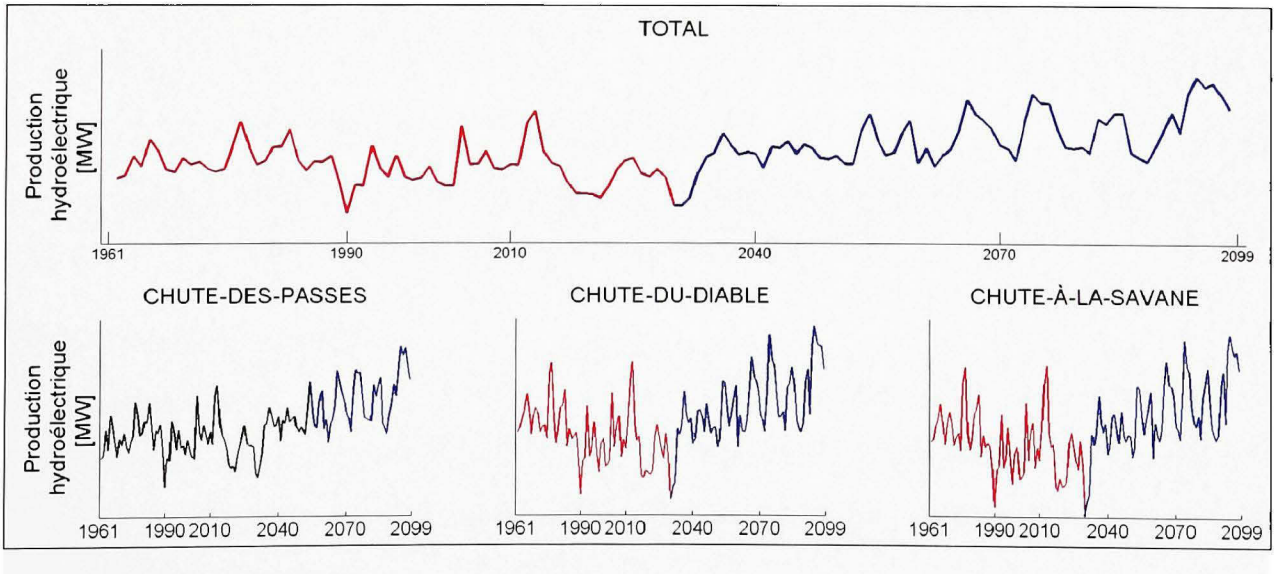
Figure 4.14 ***Niveaux moyens des réservoirs, pour la période de référence 1961-1990 et les horizons 2020, 2050 et 2080 (Hydrotel-MRCC-SimÉTS/OptPoly).***

De plus, le niveau est plus élevé au printemps au réservoir Lac-Manouane à toutes les périodes futures. Il augmente en été-automne de juillet à novembre en 2010-2039 et en 2070-2099. En 2070-2099, le niveau décroît de juin à novembre. L'hiver, il est davantage abaissé aux périodes 2040-2069 et 2070-2099 qu'à la période 1961-1990. Le niveau est maintenu plus bas en 2070-2099 afin d'éviter les violations de contraintes résultant du dépassement de

la cote maximale d'exploitation, dues aux périodes de redoux plus fréquentes. Ils sont davantage abaissés en été en 2010-2039 afin d'élever la hauteur de chute au réservoir Passes-Dangereuses, conséquemment aux baisses d'hydraulicité à cette saison.

Le réservoir Passes-Dangereuses suit les mêmes tendances que le réservoir Lac-Manouane, sauf que le décalage de la période de rabaissement au printemps est plus prononcé. En conséquence au décalage du début de la crue de 10, 20 et 30 jours pour les périodes 2010-2039, 2040-2069 et 2070-2099 respectivement, la période de vidage du réservoir est devancée d'environ les mêmes durées à chaque période. L'été-automne, le niveau est plus élevé. L'hiver, il est maintenu en moyenne aux périodes futures comme à la période de contrôle.

La production hydroélectrique totale au système hydrique et individuellement à chaque centrale est illustrée à la figure 4.15. La production hydroélectrique totale au système hydrique présente une tendance à la baisse jusqu'en 2030, et par la suite à la hausse jusqu'en 2099, la limite temporelle de l'étude. La tendance à la hausse est statistiquement significative (test de Mann-Kendall).



Le trait noir indique un régime qui respecte l'hypothèse de stationnarité, le trait rouge une tendance statistiquement significative à la baisse et le trait bleu une tendance statistiquement significative à la hausse.

Figure 4.15 ***Production hydroélectrique moyenne de 1961-2099 (Hydrotel-MRCC-SimÉTS/OptPoly).***

La baisse de production au système hydrique est due à la baisse de production statistiquement significative aux centrales au fil de l'eau (Chute-du-Diable et Chute-à-la-Savane) jusqu'en 2030. La centrale à réservoir (Chute-des-Passes) ne présente pas de baisse significative de production hydroélectrique moyenne. À l'échelle saisonnière, il apparaît que les baisses dans la production moyenne annuelle surviennent en été-automne aux centrales Chute-du-Diable et Chute-à-la-Savane. Aux autres saisons, la production hydroélectrique est à la hausse à toutes les centrales. Les tendances sont significatives à partir de la période 2040-2079. En plus des changements dans les moyennes de production, des changements de variances sont aussi simulés. La variance dans la production hydroélectrique moyenne augmente sauf en hiver. La plus forte variabilité est au printemps.

Les déversements non productibles moyens annuels et saisonniers présentent une tendance à l'augmentation aux périodes futures par rapport à la période de contrôle. Les déversements moyens triplent entre la période 2070-2099 et la période de référence 1961-1990. À l'échelle saisonnière, le printemps, et dans une moindre mesure l'hiver, se démarquent pour les augmentations de déversements non productibles.

La fiabilité moyenne du réservoir Lac-Manouane, au cours des 139 années, est de 99,99 %. Pour ce qui est du réservoir Passes-Dangereuses, sa fiabilité est de 100 %.

4.4 Interprétation des résultats et discussion

Les travaux de recherche s'articulaient autour d'hypothèses méthodologiques et initiales. Les résultats sont interprétés et discutés en fonction de ces dernières.

Hypothèse méthodologique 1

Les modèles hydrologiques calibrés avec les données météorologiques du passé récent sont transférables dans le futur. Les différentes combinaisons de modèles hydrologiques et de projections climatiques sont appropriées pour projeter les impacts hydrologiques des changements climatiques.

Aucune aberration n'a été remarquée avec les combinaisons de modèles hydrologiques et de projections climatiques employées pour mener les études d'adaptation de la gestion du système hydrique (HSAMI-Deltas et Hydrotel-MRCC). L'examen des variables d'état des

simulations hydrologiques n'indique pas qu'un processus hydrologique ait pu être limité par des paramètres calibrés des modèles hydrologiques. Toutefois, l'hypothèse de transférabilité des paramètres de calibration du modèle HSAMI en contexte de changements climatiques n'est pas confortée lorsqu'il est utilisé avec les données du MRCC dans le cadre des analyses croisées.

L'analyse croisée des débits estivaux en contexte de changements climatiques montre qu'ils sont influencés par la combinaison du modèle hydrologique et de la projection climatique de laquelle ils sont issus (*Voir* Minville *et al.* (2008b) à l'annexe 3). Les débits moyens en été avec le modèle HSAMI diffèrent peu selon qu'ils résultent de la projection des deltas ou du MRCC, alors que les débits moyens estivaux avec le modèle Hydrotel varient considérablement. Les débits sont faibles avec Hydrotel-MRCC et élevés avec Hydrotel-Deltas. Ces différences proviendraient de la simulation du processus dominant en été : l'évapotranspiration réelle. L'évapotranspiration potentielle est simulée par l'équation Hydro-Québec (Fortin *et al.*, 2001a; Turcotte *et al.*, 2007) dans HSAMI et Hydrotel. La quantité d'eau évapotranspirée avec le modèle HSAMI dépend surtout de la disponibilité de l'eau dans le réservoir conceptuel de la zone non saturée. Un paramètre de calibration du modèle HSAMI est la capacité du réservoir de la zone saturée. Avec les deltas en contexte de changements climatiques, le réservoir de la zone non saturé se comporte comme avec les observations qui ont permis de calibrer le modèle. L'état du réservoir fluctue « normalement », avec un niveau de saturation élevé au printemps et moyen en été. L'évapotranspiration réelle n'est alors pas limitée par la capacité du réservoir. Cependant, avec les données du MRCC, le réservoir de la zone non saturée est plein du printemps à la fin de l'automne (les précipitations du MRCC sont plus constantes et elles contribuent à maintenir le sol humide). Il est à noter qu'avec le modèle Hydrotel, la teneur en eau dans le sol avec les données du MRCC était plus élevée qu'avec les deltas (*Voir* figure B.6 de l'appendice B), ce qui appuie le raisonnement.

Les débits plus importants avec Hydrotel-Deltas par rapport à HSAMI-Deltas seraient le résultat de l'étalonnage du modèle Hydrotel, qui avait la particularité de surestimer les débits à la période de référence.

Hypothèse méthodologique 2

Il y a davantage d'incertitudes dans la projection climatique que dans le modèle hydrologique.

La conclusion des auteurs qui se sont attardés aux incertitudes des modèles hydrologiques et des projections climatiques sur les régimes hydrologiques est que l'incertitude de la projection est plus importante que celle du modèle (Dibike et Coulibaly, 2005; IPCC, 2001a; Prudhomme *et al.*, 2003). Les travaux présentés dans cet article confirment partiellement cette affirmation.

Le choix d'une projection climatique et d'un modèle hydrologique influence la modélisation de la crue printanière et les débits estivaux. Des différences souvent non statistiquement significatives dans les moyennes mensuelles de projections climatiques conduisent à des différences statistiquement significatives dans les régimes hydrologiques. Ces impacts seraient attribuables aux différences de variabilité statistiquement significatives des données climatiques, en plus des processus hydrologiques simulés par les modèles.

Les résultats des travaux indiquent que la crue printanière est plutôt conditionnée par la projection climatique. Le modèle hydrologique influence toutefois la forme de l'hydrogramme, qui est systématiquement plus variable avec le modèle conceptuel global HSAMI, peu importe la projection climatique. En été, les modèles hydrologiques utilisés présentent des comportements particuliers, ce qui permet d'affirmer qu'il y a davantage d'incertitude dans le modèle hydrologique à cette saison, pour les raisons évoquées à l'*hypothèse méthodologique 1*.

Hypothèse initiale 1

Les changements climatiques auraient des conséquences sur les régimes hydrologiques, qui se répercuteraient sur la gestion de systèmes hydriques.

Les résultats, peu importe la démarche poursuivie (HSAMI-Deltas ou Hydrotel-MRCC), montrent que la tendance générale, au système hydrique de la rivière Péribonka, est à l'augmentation des apports moyens annuels aux réservoirs. L'hypothèse était fondée puisque les résultats démontrent une modification des niveaux moyens des réservoirs.

Outre les changements annuels dans les régimes hydrologiques, les perturbations dans la saisonnalité ont aussi affecté la gestion. Dans Minville *et al.* (2008a) à l'annexe 2, il est démontré que les changements dans la moyenne des débits saisonniers sont significatifs à toutes les saisons et horizons avec l'approche HSAMI-Deltas. De plus, Minville *et al.* (2008e) à l'annexe 6 concluent que les changements dans la moyenne des débits moyens saisonniers sont significatifs en été-automne et en hiver selon l'approche Hydrotel-MRCC. Ces impacts saisonniers mènent à des décalages dans la période de remplissage et de vidage des réservoirs au printemps, à des modifications des niveaux moyens saisonniers des réservoirs, et parfois même, à des déplacements dans les pointes de production saisonnière. Par exemple, la production était maximale l'été pour la période de référence 1961-1990 avec l'approche HSAMI-Deltas (*Voir* Minville *et al.* (2008d) à l'annexe 5), et cette pointe de production était déplacée en hiver pour de nombreuses projections climatiques en 2080.

Un autre indicateur de gestion perturbé par les impacts hydrologiques des changements climatiques concerne les déversements non productibles. Les déversements moyens annuels et saisonniers augmentent pour toutes les projections climatiques. Des augmentations ont même été simulées en été-automne pour les projections climatiques qui entraînaient des baisses des débits. Cet exemple démontre que les changements dans les moyennes ne suffisent pas à expliquer les résultats. L'augmentation des déversements non productibles moyens résulte donc du changement dans la variabilité des apports. Les débits moyens estivaux-automnaux diminuent en moyenne à chaque période future, mais leur variabilité augmente (*Voir* Minville *et al.* (2008e) à l'annexe 6).

Hypothèses initiales 2 et 3

L'adaptation de la gestion d'un système hydrique atténuerait les effets négatifs des fluctuations du climat. Certaines projections climatiques amélioreraient la performance du système hydrique par rapport à la période de référence 1961-1990.

Les simulations du système hydrique à l'horizon 2050 avec les règles de gestion actuelles (*Voir* Minville *et al.* (2008c) à l'annexe 4) engendraient une baisse de production hydroélectrique annuelle de 1 à 12 % pour la majorité des projections. Une seule projection anticipait une hausse, et elle était de 2 %.

À l'opposé, les simulations du système hydrique avec les règles de gestion adaptées (*Voir* Minville *et al.*, (2008d) à l'annexe 5 et Minville *et al.*, (2008e) à l'annexe 6) engendraient, pour la totalité des projections climatiques au même horizon, des hausses de production hydroélectrique annuelle, de l'ordre du 1 à 14 %. Une seule projection provoquait une baisse de 1 %. Ces résultats démontrent clairement que les règles de gestion adaptées aux changements climatiques doivent être utilisées dans les études d'impacts et d'adaptation, afin d'illustrer le plus justement possible les conséquences des changements climatiques sur la performance des systèmes hydriques.

Des simulations qui n'ont pas fait l'objet d'une publication appuient cette constatation. Les figures C.1 et C.2 de l'appendice C exposent les gains et les pertes en production hydroélectrique à utiliser des règles de gestion optimisées avec les régimes hydrologiques futurs par rapport aux règles optimisées avec les régimes de la période de référence 1961-1990. Il appert que l'adaptation de la gestion améliore la production moyenne annuelle et la fiabilité des réservoirs. Ces résultats démontrent aussi que l'adaptation du système hydrique maximise les installations en place et peut même améliorer la performance du système hydrique par rapport à la période de référence 1961-1990.

Hypothèse initiale 4

Les résultats d'une approche de modélisation hydrologique distribuée et d'un seul MRC, seraient dans la plage d'incertitude des résultats de nombreuses modélisations hydrologiques globales avec des projections climatiques de l'approche des deltas.

Les différents résultats des simulations des variables hydroclimatiques et de gestion de système hydrique des approches HSAMI-Deltas et Hydrotel-MRCC ont été comparés.

Les changements des débits moyens annuels, par rapport à la période de contrôle avec l'approche HSAMI-Deltas, varient de -2 à +14 % en 2020 et -20 à +30 % en 2080, selon les projections climatiques. Pour ce qui est de l'approche Hydrotel-MRCC, ils varient de +7 % en 2020 à +21 % en 2080 pour la seule projection climatique utilisée. L'hypothèse est donc vérifiée en ce qui a trait au débit moyen annuel. Toutefois, un élément important a été remarqué lors de la comparaison spécifique entre la projection climatique du MRCC (pilotée par le CGCM3 A2) et la projection climatique réalisée selon la méthode des deltas avec le

MCG CGCM3 A2, lors des analyses croisées. Bien que la projection du MRCC ait été pilotée avec le CGCM3 A2, elle diffère néanmoins de son homologue produite selon les deltas. Avec la méthode des deltas, les plus importantes augmentations des débits résultent des projections climatiques produites avec CGCM3 A2 (14 %, 19 % et 30 %, respectivement en 2020, 2050 et 2080). Par contre, avec le MRCC, les hausses sont plus conservatrices (7 %, 14 % et 21 %). L'analyse croisée des projections climatique et des modèles hydrologiques montrent que l'incertitude pourrait découler de l'effet combiné de la méthode de réduction d'échelle et du modèle hydrologique. La correction du biais du MRCC peu aussi avoir contribué à rompre le lien entre les méthodes de réduction d'échelle.

Ces écarts se répercutent sur la production moyenne annuelle, qui change de +11 %, +14 % et +20 % en 2020, 2050 et 2080 par rapport à la période de référence sous HSAMI-Deltas pour CGCM3 A2 et qui change de -2 %, +9 % et 18 % sous Hydrotel-MRCC. Ces différences sont attribuables à la méthode de réduction d'échelle utilisée et au modèle hydrologique.

CHAPITRE 5

CONTRIBUTIONS ET RECOMMANDATIONS

Ce chapitre expose dans un premier temps la contribution de la recherche à l'avancement des connaissances. Elle est mise en valeur dans le cadre d'une discussion en égard à l'interprétation des résultats et aux recherches antérieures sur le sujet. Dans un deuxième temps, les recommandations pour la poursuite des travaux sont identifiées, en parallèle avec les limitations des travaux.

5.1 Contributions de la recherche

Les études qui se sont consacrées récemment aux impacts des changements climatiques sur la gestion de systèmes hydriques (Christensen *et al.*, 2004; Markoff et Cullen, 2008) concluaient qu'ils seraient moins performants en contexte de changements climatiques. Toutefois, ces conclusions risquent d'être pessimistes puisqu'elles sont basées sur une méthodologie qui n'incorpore pas les règles de gestion adaptées aux régimes hydrologiques en contexte de changements climatiques. En effet, les travaux publiés ont eu recours, pour les simulations des opérations du système hydrique, aux règles de gestion actuelles combinées à des régimes hydrologiques potentiels futurs. Ces travaux ne reflètent pas la réalité, car en pratique, les règles de gestion sont rafraîchies avec les données observées de l'année précédente.

Dans le même ordre d'idées, d'autres études avaient analysé la sensibilité des règles de gestion des réservoirs (Payne *et al.*, 2004; VanRheenen *et al.*, 2004). Ces travaux démontraient qu'il était possible d'améliorer des indicateurs de gestion en modifiant, toutefois de manière non optimisée, la gestion des systèmes hydriques. La démarche par analyse de sensibilité n'était cependant qu'un premier pas vers l'évaluation du potentiel d'adaptation.

À la lumière de ce qui précède, les travaux qui font l'objet de cette thèse complètent la démarche amorcée dans ces publications : le potentiel d'adaptation de la gestion d'un système hydrique est évalué en optimisant les règles d'opération selon des régimes

hydrologiques possibles futurs. Les travaux confirment les suppositions des recherches antérieures, qui avançaient que l'adaptation des règles de gestion d'un système hydrique à de nouveaux régimes hydrologiques améliorerait sa performance, par rapport aux simulations des apports futurs avec les règles de gestion actuelles.

En égard à ce qui précède, la principale innovation des travaux relève du volet adaptation de la gestion du système hydrique (*Voir* Minville *et al.* (2008d) et Minville *et al.* (2008e) en annexe 5 et 6). L'état de l'art en ce qui a trait aux opérations des systèmes hydriques en contexte des changements climatiques se limite à l'évaluation des impacts sur les opérations avec les règles de gestion actuelles, ou tout au plus à une analyse de sensibilité de ces règles avec des régimes hydrologiques. Les travaux de cette thèse mettent donc en lumière le comportement du système hydrique adapté à des régimes hydrologiques potentiels futurs.

Il s'agit d'une première étude qui s'intéresse à l'adaptation de la gestion d'un système hydrique. Elle incorpore toutes les étapes préalables, de la production de scénarios hydrologiques à l'optimisation des opérations d'un système hydrique, en passant par la modélisation des régimes hydrologiques.

En outre, le recours à un modèle d'optimisation qui tient compte de l'incertitude des apports, de par la composante stochastique, est aussi une innovation pour une étude d'impacts des changements climatiques. Bien qu'il soit démontré que la performance d'un système hydrique s'accroît avec une règle stochastique (Karamouz *et al.*, 2005), la gestion actuelle des systèmes hydriques est généralement effectuée avec des règles déterministes.

Globalement, une contribution des travaux réside aussi en l'intégration des approches multiscénario climatiques (Prudhomme *et al.*, 2003) et multimodèle hydrologiques (Georgakakos *et al.*, 2004). Cette démarche permet de générer un large éventail de projections climatiques et de régimes hydrologiques afin d'apprécier l'incertitude des projections sur la réponse hydrologique. De nombreux scénarios hydrologiques ont servi à évaluer le potentiel d'adaptation de la gestion du système hydrique, pour ainsi générer une gamme de comportements potentiels du système hydrique en contexte de changements climatiques.

De plus, l'incertitude du modèle hydrologique et de la projection climatique a été investiguée afin de faire ressortir le signal conféré aux régimes hydrologiques par ces modèles et projections (*Voir* Minville *et al.* (2008b) à l'annexe 3). Avant cette analyse, il était avancé que la projection climatique avait davantage d'impacts sur les débits simulés (Dibike et Coulibaly, 2005; Prudhomme *et al.*, 2002; Prudhomme *et al.*, 2003). Les travaux confirment partiellement cette conclusion, mais démontrent toutefois que le modèle hydrologique confère une part d'incertitude aux régimes hydrologiques, notamment lorsque les paramètres calibrés conceptuels ne sont pas transposables à d'autres projections climatiques. Il avait été remarqué que les différences de variabilité dans les données climatiques issues de la réduction d'échelle dynamique, par rapport aux observations (ou les deltas), faisaient en sorte que les paramètres calibrés du modèle limitaient la modélisation de l'évapotranspiration réelle.

Plus particulièrement, un autre aspect innovateur et qui répondait directement à une recommandation du GIEC (Kundzewicz *et al.*, 2007) est la considération de la variabilité naturelle du climat pour une étude d'impacts. L'utilisation d'un générateur de climat pour induire de la variabilité naturelle à des scénarios de changements climatiques avait été expérimentée par Mareuil *et al.* (2007) pour des analyses fréquentielles. La méthode a été reprise pour une étude d'impacts et d'adaptation de gestion d'un système hydrique avec de nombreuses projections climatiques (*Voir* Minville *et al.* (2008a) à l'annexe 2).

Une autre innovation du projet repose sur la proposition d'une approche pour générer des règles d'opération applicables à un climat en évolution. Actuellement, les règles d'opération des réservoirs sont générées en les actualisant chaque année avec l'historique entier des débits. La ressource en eau est donc gérée en supposant que les statistiques des événements historiques sont un bon estimé des probabilités des événements futurs (Salathé *et al.*, 2007). Cette procédure suppose que les débits de l'historique sont stationnaires. Or, certaines projections climatiques sont produites selon des simulations transitoires, ce qui ne correspond pas à l'approche actuelle pour la gestion de l'eau. La méthodologie développée propose d'étudier les séries d'apports hydrologiques afin d'estimer la durée pour laquelle les débits sont stationnaires. Ainsi, chaque année, les règles de gestion sont actualisées en ne

conservant les débits que sur la durée où ils sont stationnaires, c'est-à-dire 35 ans, au détriment de l'historique complet.

Pour faire suite à la contribution précédente et introduire la section suivante portant sur les recommandations, il est avancé que les règles de gestion auraient pu aussi être fabriquées, pour une année donnée, en utilisant les 17 ans d'apports observées précédentes et les 17 ans d'apports potentiels futurs résultant d'une projection climatique. Il s'agirait d'une autre façon de tenir compte de la durée de 35 ans sur laquelle les apports sont stationnaires. La gestion étant basée sur la maximisation du profit dans le futur, cette technique utiliserait le plein potentiel du modèle de gestion dynamique et stochastique. Il s'agirait d'une adaptation préventive, par rapport à celle suggérée dans les travaux qui est réactive.

5.2 Recommandations, limitations et pistes de recherche

Les recommandations pour la suite des travaux sont formulées en mettant en parallèle les limites de l'étude. Elles ont trait aux différentes sources d'incertitude qui jalonnent une étude d'impacts et d'adaptation aux changements climatiques de la gestion de systèmes hydriques. Aussi, les changements de variabilité climatique que laissent entrevoir les travaux mènent à des recommandations, spécifiquement à propos de l'adaptation de la gestion de systèmes hydriques.

Avant d'aborder les recommandations sur ces sujets, des recommandations d'ordre général sur la gestion de systèmes hydriques en contexte de changements climatiques sont formulées.

5.2.1 Gestion de systèmes hydriques en contexte de changements climatiques

Les travaux antérieurs à cette recherche (Christensen *et al.*, 2004; Markoff et Cullen, 2008; Payne *et al.*, 2004; VanRheenen *et al.*, 2004), qui s'intéressaient aux impacts des changements climatiques sur la gestion de systèmes hydriques, concluaient que la performance de gestion diminuait en contexte de changements climatiques. Leur démarche n'incluait pas d'adaptation de la gestion. Suite aux conclusions de la recherche, il est recommandé d'évaluer les impacts des changements climatiques sur la gestion des systèmes hydriques en adaptant systématiquement les règles de gestion. Une méthodologie qui ne tient pas compte de l'adaptation entraîne des conclusions pessimistes. Pour le cas spécifique de la

rivière Péribonka, la gestion sans adaptation mène à une tendance claire vers la diminution de la production hydroélectrique. À l'opposé, une hausse marquée de la production hydroélectrique est simulée avec les règles de gestion adaptées, conséquemment à l'augmentation annuelle des apports hydrologiques aux réservoirs.

Cette recommandation mène donc à la recommandation ultime, c'est-à-dire qu'il sera nécessaire d'adapter la gestion des systèmes hydriques aux changements climatiques. En effet, les simulations ont démontré que les effets potentiellement négatifs dus aux baisses d'hydraulicité des changements climatiques à certaines saisons étaient atténués avec l'adaptation de la gestion, et que les effets positifs résultant des hausses des débits à d'autres saisons étaient capitalisés.

Les autres recommandations concernent la capacité des évacuateurs de crues et les contraintes de gestion. Les simulations en contexte de changements climatiques, avec les règles de gestions adaptées, ont mené à des dépassements de niveaux qui ont compromis la fiabilité et accru la vulnérabilité du système hydrique. En revanche, les simulations des opérations ne menaient à aucun dépassement de niveaux d'exploitation à la période de référence. Ces résultats montrent que des études devraient être menées pour justifier ou non la pertinence de hausser la capacité hydraulique des ouvrages d'évacuation.

Outre cette proposition, il pourrait aussi être envisagé de réaliser des simulations en modifiant les contraintes d'exploitation, afin d'éliminer les dépassements de niveaux qui pourraient mener à des bris de digues ou équipements. Il est suggéré de modifier les contraintes à l'échelle saisonnière, par exemple en abaissant les cotes d'exploitation au printemps.

Aussi, il est recommandé d'effectuer des études sur les avantages à tirer de changements structuraux aux centrales hydroélectriques, notamment l'augmentation de la capacité installée, afin de récupérer les débits qui sont autrement déversés. Toutefois, l'implantation à court terme de telles mesures n'est pas recommandée en raison de l'incertitude des résultats.

Dans une perspective plus générale, il est recommandé d'investiguer les conséquences de l'adaptation au-delà des règles de gestion. Notamment, l'adaptation des barrages, digues,

centrales et évacuateurs de recherche seraient des sujets de recherche complémentaires aux travaux.

5.2.2 Sources d'incertitude

Une source d'incertitude des travaux dérive des projections climatiques. Les MRC fournissent des projections climatiques à l'échelle d'un bassin versant à fine résolution. Cependant, ces projections ne sont pas largement distribuées, car elles sont en développement. Il est recommandé d'avoir recours à plusieurs projections climatiques de MRC dès qu'elles seront accessibles. En attendant, les études d'impacts devraient être réalisées en incorporant l'ensemble des projections climatiques disponibles selon des méthodes de réduction plus simples comme les deltas. Fronzek et Carter (2007) parviennent à la même conclusion. Dans leur étude, la gamme des impacts potentiels des MRC est comprise dans les impacts des MCG combinés à la méthode des deltas. Ils recommandent aussi d'utiliser la méthode des deltas afin de balayer l'ensemble des impacts potentiels des changements climatiques.

Une seconde source d'incertitude provient du modèle hydrologique utilisé. Minville *et al.* (2008b) à l'annexe 3 ont relevé que les modèles hydrologiques conceptuel global et distribué à base physique se comportaient différemment en été en contexte de changements climatiques. Le modèle conceptuel global simulait des débits similaires avec des projections climatiques différentes, alors que les débits en été avec le modèle distribué à base physique différaient largement selon la projection climatique. Il a été démontré que les paramètres calibrés du modèle global limitaient le processus d'évapotranspiration réelle, lorsqu'utilisé avec une projection climatique de variabilité différente que celles des observations ayant servis à étalonner le modèle. Ces résultats mènent à la recommandation d'analyser les états des modèles hydrologiques conceptuels globaux résultants de simulations en contexte de changements climatiques afin de déceler des comportements qui ne survenaient pas avec les observations climatiques ayant permis d'étalonner. Cette opération permettrait de déceler les limites du modèle et d'éviter de mauvaises utilisations qui conduiraient à des conclusions possiblement erronées quant aux régimes hydrologiques potentiels futurs. Une autre

recommandation serait d'étalonner le modèle hydrologique directement avec les données du MRCC piloté par les réanalyses.

5.2.3 Changement dans la variabilité

Les changements dans la variabilité dans l'évaluation des impacts des changements climatiques peuvent affecter les niveaux de risque (Fronzek et Carter, 2007). La suite des recommandations fait référence aux changements de variabilité des différentes données hydroclimatiques et des indicateurs de gestion qui sont ressortis des travaux.

La première partie des travaux recourait à de multiples projections climatiques réalisées selon la méthode des deltas. Des séries climatiques synthétiques représentatives de ces projections ont par la suite été produites avec un générateur stochastique de climat. Cette opération permettait de tenir compte en partie de la variabilité naturelle du climat en générant des données climatiques ayant les mêmes propriétés statistiques que la série initiale.

À un autre point de vue, la méthode de deltas permet de perturber les moyennes des variables climatiques mensuelles observées. Toutefois, elle ne change pas les patrons de précipitations et les occurrences mensuelles. Une recommandation serait donc de recourir à une méthode comparable pour tenir compte des changements de variabilité temporelle, tel que présenté par Shabalova *et al.* (2003), qui incorpore l'anomalie de variance (en plus de la moyenne). Toutefois, les données journalières des MCG devraient être disponibles pour l'appliquer, ou du moins la variance journalière des données mensuelles ou saisonnières de la période de référence et des périodes futures.

Dans un autre ordre d'idées, il avait été constaté que les données du MRCC présentaient des biais par rapport aux observations à la période de référence. Après la correction des biais, les moyennes mensuelles des variables climatiques de chaque tuile du MRCC étaient exactement les mêmes que les moyennes des observations à la période de référence. Les différences entre les variances étaient néanmoins statistiquement significatives, ce qui a engendré des différences dans les hydrogrammes moyens annuels. Cette constatation mène donc à la recommandation d'investiguer davantage la variabilité des données climatiques dans les études d'impacts, en plus de l'habituelle considération des moyennes. La correction

systématique de biais mensuels négatifs importants du MRCC entraînait davantage de températures journalières élevées. Dans la région du bassin versant de la rivière Péribonka, cette particularité faisait en sorte que la crue printanière moyenne était devancée par rapport à la crue observée ou simulée avec la météorologie observée. De plus, une autre remarque est que le modèle HSAMI, étalonné avec les observations, limitait l'évapotranspiration réelle lorsqu'utilisé avec les données du MRCC. Le réservoir de la zone non saturée, dont la capacité est un paramètre de calage, était toujours plein en été et en automne. Ce comportement était remarqué aussi à la période de contrôle, malgré le fait que les données du MRCC étaient corrigées du biais et qu'elles avaient les mêmes moyennes mensuelles que les observations. Le réservoir de la zone non saturée dans les simulations avec les deltas à la période de contrôle et aux horizons futurs ne se comportait pas de cette manière. Les deltas ont été produits avec les observations et ils ont hérité de la même variabilité. Il est donc avancé que les paramètres calibrés ne sont pas nécessairement transposables pour des simulations avec des données climatiques qui ont une variabilité différente que les données climatiques ayant servi d'étalonner le modèle. Toutes simulations qui rencontrent ces conditions devraient être analysées avec soin afin de détecter des comportements du modèle susceptibles d'abaisser la confiance dans les résultats. Dans un autre ordre d'idées, il est recommandé de vérifier si le biais remarqué dans les données du MRCC résulte du pilote (CGCM3 A2) ou du modèle. Cette vérification pourrait être effectuée en comparant les données climatiques du MRCC pilotées avec les réanalyses.

Finalement, dans un tout autre registre, les changements de variabilité aux différentes phases d'une étude d'impacts et d'adaptation devraient être analysés de plus près. Par exemple, il a été démontré que les déversements moyens annuels augmentaient notamment en été-automne malgré la baisse des apports moyens projetés par certaines projections climatiques à cette saison. Conséquemment à ces résultats, il est recommandé d'analyser davantage les changements de variabilité saisonniers des variables hydroclimatiques et les répercussions sur les indicateurs de gestion. Les changements de variabilité dans les apports saisonniers aux réservoirs pourraient être analysés afin de voir dans quelle mesure une plus grande variabilité interannuelle mènerait les gestionnaires à maintenir les réservoirs plus bas par prévention, en acceptant le risque de connaître des saisons de plus faible hydraulicité.

CONCLUSIONS

Les travaux de cette thèse avaient essentiellement pour but d'évaluer le potentiel d'adaptation aux changements climatiques, en contexte d'incertitudes, de la gestion des opérations d'un système hydrique exploité pour la production hydroélectrique. L'étude, novatrice dans le domaine de l'adaptation de la gestion de la ressource en eau, a été complétée pour la rivière Péribonka (Québec, Canada).

La méthodologie consistait à évaluer les impacts possibles des changements climatiques sur la gestion du système hydrique en ne modifiant pas la gestion actuelle et en recourant à plusieurs projections climatiques. Le potentiel d'adaptation aux changements climatiques de la gestion du système hydrique de la rivière Péribonka, sur la période 2010-2099, a par la suite été investigué en modifiant les règles de gestion des réservoirs avec un modèle d'optimisation dynamique et stochastique. Les régimes hydrologiques en contexte de changements climatiques, utilisés comme intrants, ont été simulés selon deux approches : (i) modélisation hydrologique globale et projections climatiques produites avec la méthode des deltas, et (ii) modélisation hydrologique distribuée à base physique et projection climatique d'un modèle régional de climat (MRC). En parallèle, des simulations croisées avec la modélisation hydrologique globale et la projection climatique d'un MRC, ainsi qu'un modèle hydrologique distribué et une projection climatique produite avec les deltas, ont été complétées. L'intérêt était de détecter si les différences entre les régimes hydrologiques potentiels futurs étaient attribuables aux différentes projections climatiques ou aux modèles hydrologiques.

Les régimes hydrologiques futurs influenceraient le potentiel d'adaptation aux changements climatiques de la gestion d'un système hydrique. Ces régimes hydrologiques sont simulés selon une série d'étapes préalables qui contribuent à amplifier leur incertitude. Ils résultent des projections de changements climatiques, c'est-à-dire les variables climatiques mensuelles potentielles, telles les températures et les précipitations. Le climat du futur est inconnu, mais les modèles de circulation générale, perturbés avec des scénarios d'émission de GES, permettent de le projeter. Les différents modèles climatiques et scénarios d'émissions de

GES fournissent ces projections climatiques. De nombreuses incertitudes subsistent, notamment dans la simulation du système climatique et la réelle évolution des émissions des GES. La recherche présentée a recouru à une vaste gamme de projections climatiques, selon cinq modèles de circulation générale et deux scénarios d'évolution de GES.

Aussi, les données climatiques de faibles résolutions ne pouvant être utilisées à l'échelle d'un bassin versant, elles doivent être ajustées avec des techniques de réduction d'échelle. Dans ce sens, les travaux ont été réalisés selon deux approches de réduction d'échelle : la méthode des deltas et un MRC. Enfin, une autre source d'incertitude transmise aux apports provient du modèle hydrologique et de sa représentation spatiale des caractéristiques du bassin versant, de la météorologie et des processus modélisés. Les projections climatiques ont donc été introduites dans deux modèles hydrologiques, l'un conceptuel global, l'autre distribué à base physique.

L'incorporation de ces données et outils dans le cadre des travaux a mené aux conclusions suivantes, qui répondent à la problématique de recherche soulevée :

1. ***Un facteur majeur freinant la mise en place de mesures d'adaptation des règles d'opération des réservoirs est l'incertitude des changements climatiques et des modèles qui interviennent dans le processus.***

   L'incertitude transmise aux apports hydrologiques par les projections climatiques et les modèles hydrologiques a été analysée en effectuant des simulations croisées.

   Les travaux de recherche montrent qu'il y a des restrictions quant à l'utilisation du modèle conceptuel global, étalonné avec les observations, pour des simulations avec les données du MRCC. L'analyse des états du modèle indique que les paramètres calibrés ne seraient pas transposables à ces données.

   Le choix de combinaisons de modèles hydrologiques et de projections climatiques s'avère crucial sur les résultats. La liaison d'un modèle hydrologique à une projection climatique devrait toujours être réalisée en prenant soin d'évaluer leur compatibilité et leur comportement en contexte différent de celui où le modèle hydrologique a été calibré.

2. ***L'adaptation de la gestion du système hydrique de la rivière Péribonka atténuerait les effets négatifs des fluctuations du climat.***

La simulation des opérations du système hydrique, avec les règles de gestion actuelles, résulte en une baisse de production hydroélectrique sous la majorité des projections climatiques. Or, l'adaptation des règles de gestion aux régimes hydrologiques potentiels futurs mène à des résultats opposés, c'est-à-dire que la production hydroélectrique augmente pour la plupart des projections climatiques.

Les travaux antérieurs à cette recherche (Christensen *et al.*, 2004; Markoff et Cullen, 2008; Payne *et al.*, 2004; VanRheenen *et al.*, 2004), qui s'intéressaient aux impacts des changements climatiques sur la gestion de systèmes hydriques, concluaient que la performance de gestion diminuait en contexte de changements climatiques. Leur démarche n'incluait pas d'adaptation de la gestion.

Les travaux de la thèse montrent que la performance du système hydrique de la rivière Péribonka diminue aussi en contexte de changements climatiques avec les règles de gestion actuelle. Cependant, les simulations du système hydrique avec les règles de gestion adaptées aux régimes hydrologiques potentiels futurs montrent plutôt que la performance du système hydrique augmente.

Les résultats de cette recherche démontrent donc la nécessité de tenir compte de l'adaptation des règles de gestion des systèmes hydriques, afin d'offrir un portrait juste des impacts potentiels.

D'un autre côté, il est important de soulever qu'un effet négatif des changements climatiques n'est pas éradiqué avec l'adaptation de la gestion dans le cadre de la recherche : la baisse de fiabilité et l'accroissement de la vulnérabilité de réservoirs. D'une part, les simulations des opérations des réservoirs avec les données climatiques de la période de référence ne provoquaient pas de dépassement des niveaux d'exploitation. D'autre part, des dépassements sont simulés en contexte de changements climatiques. L'adaptation de la gestion n'est donc pas complète pour contrer les fluctuations du climat. Il a donc été recommandé d'ajuster les contraintes d'exploitation ou d'évaluer la

pertinence d'augmenter la capacité des évacuateurs. Des analyses de faisabilité seraient alors nécessaires afin d'évaluer le coût des mesures par rapport aux gains potentiels.

3. ***La performance du système hydrique de la rivière Péribonka pourrait s'accroître dans le futur, par rapport à la période de référence.***

   L'adaptation de la gestion se manifeste par des modifications saisonnières dans les niveaux des réservoirs. Ils sont maintenus plus hauts l'été et l'automne, pour contrecarrer les baisses des débits, et plus bas en hiver, pour composer avec les hausses des débits. Au printemps, les niveaux sont abaissés plus tôt pour contenir la crue printanière précoce.

   Les simulations démontrent que les installations en place pourraient être optimisées pour produire davantage d'hydroélectricité en contexte de changements climatiques. Une seule projection climatique, à l'horizon 2020, proposait une baisse de production. Néanmoins, les analyses exposent le clivage entre les centrales au fil de l'eau et la centrale à réservoir. La tendance est plutôt à la diminution de la production hydroélectrique pour les centrales au fil de l'eau à l'horizon 2020 avec Hydrotel-MRCC, et à l'augmentation par la suite jusqu'à la limite temporelle de l'étude. D'un autre côté, la production augmente à chaque horizon à la centrale à réservoir. La raison invoquée pour expliquer cette différence est que les apports estivaux-automnaux diminuent considérablement aux centrales au fil de l'eau, en raison de leur position géographique plus au sud, donc exposées à une température plus chaude. Du reste, la centrale à réservoir, plus au nord, ne subit aucune diminution dans les apports à l'été-automne jusqu'en 2099.

4. ***Les changements dans la production hydroélectrique en contexte de changements climatiques sont incertains.***

   Malgré la tendance généralisée à l'augmentation de la production hydroélectrique, l'amplitude du changement demeure incertaine.

   La production moyenne annuelle varie entre -2 % et +22 % selon l'approche utilisée et la période future considérée. De plus, les changements dans la saisonnalité des apports mènent à un décalage dans la pointe de production hydroélectrique saisonnière, la

déplaçant de l'été-automne à la période de référence et à l'horizon 2020, à l'hiver à l'horizon 2080.

5. ***Les changements dans la variabilité du climat se transmettraient à la variabilité des débits, qui pourraient se répercuter sur les déversements non productibles.***

   Il a été démontré que les diminutions des apports aux réservoirs à la saison été-automne n'engendraient pas un changement dans le même sens pour les déversements non productibles. En fait, la plus grande variabilité interannuelle des débits à cette saison fait en sorte que les règles de gestion suggèrent de déverser. Cela contribue aux baisses de production hydroélectrique anticipées avec certaines projections climatiques. Les changements de variabilité sont donc à considérer pleinement dans les études d'adaptation de gestion de systèmes hydriques aux changements climatiques.

Globalement, ces conclusions mènent à la constatation que la gestion du système hydrique de la rivière Péribonka est influencé par les changements climatiques. En raison des nombreuses sources d'incertitude, les travaux ne suggèrent pas de mettre en place des mesures d'adaptation concrètes à court terme. Cependant, les grandes tendances soulevées pourraient indiquer aux gestionnaires les tangentes à envisager pour l'adaptation de la gestion.

L'inertie des grandes organisations œuvrant dans le domaine de la gestion des ressources hydriques, où l'adaptation est réactive plutôt que préventive, sera sans doute un frein au déploiement de mesures d'adaptation. La présente recherche démontre que les exploitants pourraient tirer avantage des changements climatiques. Ils doivent néanmoins poursuivre les recherches sur le discernement de l'évolution du régime hydrologique des dernières décennies et sur les divers outils et méthodes qui interviennent dans les études d'impacts.

La démonstration des résultats aux exploitants de systèmes hydriques, même s'ils ne sont pas concrètement transposables à court terme, stimulerait une conscientisation afin d'amorcer une ouverture pour revoir les habitudes de gestion.

ANNEXE I

Article 1: Minville (2007)

Cet article a été publié en mars 2007 dans la revue Vecteur environnement.

Minville, Marie. (2007). Changements climatiques: Les atténuer ou s'y adapter? Points de vue économique, environnemental et équitable. Vecteur environnement, 40(2), 60-68.


ARTICLE SCIENTIFIQUE
CHANGEMENTS CLIMATIQUES :
LES ATTÉNUER OU S'Y ADAPTER ?
Points de vue économique, environnemental et équitable
CLIMATE CHANGE:
MITIGATE OR ADAPT?
An economic, environmental and equitable points of view
Marie Minville, ing. jr.
Département de génie de la construction de l'École de technologie supérieure

RÉSUMÉ

La problématique consiste à infirmer, ou cautionner, le courant de pensée stipulant qu'il est préférable, économiquement parlant, de focaliser sur l'adaptation aux changements climatiques plutôt que sur la réduction des gaz à effet de serre (GES). À première vue, le calcul paraît simple. Le coût des changements climatiques est la somme des montants alloués à l'atténuation des GES et des mesures d'adaptation, majorée des impacts non évités. Si l'atténuation est exclusivement privilégiée au détriment de l'adaptation (ou vice versa), l'action la plus profitable économiquement est celle dont le coût, en plus de ceux occasionnés par les impacts non évités, est le plus faible. Partant de ce fait, l'équation est étudiée globalement, sous la considération que la décision finale a une portée planétaire.

La question est d'abord envisagée au point de vue économique. Une revue bibliographique mène au constat qu'il n'est pas possible de déterminer clairement une action à privilégier en raison des incertitudes et limites qui empêchent de comparer les coûts. Les incertitudes portent principalement sur l'ampleur des changements climatiques anticipés, et les limites, sur les échelles spatiales et temporelles divergentes des approches. Du reste, les recherches récentes proposent qu'une juste dose des deux mesures serait vraisemblablement plus rentable.

Devant la difficulté de répondre à la problématique, la question est envisagée d'un point de vue environnemental et équitable. Selon les principes d'équité et de développement durable, la problématique est un non-sens, c'est-à-dire que trancher en faveur d'une stratégie d'intervention n'est pas une option : l'atténuation et l'adaptation doivent être complémentaires.

Mots-clés : Changements climatiques, Atténuation des gaz à effet de serre, Adaptation, Analyse économique

ABSTRACT

The problem is to refute or support the current thinking that it is preferable, economically speaking, to focus on adaptation to climate change rather than on reduction of green house gases (GHG). At first glance, the calculation appears simple. Climate change cost is the sum of the amounts allocated for the attenuation of GHG and adaptation, in addition to the impacts that cannot be avoided. If either mitigation or adaptation is privileged exclusively, then the most advantageous economic action is that which is less expensive, including the unavoidable impacts from each alternative. On this basis, the equation is studied overall, with the consideration that the final decision will have a planetary effect.

The question is initially considered in terms of economics. A literature review shows that it is not possible to clearly privilege one action because there are uncertainties and limits that arise from cost comparison. Uncertainties relate mainly to the effects of anticipated climate change, and the limits of the divergent temporal and regional scales of the measures. However, recent research suggests that a combination of both strategies would probably be more cost effective.

The question is also considered from an equitable and an environmental point of view. It is demonstrated that according to the principles of equity and sustainable development, questioning is nonsense. Choosing one strategy of intervention is not an option: attenuation and adaptation must be complementary.

Keywords : Climate change, Mitigation, Adaptation, Economic analysis

1. Introduction

Il existe un courant de pensée qui affirme que le coût d'adaptation aux changements climatiques serait possiblement inférieur au coût de réduction des émissions des gaz à effet de serre (GES) (Reay, 2002). Il serait donc, d'un point de vue économique, plus avantageux de mettre l'accent sur l'adaptation plutôt que sur la réduction des émissions des GES. Avant le rapport de Stern (2006), publié au moment d'effectuer les dernières révisions de cet article, les études consacrées à l'analyse de cette question étaient rares et incomplètes.

En principe, le coût des changements climatiques est la somme des montants alloués aux stratégies de réduction des émissions de GES et des mesures d'adaptation, à laquelle s'ajoutent les coûts des impacts non évités (Stern, 2006 ; Wrang *et al.*, 2005). Dans le cas où la réduction des GES est strictement privilégiée au détriment de l'adaptation (ou vice versa), la mesure la plus avantageuse économiquement est celle dont le coût d'implantation (en plus des dommages non évités) est minimisé. Il est alors possible de démentir (ou d'appuyer) le courant de pensée stipulant qu'il serait plus avantageux de s'adapter aux changements climatiques plutôt que d'atténuer les GES.

Dans le cadre d'une réflexion similaire, Tol (2005a) s'est penché sur la question suivante : « Est-ce qu'un dollar dédié à réduire les émissions de GES diminue davantage les impacts des changements climatiques qu'un dollar consacré à l'adaptation ? ». Sa conclusion est que l'adaptation est difficilement comparable à la réduction des GES parce qu'elle est réalisée, entre autres, à des échelles spatiales qui diffèrent des actions d'atténuation.

À la lumière de cette réflexion, l'analyse économique ne peut être fondée que si la décision finale de s'adapter, au lieu d'atténuer, porte sur une facture globale. Cette balise se fonde sur le fait que la portée de

la réduction des GES est planétaire, c'est-à-dire que le choix d'injecter des fonds à l'atténuation plutôt qu'à l'adaptation peut générer des bénéfices pour l'ensemble de la planète. À l'opposé, le choix de s'adapter plutôt que de réduire les émissions de GES n'apporte que des bénéfices locaux. Il faudrait donc, pour répondre à la question initiale, comparer les coûts d'une stratégie de réduction des GES globale avec les coûts d'une stratégie d'adaptation globale, majorés de leurs impacts non évités respectifs.

L'évaluation du coût des changements climatiques a fait l'objet de recherches depuis les années 1990. Les rares études qui ont tenté de trancher catégoriquement sur la mesure préférable à adopter (atténuer ou adapter) pour diminuer les coûts des changements climatiques sont contradictoires. D'abord, Bosello (année de publication inconnue) a recouru à une approche empirique pour comparer les coûts d'atténuation et d'adaptation. Il a compilé les coûts rapportés dans les études, les a ramenés sur une base commune (pour un réchauffement climatique de 0,93 °C) avec des interpolations linéaires et il a établi des relations entre eux. Sa conclusion est que l'atténuation entraîne le moins de coûts d'impacts que l'adaptation : il statue qu'un milliard de dollars investi en adaptation peut réduire les impacts non évités de 0,03 %, tandis qu'un milliard de dollars investi en réduction des GES les réduits de 1 %. Ensuite, Golkany (2005a) a évalué les avantages à court terme et à moyen terme d'adapter (zones côtières, infrastructure, forêt et agriculture) plutôt que de stabiliser les GES d'un point de vue global. En se référant à des analyses économiques de diverses études, il affirme que jusqu'en 2085, il serait plus avantageux d'adapter. Il conclut que les prochaines décennies devraient être consacrées à développer des solutions économiquement efficaces pour réduire les GES et que ces nouvelles technologies devraient être implantées ultérieurement.

D'un autre point de vue, Wilbanks (2005) soutient que les actions d'atténuation et d'adaptation sont complémentaires pour diminuer les coûts des changements climatiques, que ce soit à l'échelle locale ou globale. Il juge que l'atténuation est essentielle pour que les impacts des changements climatiques soient le plus contrôlables possible, tout en assumant qu'ils ne peuvent être totalement évités. Il soutient que le développement d'un cadre analytique pour intégrer l'atténuation et l'adaptation nécessitera beaucoup de temps, de recherches et de collaborations d'experts multidisciplinaires. Un ensemble d'interventions visant l'atténuation et l'adaptation pour réduire les coûts des changements climatiques était une recommandation de la Convention-cadre (Nations Unies, 1992), du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 1997) et du protocole de Kyoto (Nations Unies, 1998).

Une option qui est négligée dans les études économiques porte sur le coût des impacts en absence d'effort d'atténuation ou d'adaptation, c'est-à-dire lorsque le coût des changements climatiques ne tient qu'à une composante : les impacts non évités. Sous toute réserve, une telle analyse globale n'avait pas fait l'objet de publication avant le rapport de Stern (2006).

Ces positions étant opposées, l'article débute avec une analyse de la problématique au point de vue économique, c'est-à-dire avec les études qui se sont attardées aux composantes du coût des changements climatiques. De plus, outre la considération du point de vue économique, le choix d'adapter plutôt qu'atténuer engendre un questionnement plus fondamental. En considérant que les concentrations des GES sont uniformément réparties dans l'atmosphère, tous les pays sont également concernés par les émissions des autres pays (Meunier, 2005). Il est donc justifié de poursuivre, en seconde partie, la réflexion selon un point de vue environnemental et équitable. Enfin, des conclusions sont tirées au regard de l'analyse des différents points de vue.

2. Atténuer ou adapter ? Un point de vue économique

La problématique peut être envisagée d'un point de vue strictement économique. Dans ce sens, le coût des composantes des changements climatiques est analysé et les incertitudes et limitations sont mises en perspective.

2.1 Composantes du coût des changements climatiques

Les coûts totaux ont été relatés en introduction. Toutefois, les conclusions contradictoires nous poussent à examiner les études qui se sont penchées sur les composantes individuelles du coût des changements climatiques, c'est-à-dire les coûts d'atténuation et d'adaptation, afin d'en tirer une conclusion.

2.1.1 Coût de réduction des GES

Les coûts d'atténuation représentent la valeur des ressources que la société abandonnent pour atténuer les GES par rapport au fait de ne pas les atténuer (Collaway *et al.*, 1998). Ils dépendent de plusieurs facteurs, tels les niveaux de stabilisation à atteindre, les émissions de référence (habituellement celui de 1990), du scénario de changements climatiques employé et du délai d'intervention. Ils sont décrits en dollars pour une concentration de GES visée, en pourcentage du produit intérieur brut (PIB) futur ou en coût moyen ou marginal par tonne de GES atténuée. L'expression du coût sous cette dernière unité est recommandée par la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (Collaway *et al.*, 1998). Il y a plusieurs catégories de modèles économiques qui permettent d'évaluer les coûts liés aux changements climatiques. Il s'agit de modèles entrées-sorties, macroéconomiques, d'équilibre général et hybrides (le lecteur est référé aux chapitres 7 et 8 du rapport du GIEC (2001a) pour le détail de ces modèles). Ils sont composés d'un

ensemble d'équations qui simulent et/ou optimisent l'économie (Bosetti *et al.*, 2006).

Pour ce qui est des coûts de réduction des GES estimés à partir de ces différents modèles, le GIEC rapportait en 1995 qu'il en coûterait entre 0,5 % à 2 % du PIB pour stabiliser les GES au niveau de 1990, soit entre 60 et 240 milliards de dollars pour les pays de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). Plus récemment, Stern (2006) soulevait que le coût de réduction des GES entre 500 à 550 parties par million (ppm) pourrait se limiter à 1 % du PIB. Dans le même ordre d'idées, Tol (2005b) a recueilli le coût marginal d'atténuation conclu par 28 études, pour un total d'une centaine d'estimés, et a présenté les résultats sous forme de densités de probabilités. Ces statistiques proposent une médiane des coûts de l'ordre de 14 dollars par tonne de GES évités, une moyenne de 93 dollars la tonne et un 95e percentile de 350 dollars la tonne. D'un autre côté, les coûts globaux de stabilisation des GES à 550 ppm, évalués par Leimbach et Toth (2003), sont de 800 milliards de dollars. Aux termes de ce qui précède, la figure 1 illustre les coûts estimés pour éviter certains seuils de concentrations des GES. Elle indique, entre autres, qu'il coûterait entre 75 et 800 milliards de dollars pour empêcher que les concentrations de GES outrepassent 550 ppm en 2100. À titre indicatif, les concentrations de GES (CO_2) étaient de 270 ppm à l'ère préindustrielle et de 368 ppm en 2000 (GIEC, 2001b).

2.1.2 Coûts d'adaptation

Les coûts d'adaptation représentent la valeur des ressources que la société peut abandonner afin d'obtenir des bénéfices à s'adapter au climat par rapport au fait de ne pas s'adapter (Collaway *et al.*, 1998). Ils sont spécifiques à des secteurs, tels l'agriculture, la gestion de l'eau, les zones côtières, la santé, les forêts, la demande en énergie et les déplacements massifs de populations. De plus, ils sont locaux, car les besoins d'adaptation sont spécifiques à chaque région. Ils sont exprimés en dollars ou en % du PIB.

Ringius *et al.* (2002) rapportent que la plupart des modèles économiques d'adaptation ont été élaborés dans les années 90. Ces modèles (le lecteur est référé aux rapports de Ringius *et al.* (2002) et Stratus Consulting Inc. (2005) pour une description complète des modèles d'adaptation) évaluent les coûts d'adaptation (incluant le coût des impacts non évités) aux changements climatiques pour les secteurs cités précédemment. Plusieurs d'entre eux intègrent les fonctions qui permettent d'évaluer divers secteurs à la fois. De plus, certains simulent les coûts d'adaptation quasi globaux en désagrégeant en zones d'intervention une grande partie de la planète.

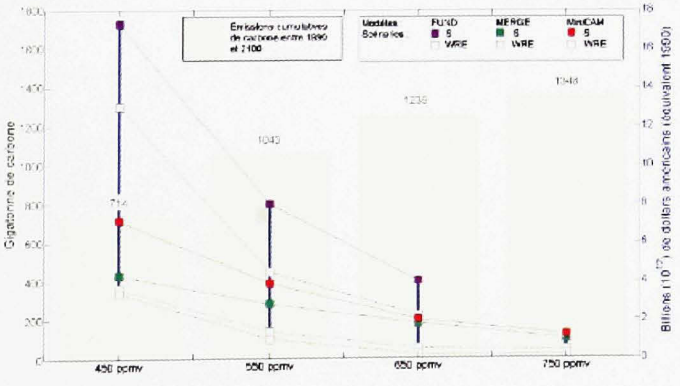
Pour sa part, Bosello (2004) a effectué une revue bibliographique et a compilé les coûts d'adaptation par secteur et par région. Il a synthétisé ces informations pour conclure que les coûts d'adaptation jusqu'en 2050 seraient de 292 milliards de dollars (0,15 % du PIB mondial) pour une augmentation des températures de 0,93 °C. Seuls les coûts d'adaptation relativement à des secteurs et à des régions limitées sont compris dans le montant avancé. Selon Pachauri et Taniguchi (1999), il y a eu peu de progrès réalisés quant à l'évaluation des coûts d'adaptation par rapport aux coûts d'atténuation des GES. Récemment, Watkiss *et al.* (2005) ont soulevé la même réflexion en effectuant une revue des travaux sur les coûts d'adaptation. Ils rapportent que peu d'attention est portée aux coûts d'adaptation et que les modèles ne font généralement aucune distinction entre les coûts d'adaptation et les impacts non évités. Ils recommandent, entre autres, qu'il y ait plus d'études sur les coûts d'implantation des mesures d'adaptation et sur leurs bénéfices. À ce sujet, Stern (2006) propose que le coût des dommages dus à l'inaction (impacts non évités) serait équivalent à une perte de 5 à 20 % du PIB mondial, suivant l'éventail de risques et de conséquences pris en compte.

2.2 Analyse de la revue bibliographique

La compilation des coûts des changements climatiques met en évidence le fait que les études publiées apportent des éléments de solutions partielles à l'équation du coût

Figure 1

Coût de stabilisation des émissions de GES (en CO_2 équivalent)
Adaptation d'un graphique tiré de GIEC (2001b)



des changements climatiques, notamment en ce qui a trait à l'adaptation. En résumé, les publications annoncent un coût global de réduction des émissions de GES compris entre 60 et 800 milliards de dollars et un coût d'adaptation aux changements climatiques de 292 milliards de dollars. De plus, deux publications résumées en introduction apportaient un élément de réponse formel à la problématique. Cependant, leur bilan respectif était contradictoire : Bosello (année de publication inconnue) affirmait que l'atténuation est moins coûteuse, tandis que Golkany (2005a) défendait plutôt l'idée que l'adaptation entraînerait moins de coûts. À la lumière de ces informations, il n'est pas possible de tirer une conclusion franche quant à l'avantage économique de s'adapter aux changements climatiques plutôt que d'atténuer les émissions de GES, car certaines incertitudes et limites empêchent de parvenir à une conclusion.

2.2.1 Incertitudes

Les incertitudes constituent le cœur du problème dans l'évaluation des coûts d'atténuation et d'adaptation (Collaway *et al.*, 1998). Elles émanent des scénarios de changements climatiques, des hypothèses sous-jacentes aux contextes technologiques et économiques futurs et des problèmes méthodologiques liés à l'évaluation.

2.2.1.1 Changements climatiques

L'évolution réelle du climat est incertaine et les scénarios d'évolution de GES sont nombreux. Or, une même étude économique réfère rarement à différents scénarios climatiques afin de balayer une plage d'incertitude de l'évolution du climat sur les coûts. De plus, peu d'études spécifient le scénario de changements climatiques utilisé, ce qui rend encore plus difficiles les intercomparaisons. Dans les cas où les scénarios sont spécifiés, ils sont la plupart du temps pour un climat stationnaire. L'imprécision de ces scénarios est transmise aux coûts, les scénarios à l'équilibre n'étant pas réalistes (Tol *et al.*, 1998).

2.2.1.2 Contextes futurs

L'économie mondiale dépend des technologies et des contextes économiques régionaux. Une hypothèse dans les modèles économiques est que la technologie et les économies sont stationnaires, c'est-à-dire qu'elles n'évoluent pas dans le temps. Or, ces contextes progressent rapidement. En considérant qu'un modèle peut simuler l'économie sur une période d'environ 50 ans, cette hypothèse induit nécessairement de l'incertitude aux coûts. À ce propos, Stern (2006) soutient que les études économiques n'établissent pas de lien clair entre les coûts des changements climatiques et l'évolution des technologies. Par exemple, des technologies à faibles émissions de GES pourraient être implantées dans le futur et les modèles ne les considéreraient pas explicitement.

2.2.2 Limites

Les limitations sont les causes pour lesquelles les coûts prévus sont difficilement comparables.

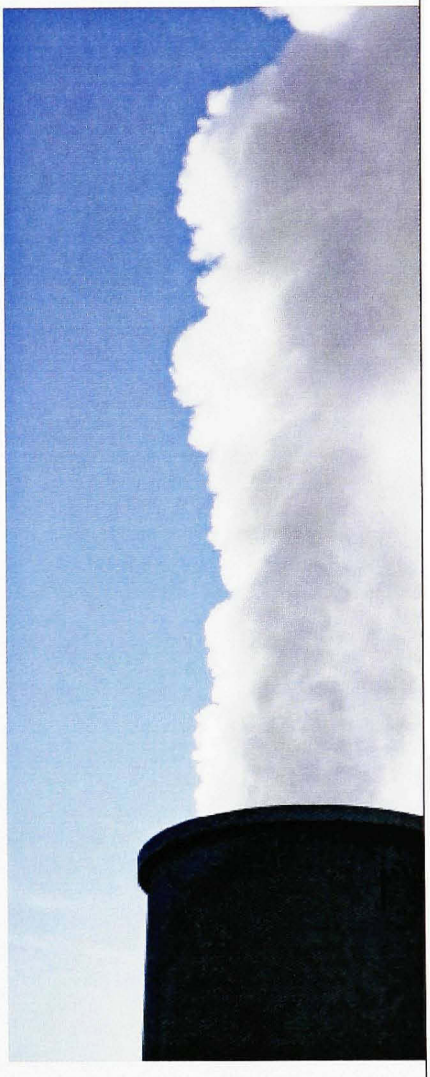
2.2.2.1 Modèles économiques

Selon Collaway *et al.* (1998), une limitation à l'évaluation des coûts des changements climatiques découle de la structure interne des modèles économiques. Environnement Canada (2002) exprime que peu importe le modèle économique utilisé, il existe de grands écarts entre les hypothèses et la façon réelle dont fonctionne l'économie. Malgré le fait que les modèles fournissent un aperçu de l'économie dans un contexte de changements climatiques, les répercussions prédites sont incomplètes. Un exemple de mauvaise évaluation des coûts qu'Environnement Canada (2002) remémore est celui du programme américain contre les pluies acides. En effet, les estimations économiques étaient initialement de 4 à 10 fois supérieures aux coûts réellement encourus.

2.2.2.2 Échelle temporelle divergente

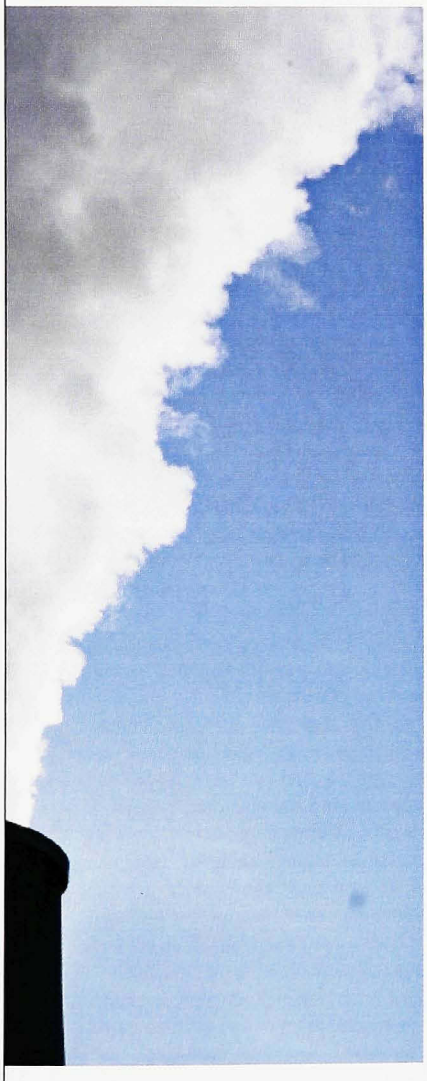
Les échelles temporelles divergentes dans les études empêchent l'intercomparaison des coûts de réduction et d'adaptation entre eux ainsi que des coûts de réduction par rapport aux coûts d'adaptation.

À cet égard, la comparaison des coûts de réduction des GES entre eux est laborieuse puisque certaines études présentent les coûts pour atteindre un niveau de concentration visé en 2012 (lorsque le protocole de Kyoto viendra à échéance), tandis



que d'autres dévoilent plutôt des coûts pour d'autres horizons, soit pour les années 2050, 2100 et même 2200.

Pour ce qui est de la comparaison des coûts d'atténuation et d'adaptation, Wilbanks *et al.* (2003) évoquent qu'ils ne peuvent fondamentalement se comparer en raison du délai de leurs effets, l'atténuation étant à long terme, alors que l'adaptation est à court et à moyen termes. Cette limitation fait notamment référence au taux d'escompte. En effet, l'application d'un taux d'escompte fait en sorte qu'une conséquence future a une plus petite valeur si elle est considérée aujourd'hui, c'est-à-dire si elle est ramenée à la valeur présente (Newell *et al.*, 2004). Il n'existe actuellement pas de consensus sur la valeur du taux d'escompte à utiliser dans les calculs du coût des changements climatiques pour favoriser les actions à prendre maintenant qui auraient de réels avantages économiques dans le futur.



2.2.2.3 Échelle spatiale divergente et niveaux d'intervention distincts

Tol (2005a) mentionne que les raisons pour lesquelles les stratégies d'adaptation ne peuvent être comparées économiquement à celles d'atténuation sont la divergence d'échelle spatiale et de niveaux d'intervention. En effet, l'atténuation est à la base une affaire gouvernementale dans un contexte de négociations internationales, l'adaptation étant plutôt d'intérêt pour les gestionnaires locaux et organisations privées dans un contexte d'économie régionale.

2.2.2.4 Avantages et coûts accessoires

Le GIEC (2001c) a soulevé que les politiques de réduction des GES peuvent avoir des conséquences indirectes (positives ou négatives) sur les coûts réels. En général, ces politiques sont évaluées en respect de leurs coûts et bénéfices. Toutefois, certains bénéfices ne sont pas considérés (Rübbelke, 2003) : par exemple, les recherches de van Vuuren *et al.* (2006) proposent que les coûts reliés au contrôle de la qualité de l'air en Europe pourraient diminuer de 20 à 30 %, et même plus si le protocole de Kyoto était respecté.

2.2.2.5 Effets combinés

Tol (2005a) soutient que l'adaptation aux changements climatiques et l'atténuation des GES sont des politiques qui peuvent se substituer puisqu'elles contribuent à réduire les impacts des changements climatiques. Toutefois, il précise qu'elles doivent être analysées de pair dans une analyse économique. Cette recommandation entraîne donc une complexité à l'analyse du coût, c'est-à-dire dans l'évaluation de la proportion des coûts d'adaptation qui serait diminuée s'il y avait réduction des GES. Wilbanks (2003) maintient que l'intégration des deux mesures dans une approche unique est complexe, car elle dépasse la compréhension conceptuelle ou empirique.

2.3 Discussion – Point de vue économique

Wrang et Busk (2005) soulèvent que l'évaluation du coût des changements climatiques paraît simple en théorie, mais qu'en pratique, c'est une tâche d'une très grande complexité. L'analyse de la revue bibliographique, des incertitudes et des limitations donnent une idée de la difficulté liée à l'évaluation du coût des changements climatiques.

Même si quelques études, soit dit en passant contradictoires, posent un verdict sur la stratégie à privilégier d'un point de vue économique, il est impossible, en analysant les publications, de porter un regard neuf sur la question et ainsi endosser l'une des mesures. En effet, les changements climatiques induisent beaucoup trop d'incertitudes et l'état actuel des connaissances ne permet pas de repousser les limites.

Les études économiques récentes proposent plutôt qu'une approche combinant l'adaptation et l'atténuation serait plus rentable, sans toutefois justifier la proposition monétairement, seulement qualitativement (à l'exception du rapport de Stern (2006)). Le jugement sur les coûts est capital puisqu'il est possible que les sommes injectées maintenant permettent d'éviter de débourser ultérieurement des montants beaucoup plus importants. Cependant, les tentatives de détermination de ces coûts mènent apparemment à un cul-de-sac.

Il est donc avancé que la seule considération du point de vue économique, pour

prendre la décision d'atténuer ou d'adapter, mène actuellement à une impasse. Et si le choix, s'il est légitime, ne devait pas reposer uniquement sur des arguments économiques ?

3. Atténuer ou adapter ? Un point de vue environnemental et équitable

Ce point de vue aborde dans un premier temps l'équité et dans un deuxième temps le développement durable. Un regard différent sur la problématique est posé et des principes à considérer en complémentarité aux analyses économiques sont suggérés.

3.1 Équité

« La considération des particularités des individus et des groupes pour les placer sur un pied d'égalité » (Office québécois de la langue française, 2003) est une interprétation du principe d'équité. En considérant que le climat est un « bien » commun, l'équité implique donc la nécessité d'attribuer à tous les humains le droit de profiter de ce bien (D'Ieteren *et al.*, 2004). Les concepts de droits historiques, d'égalité des chances et d'égalité économique et sociale sont issus d'autant de variantes de cette interprétation qui ne seront pas abordées. Au sens large, l'équité réfère notamment à l'égalité entre les régions et les générations.

3.1.1 Équité interrégionale

Les GES sont uniformément répartis dans l'atmosphère, car ils n'ont aucune frontière spatiale. Par contre, cette uniformité géographique n'est pas rencontrée en ce qui a trait aux émissions des GES, aux impacts des changements climatiques et à la disposition économique des régions à s'adapter. Alors que les principaux émetteurs sont les pays industrialisés, les régions en développement sont les plus vulnérables de par leur capacité financière limitée à s'adapter (Goklany, 2005a). De surcroît, il est jugé que ces pays ont atteint le seuil optimal de température rendant leur économie favorable, notamment pour leurs principales activités économiques, telles l'agriculture et le tourisme (GIEC, 2001d). Autrement dit, tout réchauffement climatique supplémentaire leur serait défavorable. Sur ce constat, il est jugé inopportun, sous le principe d'équité, de considérer seulement l'alternative « adaptation ». Cette remarque introduit la notion de responsabilité qui constitue sans doute la dimension de l'équité la plus importante (D'Ieteren *et al.*, 2004). Cette notion engagerait les pays responsables à contribuer financièrement à l'adaptation des pays en développement. Ce système d'idées qui motive l'action se fonde sur le concept du juste et de l'injuste et rejoint directement les considérations économiques évoquées précédemment. D'ailleurs, les analyses économiques du rapport de Stern (2006) prennent en compte les questions d'équité, c'est-à-dire que les écarts entre la capacité d'adaptation des pays en voie de développement par rapport aux pays développés sont comptabilisés pour tirer les conclusions.

3.1.2 Équité intergénérationnelle

Les horizons temporels en matière du climat s'étalent bien au-delà de la génération actuelle. Dans ce sens, la notion d'équité n'est pas seulement valide pour les contemporains. Sous le principe d'équité intergénérationnelle, la réduction des GES ne peut être exclue puisqu'elle diminue certains risques pour les générations futures. Ces risques sont par exemple des effets environnementaux à long terme pouvant être irréversibles, tels la disparition d'écosystèmes uniques. Dans ces situations, aucune stratégie d'adaptation ne pourrait résoudre le problème (GIEC, 2001b). Néanmoins, si les mesures d'adaptation sont nécessaires pour diminuer le risque sur les générations actuelles, elles ne peuvent être exclues.

De plus, en considérant que le temps de résidence des principaux GES dans l'atmosphère est de 12 à 200 ans (GIEC, 2001b) et que les changements climatiques actuels sont causés par les émissions cumulatives depuis le dernier siècle, il est naturel d'atténuer ou de maintenir les GES à un niveau de référence en toute connaissance de cause pour les générations futures.

Le changement climatique est une problématique à long terme. Le principe d'équité, lorsqu'il réfère aux droits des générations futures, introduit nécessairement la notion de développement durable.

3.2 Développement durable

Selon le rapport Brundtland (1987), le développement durable « est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs ». Par extension, une interprétation possible de cette définition serait que l'adaptation est une mesure à adopter pour répondre aux besoins du présent, tandis que l'atténuation des GES serait une action à prendre aujourd'hui pour le bien du futur. Dans ce sens, le GIEC (2001b) énonce que des stratégies d'atténuation et d'adaptation bien conçues peuvent encourager un développement durable. Ainsi, les risques dus aux changements climatiques pouvant aller à l'encontre du développement durable seraient des dommages causés par les extrêmes climatiques, les pénuries d'eau et les perturbations en agriculture. Golkany (2005b) insiste sur le fait que les changements climatiques entraveront le développement durable et que c'est par la mise en place de mesures d'atténuation qu'il y aura moins de perturbations.

Dans le sens du développement durable, l'application des mesures d'atténuation et d'adaptation « sans regret » est une approche à développer (McBean *et al.*, 2001). Ce genre de mesures préconise la mise en œuvre d'actions utiles qui auraient des impacts bénéfiques sur l'économie et l'environnement, et ce, même si les changements climatiques ne s'avéraient pas être de l'importance anticipée. Un exemple d'une telle mesure serait de limiter la cir-

culation automobile dans les villes (moins d'émissions de GES, mais aussi moins de bruit, d'accidents ou de perte de temps).

3.3 Discussion – Point de vue environnemental et équitable

Les éléments supplémentaires rapportés dans le point de vue environnemental et équitable remettent en cause le fondement de la problématique soulevée, insinuant qu'il y ait un choix à faire entre les deux solutions qui limitent les dommages des changements climatiques. Bref, devant les principes d'équité et de développement durable, la problématique est un non-sens, c'est-à-dire que trancher en faveur d'une stratégie d'intervention n'est pas une option et que l'atténuation et l'adaptation doivent être complémentaires.

La vision est donc que des mesures de réduction des GES doivent être entreprises pour le respect des générations futures et que l'adaptation aux changements climatiques doit être mise en place à l'échelle planétaire pour limiter les risques auxquels est soumise la génération actuelle.

Pour tout dire, les notions d'équité et de développement durable ne sont pas étrangères aux politiques internationales mises en place par la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. À cet effet, un des principes ayant guidé les négociations du protocole de Kyoto est :
« Il incombe aux Parties de prendre des mesures de précaution, pour prévoir, prévenir ou atténuer les causes des changements climatiques et en limiter les effets néfastes. Quand il y a risque de perturbations graves ou irréversibles, l'absence de certitude scientifique absolue ne doit pas servir de prétexte pour différer l'adoption de telles mesures, étant entendu que les politiques et mesures qu'appellent les changements climatiques requièrent un bon rapport coût-efficacité, de manière à garantir des avantages globaux au coût le plus bas possible. Pour atteindre ce but, il convient que ces politiques et mesures tiennent compte de la diversité des contextes socio-économiques, soient globales, s'étendent à toutes les sources et à tous les puits et réservoirs de gaz à effet de serre qu'il conviendra, comprennent des mesures d'adaptation et s'appliquent à tous les secteurs économiques » (Nations Unies, 1992).

4. Conclusions

Considérant le point de vue économique, à l'effet que les analyses de coûts ne peuvent prouver qu'il y aurait un avantage à s'adapter aux changements climatiques au détriment de réduire les émissions de GES, ainsi que le point de vue environnemental et équitable, c'est-à-dire que choisir exclusivement l'atténuation ou l'adaptation irait à l'encontre des principes d'équité et de développement durable, il va de soi que d'adopter une approche mixte atténuation-adaptation pour limiter les impacts des changements climatiques est à privilégier. D'ailleurs, des études récentes, notamment celle de Stern (2006), vont dans ce sens en alléguant que cette approche serait économiquement avantageuse.

De plus, les études de Meinshausen (2006) et Stern (2006), publiées au moment de faire les dernières corrections de cet article, amènent un élément nouveau à la réflexion, à savoir qu'analyser les alternatives (atténuer ou adapter) d'un point de vue exclusif n'est pertinent que lorsque l'augmentation des températures globales est inférieure à 2 °C. Il s'agit du seuil où les conséquences pourraient être graves en ce qui a trait aux vivres, aux ressources hydriques, aux écosystèmes et aux extrêmes climatiques.

Ces conclusions mènent au constat que le choix « atténuer ou adapter » n'est pas une option. La seule issue est « atténuer et adapter ». C'est d'ailleurs ce que proposait le protocole de Kyoto en 1997, sans toutefois disposer de chiffres à l'appui.

5. Bibliographie

Bosello, Francesco. (2004). *Timing and size of adaptation, mitigation and R&D investments in climate policy*. University of Venice, 30 p.

Bosello, Francesco. (année de publication inconnue). *Adaptation and mitigation to global climate change: conflicting strategies? Insights from an empirical integrated assessment exercise*. University of Venice, 41 p.

Bosetti, Valentina, Carraro, Carlo et Galeotti, Marzio. (2006). *Stabilisation target, technical change and the macroeconomic costs of climate change control*. Milano: fondazione Eni Enrico Mattei, 34 p.

Brundtland, Gro Harlem. (1987). *Our common future*. World commission on environment and development, 374 p.

Collaway, John M., Naess, Lars Otto et Ringius, Lasse. (1998). *Adaptation costs: A framework and methods (Chapitre 5 de Mitigation and adaptation cost assessment : Concepts, methods and appropriate use)*. Roskilde: UNEP Collaborating centre on energy and environment, 169 p.

D'Ieteren, Emmanuel, Marechal, Kevin et Hecq, Walter. (2004). *Les implications du Protocole de Kyoto pour la Belgique*. Université libre de Bruxelles, Centre d'études économiques et sociales de l'environnement, 220 p.

Environnement Canada. (2002). Coûts reliés au Protocole de Kyoto - ce que l'on sait. Page consultée le 4 avril 2006, www.ec.gc.ca/minister/speeches/2002/020318_1_f.htm.

GIEC. (2001a). *Climate Change 2001: Mitigation*. Wembley, Royaume-Unis, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 753 p.

GIEC, Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques. (1997). *Incidences de l'évolution du climat dans les régions : Évaluation de la vulnérabilité (Résumé à l'intention des décideurs)*, 27 p.

GIEC, Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques. (2001b). *Climate change 2001: Synthesis report. Summary for policymakers*. Wembley, Royaume-Unis, 34 p.

GIEC, Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques. (2001c). *Climate change 2001: The scientific basis*. Wembley, Royaume-Unis, 882 p.

GIEC, Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques. (2001d). *Impacts, adaptation and vulnerability*, 967 p.

Goklany, Indur M. (2005a). A climate policy for the short and medium term: Stabilization or adaptation? *Energy and environment, 16*(3-4), 667-680.

Goklany, Indur M. (2005b). *Living with global warming*. Dallas, Texas, National center for policy analysis, 23 p.

Leimbach, Marian et Toth, Ferenc L. (2003). Economic development and emission control over the long-term: The ICLIPS aggregated economic model. *Climatic change, 56*, 139-165.

McBean, Gordon, Weaver, Andrew et Roulet, Nigel. (2001). La science des changements climatiques : où en sont les connaissances ? *Revue canadienne de recherche sur les politiques, 2*(4), 16-26.

Meunier, Francis. (2005). *Domestiquer l'effet de serre : Énergies et développement durable*. Paris, Dunod.

Nations Unies. (1992). *Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques*. New-York, 31 p.

Nations Unies. (1998). *Protocole de Kyoto à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques*. Kyoto, 24 p.

Newell, Richard G. et Pizer, William A. (2004). Uncertain discount rates in climate policy analysis. *Energy policy, 32*, 519-529.

Office québécois de la langue française. (2003). Le grand dictionnaire terminologique. Page consultée le 3 avril 2006, www.granddictionnaire.com.

Pachauri, R.K. et Taniguchi, T. (1999). IPCC costing issues expert meeting in Tokyo: Summary report. Page consultée le 31 mars 2006, http://arch.rivm.nl/env/int/ipcc/pages_media/summary_costs.html.

Reay, David S. (2002). Costing climate change. *Philosophical transactions of the royal society, 360*, 2947-2961.

Ringius, Lasse, Frederiksen, Pia et Birr-Pedersen, Katja. (2002). *Burden sharing in the context of global climate change: A north-south perspective*. Danemark, National environmental research institute, 93 p.

Rübbelke, Dirk T.G. (2003). An analysis of differing abatement incentives. *Resource and energy economics, 25*, 269-294.

Salinger, M. James. (2005). Climate variability and change: Past, present and future - An overview. *Climatic Change, 70*, 9-29.

Stern, Nicholas. (2006). *Stern review: The economics of climate change*, 575 p.

Stratus Consulting Inc. (2005). *Compendium on methods and tools to evaluate impacts of, and vulnerability and adaptation to, climate change*. Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, 155 p.

Tol, Richard S.J. (2005a). Adaptation and mitigation: trade-offs in substance and methods. *Environmental science and policy, 8*, 572-578.

Tol, Richard S.J. (2005b). The marginal damage costs of carbon dioxide emissions: an assessment of the uncertainties. *Energy policy, 33*, 2064-2074.

Tol, Richard S.J., Fankhauser, Samuel et Smith, Joel B. (1998). The scope for adaptation to climate change: What can we learn from the impact litterature? *Global environmental change, 8*(2), 109-123.

van Vuuren, D.P., Cofala, J., Eerens, H.E., Oostenrijk, R., Heyes, C., Klimont, Z., den Elzen, M.G.J. et Amann, M. (2006). Exploring the ancillary benefits of the Kyoto Protocol for air pollution in Europe. *Energy policy, 34*, 444-460.

Watkiss, Paul, Downing, Tom, Handley, Claire et Butterfield, Ruth. (2005). *The impacts and costs of climate change*. Oxford, UK, European commission DG environment, 88 p.

Wilbanks, Thomas. (2005). Issues in developping a capacity for integrated analysis of mitigation and adaptation. *Environmental science and policy, 8*, 541-547.

Wilbanks, Thomas, Kane, Sally M., Leiby, Paul N., Perlack, Robert d., Settle, Chad, Shogren, Jason F. et Smith, Joel B. (2003). Integrating mitigation and adaptation - Possible responses to global climate change. *Environment, 45*(5), 1-12.

Wrang, Kasper et Busk, Rico. (2005). *Looking beyond Kyoto - Trade-offs and disagreements in climate policy*. Copenhagen, 186 p.

6. Remerciements

L'auteure tient sincèrement à remercier les réviseurs pour leurs commentaires constructifs qui ont permis de bonifier le texte original. Elle tient aussi à remercier les professeurs François Brissette et Robert Leconte de l'École de technologie supérieure pour le défi qu'ils ont lancé en soumettant la problématique abordée dans cet article. ‹

ANNEXE II

Article 2 : Minville *et al.* (2008a)

Cet article a été publié en août 2008 dans Journal of hydrology.

Minville, Marie, Brissette, François et Leconte, Robert. (2008). Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed. Journal of hydrology, 358(1-2), 70-83.

Uncertainty of the Impact of Climate Change on the Hydrology of a Nordic Watershed

Marie Minville, ing. Jr

François Brissette, ing., Ph.D.

Robert Leconte, ing., Ph.D.

Abstract: The impact of climate change on the hydrology of the Chute-du-Diable watershed (Quebec, Canada) is studied by comparing statistics on current and projected future discharge resulting from a wide range of climate change scenarios. The use of 10 equally weighted climate projections from a combination of 5 General Circulation Models (GCMs) and 2 greenhouse gas emission scenarios (GHGES) allows for the definition of an uncertainty envelope of future hydrologic variables. GCM data is downscaled using the change factor approach for 30-year time slices centered around years 2020, 2050 and 2080.

To estimate natural variability, synthetic time series are then computed for each horizon and for each climate change scenario, using a stochastic weather generator (30 series of 30 years), and are entered into a hydrology model. Future hydrological regimes are then compared to the control period (1961-1990) using the annual and seasonal mean discharge, peak discharge and timing of peak discharge criteria.

Results indicate a 1 to 14°C increase in seasonal temperature and a -9 to +55% change in seasonal precipitation. The largest increases in both temperature and precipitation are observed in the winter and spring seasons. The main hydrologic impact observed is a spring flood appearing 1 to 5 weeks earlier than usual and a modification of its amplitude from -40 to +25%. Most scenarios suggest increases in the winter, spring and fall discharge, whereas summer is expected to see a decrease in discharge. While there is still a large scatter in projected values, the uncertainty analysis projects a better view of the most probable future hydrologic behaviour of the watershed.

Of all sources of uncertainty considered in this study, the largest comes from the choice of a GCM. Accordingly, all impact studies based on results from only one GCM should be interpreted with caution.

1. INTRODUCTION

In the future, water is the resource that will be most severely affected by climate change (Environnement Canada, 2004; 1996; Srikanthan et McMahon, 2001; Xu et Singh, 2004). Several studies (Whitfield and Cannon (2000); Muzik (2001); Risbey and Entekhabi (1996); among others) have shown that small perturbations in precipitation frequency and/or quantity can result in significant impacts on the mean annual discharge. Moreover, Christensen *et al.* (2004) mention that modest changes in natural inflows result in larger changes in reservoir storage. Any changes in the hydrologic cycle will affect energy production and flood control measures (Xu et Singh, 2004) to such an extent that water management adaptation measures will very likely be brought in.

Whitfield and Cannon (2000) have analyzed recent hydrologic trends in Canada (1976 to 1995), and have observed that several regions display hydrographs with an early spring flood and increased winter mean discharge as well as smaller summer flows. Regonda (2005) did a similar analysis in the United Sates on North West basins and observed an advancing trend in the timing of peak spring flows, which he attributed to climate change. An increase in winter precipitations was also observed. This precipitation increase did not however translate into higher spring discharges, suggesting that the precipitation trend was offset by higher temperatures and increased winter seasonal melt and more liquid precipitation.

Similarly, the IPCC (2001b) states that over the course of this century, North-American river inflows will rise in the winter season, while decreases will be observed in the summer. In the Canadian province of Quebec, the impact of such changes on hydropower is critical. In Northern Quebec, annual reservoir inflows are expected to rise (Ouranos, 2004). This is generally considered to be a positive impact, although it may not necessarily result in increased hydropower production. On the other hand, the projected increase in extreme

rainfall events in the southern areas, where most of Quebec's population is concentrated, will likely increase damage due to floods. Water management and design practices will face new challenges which will require a better quantitative understanding of potential changes; this understanding of the impacts of climate change is complicated by several sources of uncertainty linked to climate change. The uncertainty depends on both climate data and simulated hydrologic regimes (Prudhomme *et al.*, 2003). Climatic uncertainty is linked to greenhouse gas emission scenarios (GHGES) and especially to general circulation models (GCMs), whose representation of topography and climate processes is imperfect, in large parts due to computational limitations. The future climate uncertainty has recently been introduced into hydrology impact studies by using more than one climate projection obtained from the combination of GCM and GHGES. Recently Merritt *et al.* (2006) and Vicuna *et al.* (2007) used 3 GCMs and 2 GHGES. Maurer (2007), also for an hydrology impact study used 11 GCM and 2 GHGES, and although not all of the possible combinations were used, this points to a tendency in using as many GCM and GHGES as possible to better encompass the uncertainty linked with climate projections.

Downscaling methods also add uncertainty to climate data due to the limitations that are inherent in each technique. Hydrologic uncertainty results from the transferability of hydrological models to a future climate, and particularly with respect to model calibration. Considering all these sources of uncertainty, future hydrologic conditions can only be described by taking into account as much of this uncertainty as possible. As such, a precise deterministic prediction is not possible.

The main objective of this work is to quantify the impacts of climate change on the Chute-du-Diable watershed, while outlining the uncertainty linked to climate data by considering data from several GCMs and GHGES. This is the first part of a larger project that aims to propose adaptation measures for water management practices over the watershed.

The paper first presents the main characteristics of the watershed. Climate data is then presented, followed by details on how climate change projections were constructed. The paper concludes with a presentation of results and a discussion.

2. STUDY AREA AND HISTORICAL DATA

The Chute-du-Diable watershed is located close to the geographical center of the province of Quebec (Figure 1) and is part of the Peribonka River watershed. It has a surface area of 9700 km^2, with an elevation of between 100 and 700 meters. It is sparsely populated, and mostly forested. The watershed is used mainly for hydropower production and logging. The average annual rainfall in the area is 962 millimeters and the basin's annual average temperature is -1°C. Snowfall accounts for over 36% of the mean annual precipitation. Daily area-averaged meterological data was derived from a network of 6 gauges distributed throughout the catchment averaged over 26 years of historical data. River flows are regulated by two upstream reservoirs. Natural (de-regulated) inflows used in this study were obtained from the Énergie Électrique Company, a division of Alcan Inc., a world-leading aluminum producer. Snow plays a crucial role in the watershed management, with 35% of the total yearly discharge occurring during the spring flood. The mean annual inflow of the Chute-du-Diable watershed is 212 m^3/s.

This watershed was chosen since it contains 3 hydropower plants managed by a division of Rio Tinto Alcan. The work outlined in this paper is part of a larger project aimed at the evaluation of potential impacts of climate change on water management practices and hydropower production over the Peribonka River watershed.

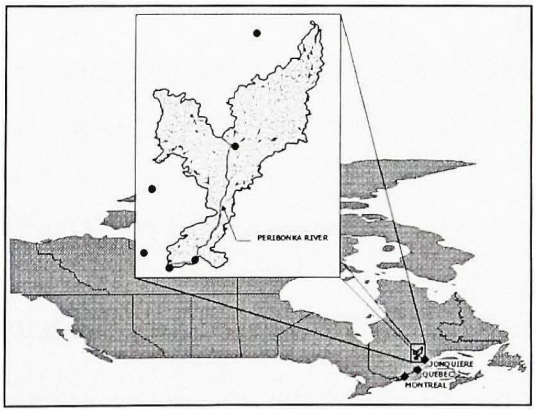


Figure 1. Location map of Chute-du-Diable watershed with location of hydrometeorological stations (black circles)

3. HYDROLOGICAL MODEL DESCRIPTION AND CALIBRATION

3.1 Hydrological model: HSAMI

Hydrological modelling was performed with the HSAMI software model (Bisson et Roberge, 1983; Fortin, 2000), which was developed by Hydro-Québec, and as been routinely used in forecasting natural inflows for over 20 years. HSAMI is actually used in Quebec for daily forecasting of natural inflows on 84 watersheds with surface areas ranging from 160 km^2 to 69195 km^2. Verticals flows are simulated with 4 interconnected linear reservoirs (snow on the ground, surface water, unsaturated and saturated zones). The model takes into account snow accumulation, snowmelt, soil freezing/thawing and evapotranspiration. Water is transferred at the basin outlet through surface runoff, interflow and baseflow (see fig. 2). For each time step, the model goes through the following steps:

1. Estimation of potential evapotranspiration
2. Computation of net precipitation on reservoirs
3. Simulation of interception and accumulation of rainfall and snow, interactions between rainfall and snow, snowpack freezing/thawing and aging
4. Separation of available surface water between infiltration and runoff
5. Simulation of vertical water movement (infiltration, interflow, evapotranspiration and movement between the saturated and unsaturated zones)
6. Simulation of horizontal flows toward the outlet
7. Computation of natural inflows or water discharge at the outlet

HSAMI is a 23-parameter, lumped, conceptual, rainfall-runoff model. Two parameters account for evapotranspiration, 6 for snowmelt, 10 for vertical water movement, and 5 for

horizontal water movement. Model calibration is done automatically using the Shuffled Complex Evolution optimisation method (Duan, 2003).

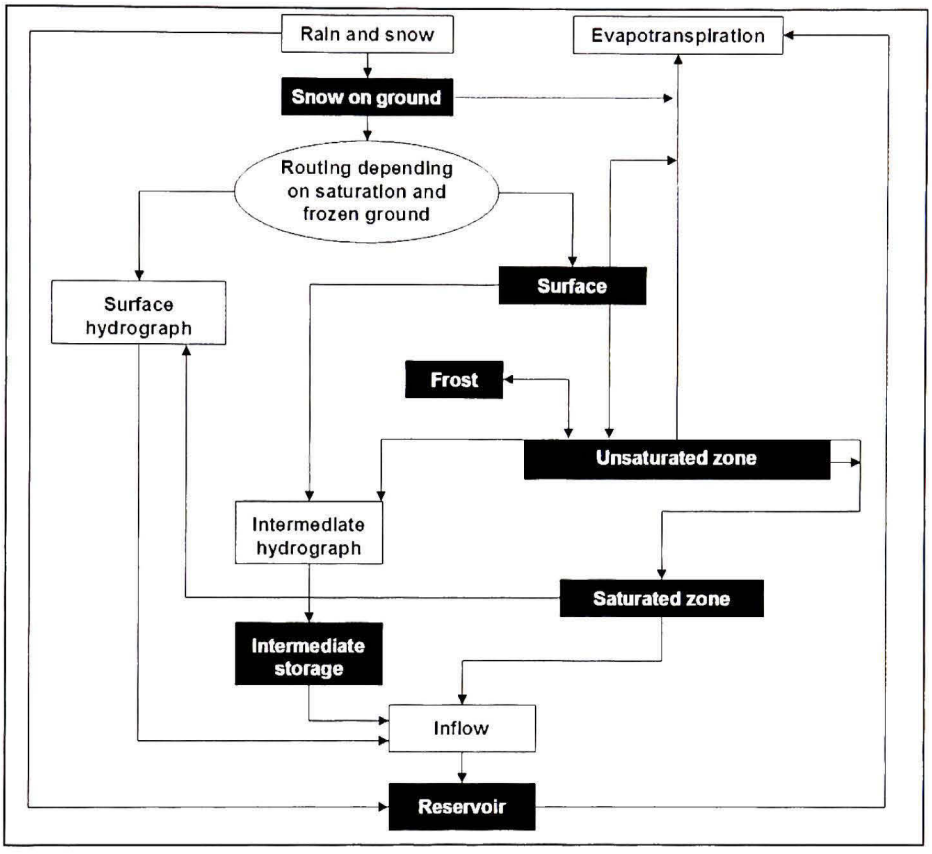


Figure 2. Flow chart of the HSAMI model

The basin-averaged required daily input data for the model is: minimum and maximum temperatures, liquid and solid precipitations. Sunshine hours and snow on ground are optional inputs. A natural inflows or discharge time series is also needed for proper calibration/validation.

3.2 Calibration/validation of hydrological model

As mentioned previously, since HSAMI is a lumped model, the initial step consisted in preparing basin-averaged data input. Six years were used for calibration (1978-1983), and 20 years for validation (1984-2003). The more recent years were favoured because they provide calibration/validation for the warmest years on record. The uncertainty linked to model

calibration in a future climate was not considered in this study. The optimal combination of parameters was chosen based on the Nash-Sutcliffe criteria for both calibration and validation runs. The chosen set of parameters yielded values of the Nash-Sutcliffe criteria of 0.92 for calibration and 0.89 for validation.

Figure 3 presents the observed and modeled averaged hydrographs for the 1978-2003 time period. The model behaves well most of the year, with the exception of summer, when the modeled discharge is overestimated.

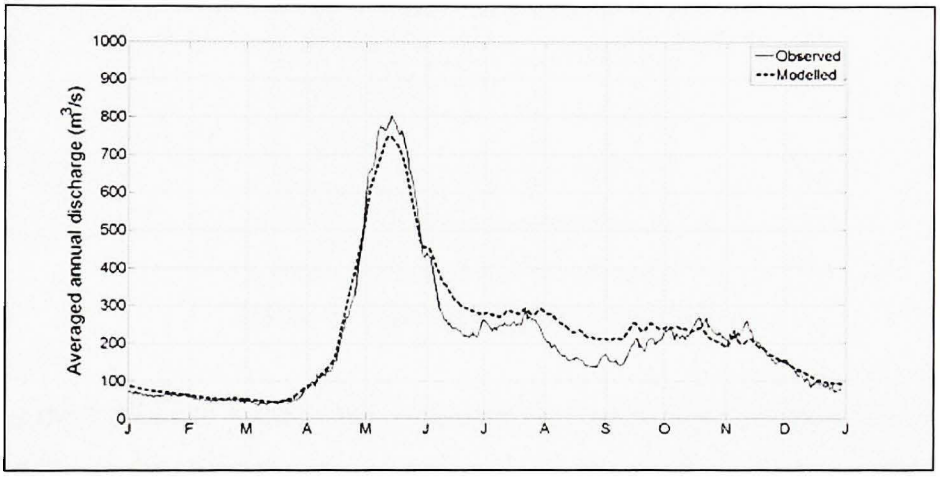


Figure 3. Observed and modelled averaged hydrographs for the 1978-2003 time period for the Chute-du-Diable watershed

4. CLIMATE CHANGE PROJECTIONS

4.1 Methodology

Climate change projections used in this project are constructed in three steps. First, climate projections from GCMs and GHGES are selected, and then climate data is downscaled to allow its use at the basin scale. Finally, several synthetic time series of downscaled climate data are stochastically generated to take into account the natural year-to-year climate variability.

4.1.1 General Circulation Models (GCMs) and Greenhouse Gas Emission Scenarios (GHGES)

The climate projections (Table 1) selected are obtained from 5 GCMs and 2 GHGES (Nakicenovic *et al.*, 2000). The chosen GCMs are the United-Kingdom Climate Model (HadCM3), the European Climate Model (ECHAM4), the Australian model (CSIRO), the Japanese Climate Model (CCSRNIES) and the Canadian Climate Model (CGCM3).

	A2	B1	B2
HadCM3	✓		✓
ECHAM4	✓		✓
CSIRO	✓		✓
CCSRNIES	✓		✓
CGCM3	✓	✓	

Table 1. Climate projections used

These models have all been used in the Atmospheric Model Inter-Comparison Project (Boer, 2004), with the exception of the third version of the Canadian Climate Model (CGCM3), which is more recent. All GCMs are able to simulate the climate and its variability, even though the atmospheric processes are not all perfectly represented due to the coarse computational grid of the models, and the still limited understanding of some processes (Boer, 2004). For the CGCM3 model, since results from the B2 scenario were not available, the B1 scenario (a more optimistic scenario) was chosen instead. Implications of this choice will be examined in the discussion section.

4.1.2 Change factor

While some climate data is well represented by GCMs, certain other outputs (including precipitation) are often not well reproduced (Roy *et al.*, 2001). The approach used in this work is the so-called change factor method (Diaz-Nieto et Wilby, 2005; Hay *et al.*, 2000), and was applied for 30-year series centered over the years 2020, 2050 and 2080. In essence, this method modifies the observed historical time series by adding the difference between the

future and actual climate as simulated by a GCM. These perturbation factors are computed for each month at each time period (2020, 2050 and 2080). This approach is applied for temperature (minimum and maximum) and precipitation data. Monthly variables from GCMs are used to modify the daily time series needed for hydrological modeling. Equations 1 and 2 show how this method is applied mathematically for minimal and maximal temperature (Eq.1) and precipitation (Eq.2). Indices are defined in the notation section.

$$T_{fut,j,h} = T_{obs,j} + (\overline{T}_{fut,m,h} - \overline{T}_{cont,m}) \quad [1]$$

$$P_{fut,j,h} = P_{obs,j} \times (\overline{P}_{fut,m,h} / \overline{P}_{cont,m}) \quad [2]$$

A region around the basin was defined to incorporate at least three grid points for each GCM. This common region allows similar averages to be defined for each GCM despite their distinct computational grids. Figure 4 shows the common region superimposed on the computational grid of the five chosen GCMs.

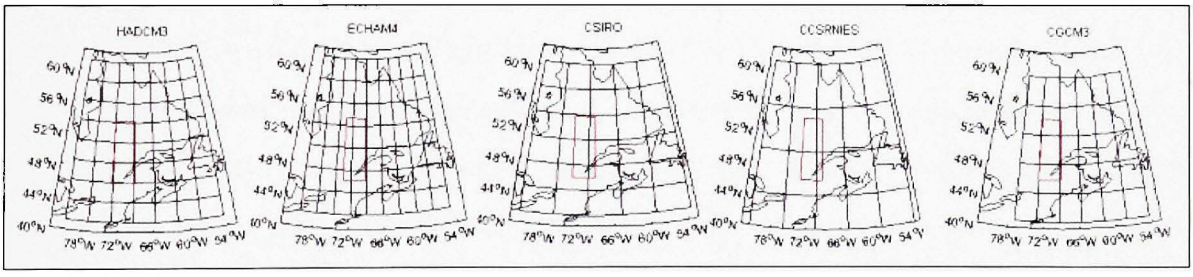


Figure 4. Interest zone with respect to the computational grid of the chosen GCMs

An area-based weighting scheme for each grid is used to average monthly delta values for the basin. Equations 1 and 2 can be modified to take into account the weight of each grid point for all computational grids, to yield equations 3 and 4. Indices correspond to all grid points within the common region defined around the basin.

$$T_{fut,j,h} = T_{obs,j} + \left[\omega_1 (\overline{T}_{fut,m,h} - \overline{T}_{cont,m})_1 + \omega_2 (\overline{T}_{fut,m,h} - \overline{T}_{cont,m})_2 + \ldots + \omega_n (\overline{T}_{fut,m,h} - \overline{T}_{cont,m})_n \right] \quad [3]$$

$$P_{fut,j,h} = P_{obs,j} \times \left[\omega_1 (\overline{P}_{fut,m,h} / \overline{P}_{cont,m})_1 + \omega_2 (\overline{P}_{fut,m,h} / \overline{P}_{cont,m})_2 + \ldots + \omega_n (\overline{P}_{fut,m,h} / \overline{P}_{cont,m})_n \right] \quad [4]$$

The monthly delta values obtained from Equations 3 and 4 are then applied to the daily observed historical data (precipitation and temperature).

4.1.3 Basin-averaged weather data

The hydrological model used in this study is a lumped model, which requires basin-averaged values of weather data. Minimum and maximum temperatures, as well as precipitation time series were averaged from observed data at all available stations. Delta minimum and maximum temperature values were directly added to basin-averaged series.

4.1.4 Accounting for natural variability

The next step consisted in taking into account the uncertainty linked to natural variability. Natural variability was introduced into time series (for the control period and all climate change projections) using a stochastic weather generator. The WeaGets weather generator (Caron, 2005) was used. It is a Richardson-type (1981) weather generator that uses a third-order Markov chain for daily precipitation occurrence and an exponential distribution function for quantity. An autoregressive process is used to generate minimum and maximum temperatures, based on whether a day is dry or wet. The weather generator allows the production of infinite-length time series with the same statistical properties as those of the original series. Once entered in the hydrological model, these long time series allow the natural climate variability to be assessed, and thus takes into account the uncertainty associated with just a single trace of the climate.

For each climate change scenario (and also for the observed historical time series) 30 series of 30 years were generated, giving a total of 900 years of daily synthetic climate data. It is important to note that these 900 years do not represent 900 consecutive years of evolving climate, but 900 years of climate with the same statistics as the 30-year series from which they were generated. Stationarity is an underlying assumption for each 30-year series. To sum it all up, eleven 900-year time series of daily minimum temperature, maximum

temperature and precipitation were generated (2 GHGES for each of the 5 GCMs, as well as for the control period data).

4.2 Results

4.2.1 Seasonal change

Since the basin hydrology is closely linked to seasons, data analysis is performed on a seasonal basis. Projected precipitation and temperature change scatter plots are presented in Figure 5 for all climate projections and chosen time slices (2020, 2050, 2080).

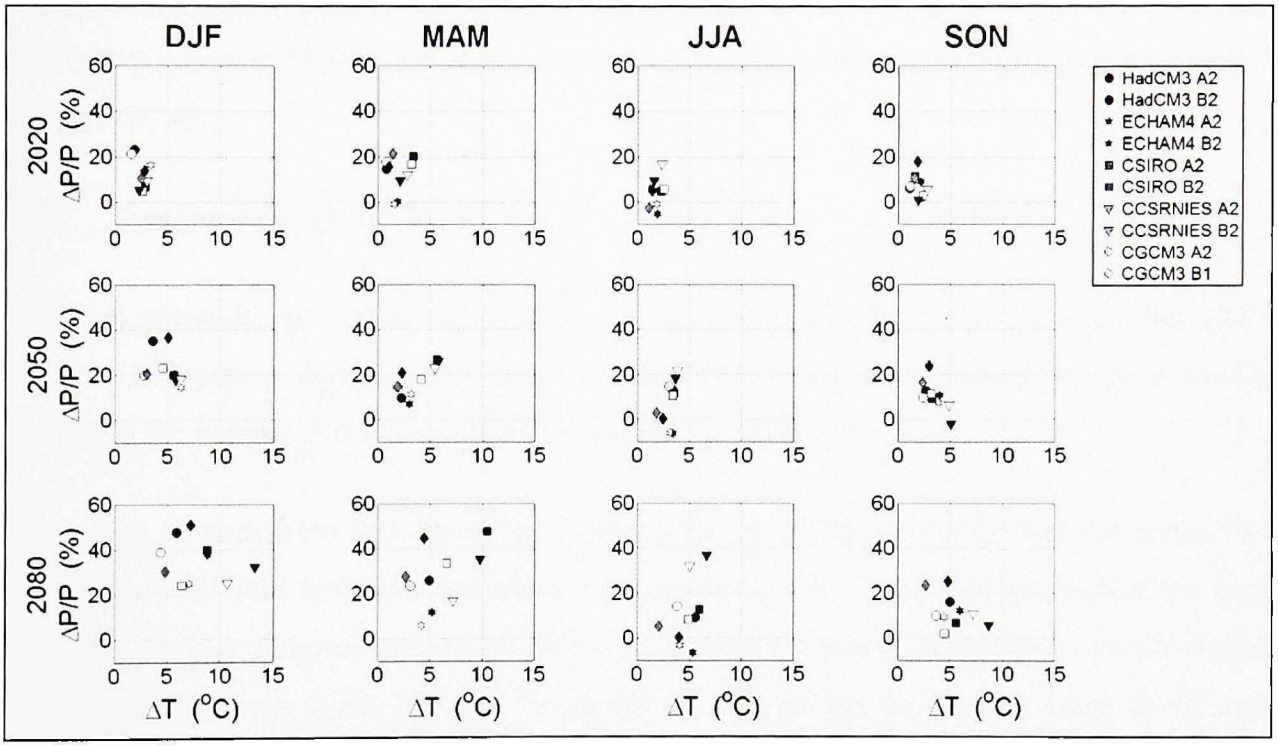


Figure 5. Scatter plots of temperature and precipitation seasonal changes for all combinations of GCM and GHGES, at the 2020, 2050 and 2080 time horizons

Figure 5 indicates that for the chosen basin, all projections suggest a temperature increase for all chosen horizons. This increase varies from 1 to 4°C in 2020 all the way to between 4 and 14°C in 2080, depending on the season, GHGES and GCM. At each horizon, the temperature increase is largest in the winter (DJF) and smallest in the summer (JJA). It should also be

noted that inter-model variability is largest in the winter (DJF) and spring (MAM) seasons. This is characterized by a larger dispersion on the scatter plots.

For precipitation, the GHGES and GCMs projections suggest an increasing trend by as much as 20% for 2020 and 55% for 2080. However, a few projections results in modest decreases in summer precipitation. For each time horizon, the maximum increase in precipitation is projected for the winter season (DJF).

For each season, inter-model variability increases with each time horizon, as shown by the increase in scatter in Figure 5. In general, uncertainty linked with GCM is larger than that linked to GHGES. This is particularly obvious for the 2080 horizon. In other words, variability linked to GCM for a given scenario is larger than the variability linked to GHGES for that GCM.

4.2.2 Temperature variability

Figure 6 presents the annual temperature cycle for all climate projections for the 2080 horizon. 900-year averages (thirty 30-year series) are shown in comparison to the synthetic data from the control period, which also averaged over 900 years.

It can also be seen from this figure that inter-model variability is greater than the variability induced by different emission scenarios. Temperature cycle graphs readily display the date on which average temperatures climb above – and descend below – freezing. Currently (bold line), these dates are April 15th and November 1st. Depending on the particular model and scenario, these dates could change to mid-March and mid-December respectively by 2080. The freezing season could then be shortened by up to 2.5 months (from 5.5 to 3). This change would affect the hydrology of the basin by reducing snow accumulation over the winter and spring snowmelt, accordingly. The snowmelt period would also begin earlier.

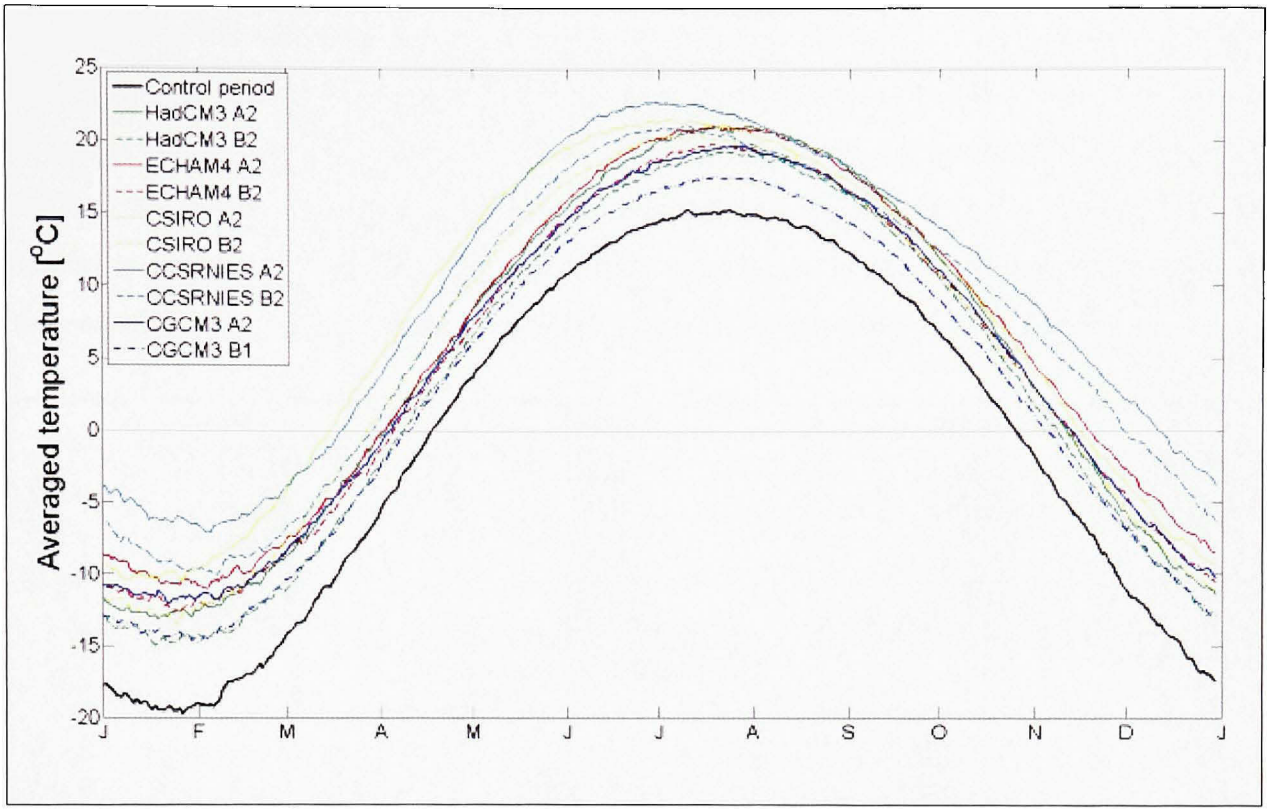


Figure 6. Averaged annual temperature cycle for all climate projections for the 2080 horizon, and for the 1961-1990 control period for the Chute-du-Diable watershed

4.2.3 Uncertainty of future average temperature and annual precipitation data

Figure 7 shows the uncertainty envelope of climate data as a function of each combination of GCM and GHGES.

In building this envelope, it was assume that each climate projection had an equal probability of occurrence. Using the results from the thirty 30-year simulations from the stochastic weather generator, empirical probability density functions (PDFs) of the basin's annual mean temperature and annual precipitation data were constructed. The PDFs display the range of possible values for each variable and for each time horizon. The probability that each variable will be below a certain value is equal to the area under the curve to the left of this given value. The total area under each PDF is equal to 1. For example, for annual precipitation data representatives of the control period (bold black line in all three graphs of

the second row), expected values are between 650 and 1200mm. The median is 964mm (there is a 50% probability of annual precipitation being greater or smaller than 964mm) and the mode (most frequent value) is 985mm. While each of the individual PDFs in Figure 7 displays the natural variability inherent in each climate projection (as modelled with the stochastic weather generator), the bold black dotted line is the PDF which includes all uncertainties, incorporating natural variability with GCM and GHGES variability.

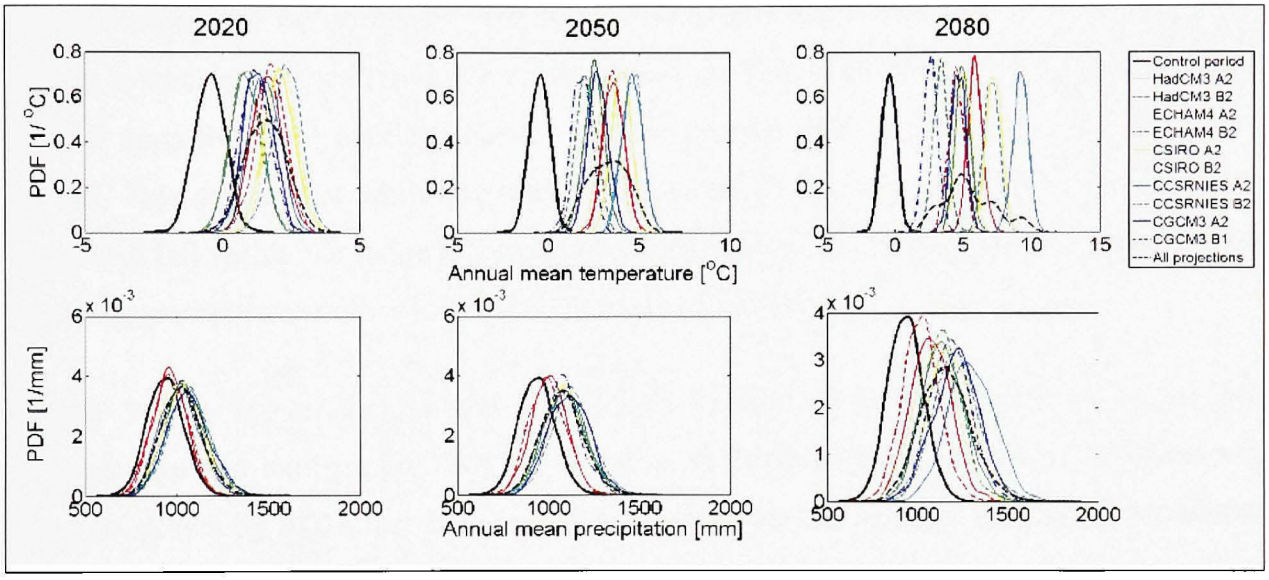


Figure 7. Probability density functions of annual mean temperature and annual precipitation data for all climate projections, and for the 1961-1990 control period. PDFs are presented for the 2020, 2050 and 2080 time horizons

Figure 7 indicates that for both variables, uncertainty increases with time. PDFs also show that while all GCMs propose an annual increase in both temperature and precipitation for all projections, the magnitude of this increase varies greatly from one GCM to the next. More precisely, climate projections from HadCM3 and CGCM3 show the smallest temperature increases, of about 0.5 and 3.5°C for the 2020 and 2080 horizons, while the CCSRNIES and CSIRO models are at the other end of the spectrum, with increases of 2 and 8.5°C for the same horizons. The middle-ground model is ECHAM4, with projected increases of 1.5 and 5.5°C for the 2020 and 2080 horizons.

The GCMs behave differently for annual precipitation. ECHAM4 suggests the smallest annual precipitation increase, from less than 10mm in 2020 to about 100mm in 2080, and CCSRNIES proposes the largest increase, all the way up to 400mm in 2080. The other 3 GCMs (HadCM3, CGCM3 and CSIRO) yield similar results, with increases ranging from 100mm in 2020 to 200mm in 2080.

The PDFs show that future average temperatures projected by GCMs will be fully distinct of the current natural variability by year 2050. This means that a cold year in the 2050 climate will be hotter than the current hottest year on record. This is not the case for precipitation, as can be seen from the overlaps between future climate PDFs and the one for the control period. This means that while the future is projected to become wetter over the basin, dry years will fall within the range of current observed values. By 2080, a very dry year would be one with precipitations close to the current mean of 962 mm.

Figure 7 also shows that annual inter-model variability increases with time, for both precipitation and temperature. For precipitation, the within-model variability increases with time, as shown by PDFs that are flatter. This means that the variance in annual precipitation increases with time, indicating greater year-to-year variability.

Changes in annual variability are the result of the bias correction method which is applied on a monthly basis. Accordingly, variability is preserved at the monthly scale. However, with more distant time horizons, monthly correction factors increase and display more seasonal variability. This results in an increase in annual variability, which results in flatter PDFs.

5. HYDROLOGIC IMPACTS OF CLIMATE CHANGE

5.1 Average hydrographs

Average hydrographs for each combination of GCMs and GHGES are presented in Figure 8 for the three chosen time horizons. The averaged hydrographs are computed using 900 years of data from the stochastic weather generator (thirty 30-year time series). The bold line represents 900 years of the control period (1961-1990). In this figure as well as in those that

follow, the control period will be represented by modelled data, and not real observed data. This is done to ensure that the slight bias observed in HSAMI simulations is taken into account when comparing the future to the control period.

Figure 8 indicates that there is a general increase in winter flows (November to April) projected by all GCMs, and for all three time horizons. A decrease in summer flows (June to October) is observed in most cases for the 2020 and 2050 horizons, and in all cases, but for CCSRNIES A2, in 2080. Peak discharge is observed sooner in all cases and horizons. The lag varies from a few days in 2020 all the way to 6 weeks in 2080, depending on the GCM and GHGES selected. Results do not converge in the case of peak discharge magnitude. CGCM3 and HadCM3 propose an increase in peak discharge for all projections and time horizons while the other three GCMs project either the status quo or a decrease in peak discharge. In particular, the CCSRNIES model suggest a severe decrease in peak discharge (especially for the A2 scenario), with a very early occurrence, as well as a high average discharge over the winter.

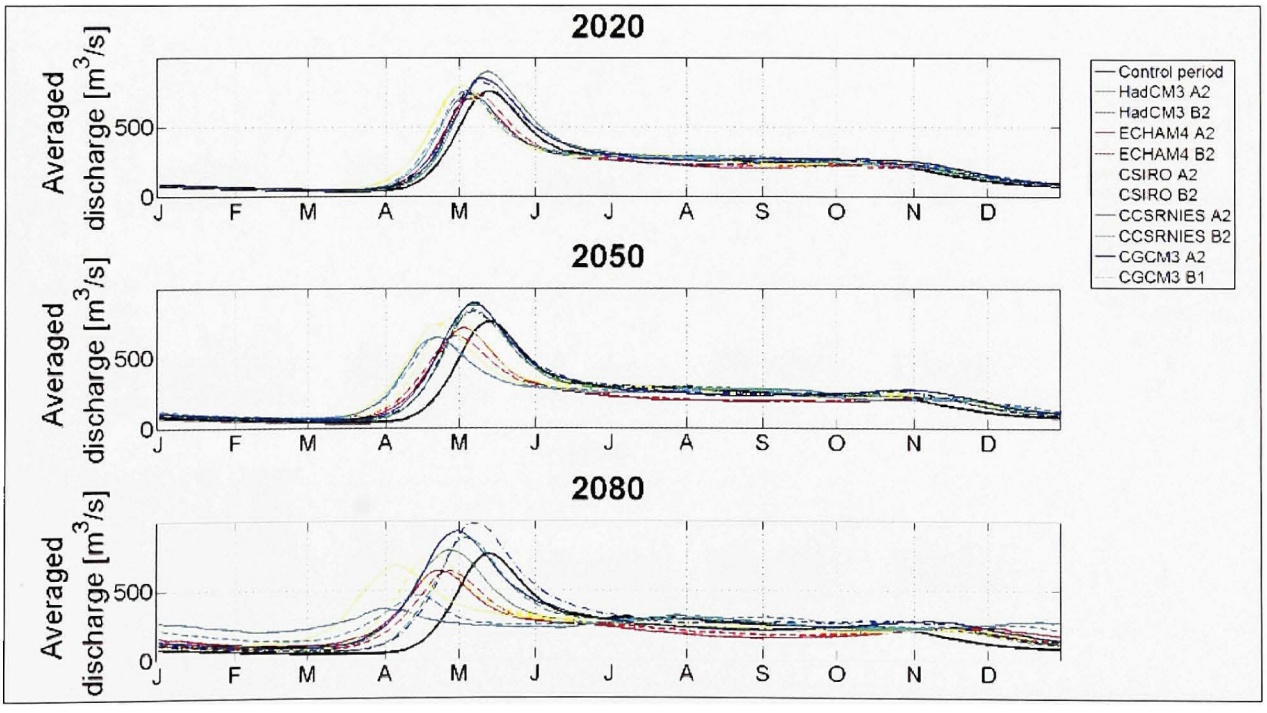


Figure 8. Average hydrographs for all climate projections, and for the 1961-1990 control period. Results are for the 2020, 2050 and 2080 time horizons

5.2 Annual and seasonal inflows

Total annual and seasonal inflows are presented in Figure 9 for all climate change projections as well as for the control period. Results are presented in % of the simulated control period for all three time horizons. As mentioned before, a comparison is done with modeled inflows, and not with observed ones, in order to avoid any bias due to the hydrological model. As such, reconstructed inflows for the control period are always at 100%.

For annual inflows, the only simulations that project a decrease come from the ECHAM4 model. This decrease is projected for all three time horizons and varies from 1 to 7%, depending on the particular scenario and time horizon. For the other models, increases varying from 1 to 20% are projected. In addition to changes in mean annual inflows, a seasonal redistribution of inflows is also observed. At the seasonal scale, the largest increases are in winter (DJF), and the smallest in summer (JJA). The largest increase (290%) results from CCSRNIES A2 in 2080, and the largest decrease (30%) is projected by ECHAM4 A2, also in 2080.

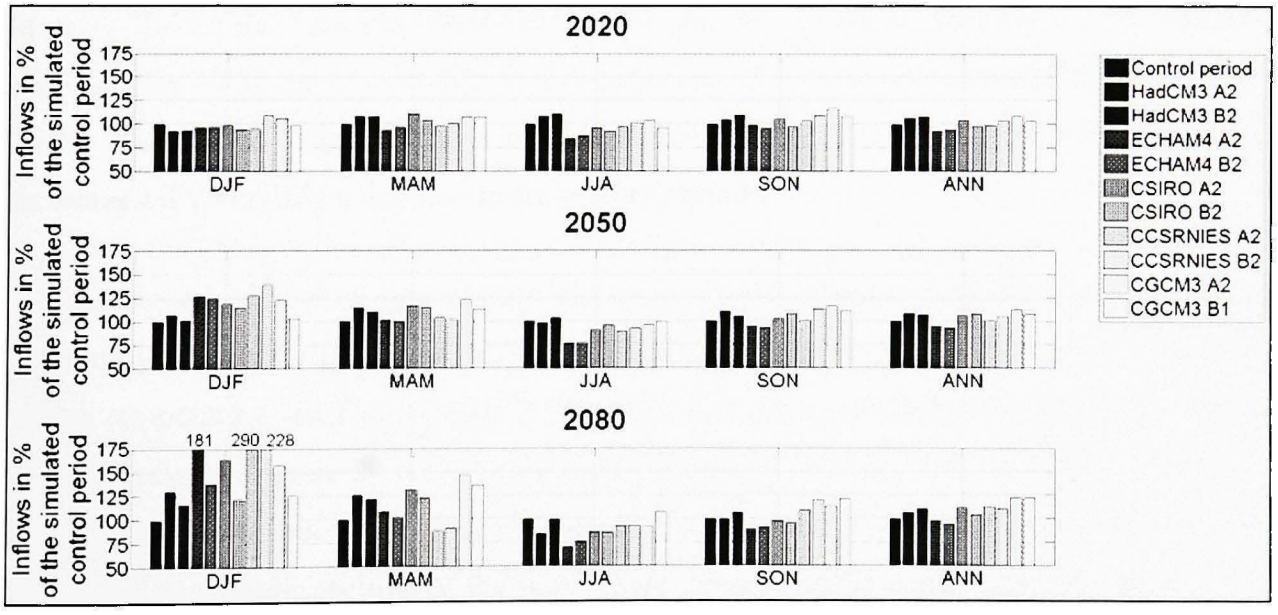


Figure 9. Total seasonal and annual inflows for all climate projections and for the control period, in percentage of the inflows of the control period. Results are for the 2020, 2050 and 2080 time horizons

All observed changes in annual mean inflows are statistically significant (5% level) for all projections and all horizons, with the exception of ECHAM4 A2 in 2050 and ECHAM4 B2 in 2020 and 2080. Changes in variance are also significant (5% level) with the exception of ECHAM4 A2 and B2 for each horizon and CSIRO A2 in 2020. At the seasonal scale, changes in mean and variance are significant (1% level) for all seasons, projections and time horizons. Standard t-test and F-test were used as seasonal and annual inflows followed a normal distribution.

5.3 Peak discharge

The snowmelt peak discharge is analyzed based on magnitude and time of occurrence criteria. Figures 10 and 11 present averages of these criteria for all climate change projections and time horizons. This data can also be extracted from Figure 8, but is more easily visualized in Figures 10 and 11.

Figure 10 presents average peak discharge values expressed in percentage of reconstructed discharge. By 2020, HadCM3, under scenarios A2 and B2, suggest a 12% (median) increase in peak discharge, whereas ECHAM4 under the A2 scenario, propose a 2% (median) decrease. By 2080, the CCSRNIES model under the A2 scenario propose the largest decrease (40%) whereas the largest increase at 25% is projected by CGCM3 A2. All models predict an increased variability compared to the control period.

The combined effects of temperature and precipitation changes influence peak discharge differently depending on the GCM. Models that predict the highest increases in winter and spring temperature (ECHAM4 and CCSRNIES) forecast a reduced peak discharge. Liquid winter precipitation rapidly contributes to runoff instead of being stocked in the snow cover, thus reducing the potential of a high peak discharge. Higher winter temperatures also contribute to episodic melting of the snow cover throughout the winter and early spring. The models HadCM3, CSIRO and CGCM3, which predict smaller increases in winter temperatures, result in increases in peak discharge. For these two models, increases in winter temperatures are not sufficient to offset the precipitation increase. In other words, more

abundant winter precipitation results in a thicker spring snowpack, despite the increased likelihood of winter rainfall and episodic snowmelt.

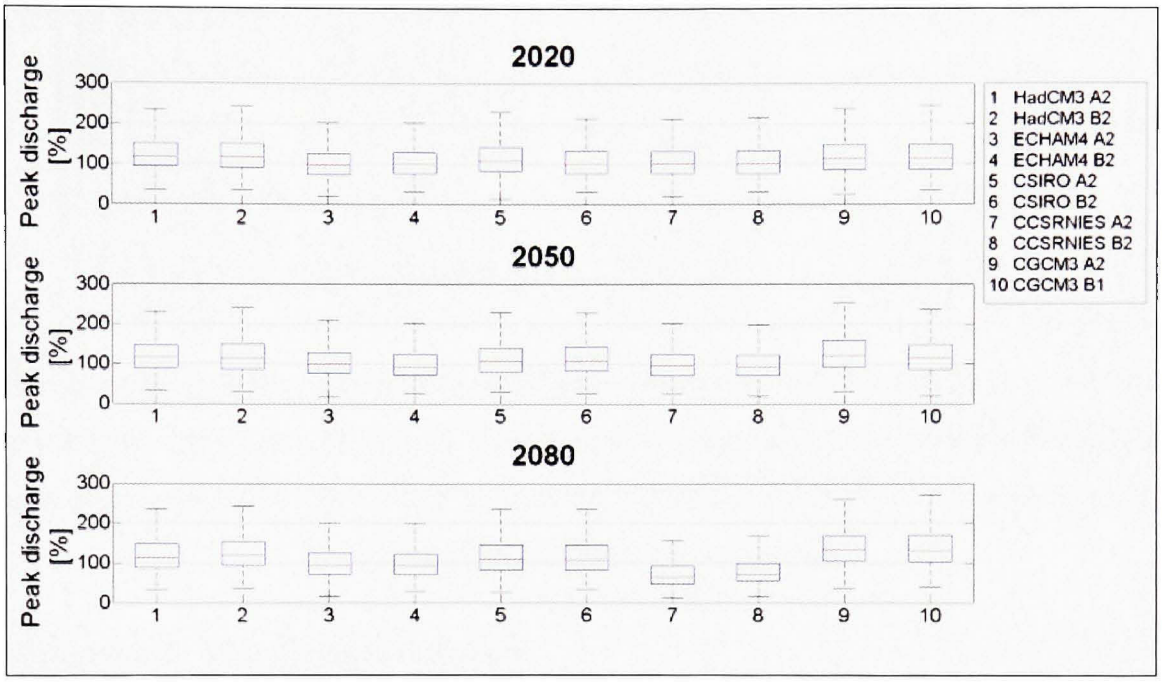


Figure 10. Snowmelt peak discharge for all climate projections, and for the 1961-1990 control period. Results are for the Chute-du-Diable watershed at the 2020, 2050 and 2080 time horizons

For the time of occurrence of peak discharge, Table 2 indicates that models predict either no change or an earlier peak by a maximum of 12 days (from May 11 to April 30 for CSIRO A2) in 2020. The 2050 and 2080 time horizons display much wider variabilities between projections with a time of occurrence as early as March 26 (CCSRNIES A2) and as late as May 5th (CGCM3 B1).

	2020	2050	2080
Control Period	11 May		
HadCM3 A2	10 May (1)	5 May (6)	23 April (18)
HadCM3 B2	10 May (1)	5 May (6)	1 May (10)
ECHAM4 A2	5 May (6)	30 April (11)	19 April (22)
ECHAM4 B2	6 May (5)	28 April (13)	23 April (18)
CSIRO A2	30 April (11)	21 April (20)	4 April (37)
CSIRO B2	30 April (11)	26 April (15)	18 April (23)
CCSRNIES A2	3 May (8)	20 April (21)	26 March (46)
CCSRNIES B2	2 May (9)	21 April (20)	8 April (33)
CGCM3 A2	9 May (20)	4 May (7)	27 April (14)
CGCM3 B1	9 May (2)	6 May (5)	5 May (6)

Table 2. Averaged time of occurrence of peak discharge for all climate projections, and for the 1961-1990 control period. The number in parenthesis indicates how earlier the peak discharge is (in days) when compared to the control period. Results are for the 2020, 2050 and 2080 time horizons

5.4 Uncertainty of hydrologic variables

Probability density functions (PDFs) are shown in Figure 11 for the peak discharge (top row), the time of occurrence of peak discharge (middle row) and for the mean discharge (last row). The PDFs allow the uncertainty of each variable to be better quantified.

Results show that uncertainty increases with time, as PDFs become flatter and inter-model variability becomes larger. A greater variance of the hydrologic variables is also observed as PDFs become generally flatter with time.

For the time of occurrence, all projections suggest an early spring flood but 2 models predict particularly important changes in 2080. The spring flood occurs earlier by about 6 weeks by 2080 with CSIRO A2, as its PDF is shifted to the left. Scenario CCSRNIES A2 also suggests a similar early flood, but its uncertainty is much larger than that of the other models, as shown by a very flat PDF.

For the annual mean discharge, there is less variability as most models project a small to moderate increase. Two exceptions are ECHAM4 A2, which suggest a decrease in mean

discharge and CGCM3 A2, which propose a relatively large increase in mean discharge. In the latter case, half of the years produce a mean discharge larger than the maximum mean discharge currently observed.

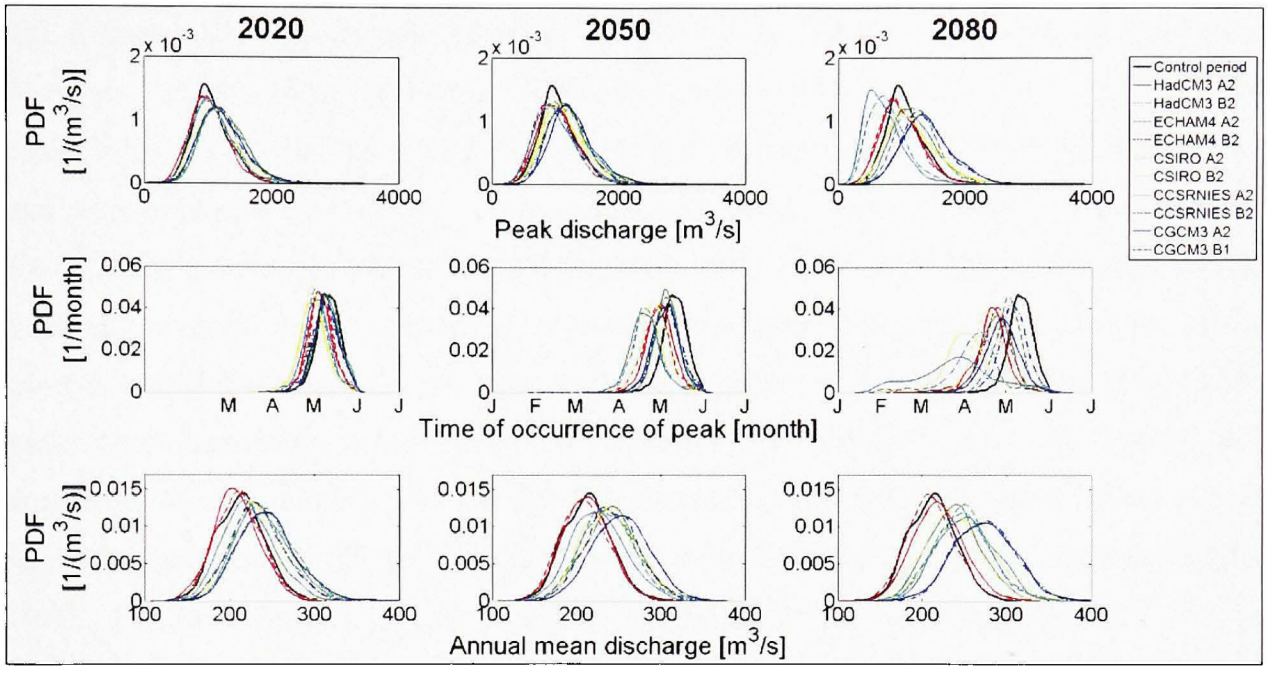


Figure 11. Probability density functions of peak discharge (top row), time of occurrence of peak (middle row) and annual mean discharge (bottom row), for all climate projections, and for the 1961-1990 control period. PDFs are presented for the 2020, 2050 and 2080 time horizons

6. DISCUSSION

The analysis of the potential impacts of climate change on the Chute-du-Diable watershed first reveals that all projections show a temperature increase over the basin for all seasons. Projected changes in precipitation are not univocal, and vary depending on the GCM, GHGES, time horizon, and on the season. Hydrologic changes result from a combination of these variables. Most hydrologic simulations suggest an increase in annual mean discharge, a decrease in peak discharge as well as an early spring snowmelt. There is however much variability between models and scenarios, and this variability increases when an attempt is made to project events for a more distant future. For this reason, any climate change impact

study based on only one GCM or GHGES should be accompanied by a cautionary warning. It has been suggested that the use of two carefully chosen climate projections (dry/hot and wet/cold projections as an example) may be sufficient (e.g. (Brekke *et al.*, 2004; Singh *et al.*, 2006)). However, the process by which climate projections become hydrologic variables is not a linear one, and notable seasonal variability may render the choice of projections incorrect. A good example is the CCSRNIES model. While most other models generate mean hydrographs that are similar in shape (Figure 8), those for the CCSRNIES model are markedly different, particularly in the winter and spring seasons. Figure 5 indicates that CCSRNIES is a 'very warm' and 'moderately wet' model over the winter and has its tendency reversed over the summer to 'moderately warm' and 'very wet'. On the scatter plots, the model is always at the outer edge of the clusters. The warm winters projected by the model drastically reduce snow accumulation and almost remove the spring peak discharge. Winter rainfalls and increased temperatures both result in higher winter runoff, and a reduced peak discharge. Another example of potential hydrological impact is outlined by the ECHAM4 model. Figure 9 shows that ECHAM4 is the only model that predicts decreasing mean annual inflows. ECHAM4 is a 'moderately warm' model that forecasts mild increases in annual precipitation (moderate increases or decreases on a seasonal basis). Even if annual precipitation is on the rise, annual inflows nevertheless decrease due to rising evapotranspiration resulting in a net water loss.

There are several limits to the approach presented in this paper, and uncertainties that have not been taken into account, the most important one probably being the downscaling method. Like all downscaling approaches, the change factor method has its advantages and limitations. The main problem of the method is that it does not modify the temporal and spatial structure of precipitation and temperature data (Diaz-Nieto et Wilby, 2005; Fowler *et al.*, 2005). For example, the time series of precipitation occurrence will remain unchanged. The change factor method will also not modify the variance of temperature data. In some applications, it may be just as important to evaluate changes in the variance of future climate variables and not only changes in the means (Semenov *et al.*, 1998). The weather generator was used to partly offset these downsides by allowing natural variability to be built into the analysis. Through the use of distribution functions, a change in mean precipitation will result

in a change in precipitation variance. Coupled with a stochastic weather generator, the remaining main weakness of the change factor method lies in the unchanged precipitation occurrence structure. While the method will yield precipitation occurrence time series that vary from one year to the next, the transition probabilities from a dry day to a rainy one (and from rainy to dry) remain the same. This means that the approach proposed in this paper would clearly be inadequate for a study on dry spells or water shortages in the dry season. However, for a study focusing on a basin where the most important hydrologic features are linked to snow accumulation and snowmelt, this weakness is not problematic. Diaz-Nieto and Wilby (2005) recommend the change factor method for a broad-brush high-level assessment of climate change impacts and suggest more complex statistical downscaling techniques for the investigation of more subtle changes in the temporal sequencing and persistence of daily events.

On the other hand, the change factor method presents several advantages. It is a simple method to implement, and only requires information from GCMs at the monthly time scale. The change factor method readily takes this monthly information and brings it to the daily scale required for hydrological modelling. Most other statistical downscaling methods need data from GCMs at the daily time scale. Daily-scale data from GCMs is considered less accurate by many (Huth *et al.*, 2001; Palutikof *et al.*, 1997). Bias correction and variance adjustment is needed to obtain merely adequate results, whereas with the change factor method, bias correction is implicitly built into the approach. Moreover, daily-scale GCM data is not available for many GCMs and GHGES. As such, the approach presented in this paper would not be feasible. The same can be said of dynamic downscaling methods (higher resolution climate models). While variables at the daily time scale from higher-resolution climate models are considered more reliable, such data is not easily available. Additionally, most higher-resolution climate models are not run over a global grid, and must use boundary conditions from GCMs. As such, they retain part of the bias of the GCM used to drive the simulation. For the work presented in this paper, changes in precipitation and temperature means are the key variables that need to be estimated and the change factor method is appropriate for this purpose.

The use of only two greenhouse gases emissions scenarios also constitutes a limitation for this study. In their special report on emissions scenarios, the IPCC (Nakicenovic *et al.*, 2000) presented 40 scenarios under four large families (A1, A2, B1, B2). However, the computing cost of running all scenarios in GCMs is prohibitive. As such, the IPCC (Nakicenovic *et al.*, 2000) recommends the use of the A2 (high emissions) and B2 (medium-low emissions) for inter-comparison studies. These two scenarios are the only ones that were common to all of the selected GCMs. The fact that inter-model variability is greater than inter-scenario variability also supports the choice of those two scenarios as being adequate.

Another limitation to the approach presented in this paper is linked to hydrologic model calibration. The approach implicitly assumes that the calibration will hold in the future. Even though, calibration and validation were performed based on the more recent and hotter years on record. Following suggestions made by Dietterick *et al.* (1999) a careful examination of the performance of the hydrologic model over the existing record did not reveal any notable differences in performance between colder/wetter years and hotter/dryer years. This is an indication that the model may perform well for a future climate.

The use of a more physically-based model may help reduce the uncertainty linked to calibration. However, Jones *et al.* (2006) have shown that a 10-parameter lumped model did perform just as well as a more physically realistic but complex spatially distributed model, with respect to annual inflows in a climate change study. A multi-model approach (Georgakakos *et al.*, 2004) may be the best approach to better understand the uncertainty linked to the choice of models. However, it is expected that the large variability induced by the different GCMs, as shown in this paper, will dwarf the one induced by the choice of one hydrological model or specific model calibration over another. That should (and currently is) be investigated in future work.

Finally, it would be interesting to apply the methodology presented in this work to other basins in order to explore the uncertainty linked to physical characteristics, geographical location and climate zones.

7. CONCLUSION

The objective of this work was to estimate the uncertainty respecting the impact of climate change on the hydrology of a Nordic Watershed. This work is the first step in a project that looks at adaptation measures for the Peribonka River basin. Future work will build on the results of this paper, and will look at the impacts of climate change on hydropower production and management practice over the basin.

This work uses a multi-model, multi-projection approach to generate probability distribution functions of future hydrologic variables. This probabilistic approach helps to better define the uncertainty linked to future climate. Results indicate that a large uncertainty exists in all the projected future hydrologic variables. Of all the potential sources of uncertainty, the one induced by the choice of a general circulation model (GCM) is the largest. As such, any impact study based on data from a single GCM should be interpreted with great care. The probability distributions of future hydrologic variables allow the likelihood of future impacts to be estimated. Based on these, it is reasonable to say that the hydrologic behaviour of the Chute-du-Diable basin would be progressively modified over the next century.

While it impossible to predict future flows, one thing that can be done, and should be done, is to include the increased uncertainty of future hydrologic variables into design and management practices.

8. ACKNOWLEDGEMENTS

This paper is part of a larger project funded by the Ouranos Consortium on Regional Climatology and Adaptation to Climate Change (www.ouranos.ca) and the Natural Science and Engineering Research Council of Canada (NSERC). In particular, the authors would like to thank Diane Chaumont of Ouranos, for her help in preparing the climate change projections.

9. NOTATION

The following symbols are used in this paper:

$P_{fut,j,h}$	=	Future precipitation at day j and horizon h
$P_{obs,j}$	=	Observed historical time series of precipitation at day j
$\overline{P}_{fut,m,h}$	=	Simulated future precipitation at month m and horizon h
$P_{cont,m}$	=	Simulated actual precipitation at month m
$T_{fut,j,h}$	=	Future temperature at day j and horizon h
$T_{obs,j}$	=	Observed historical time series of temperature at day j
$\overline{T}_{fut,m,h}$	=	Simulated future temperature at month m and horizon h
$T_{cont,m}$	=	Simulated actual temperature at month m
ω_n	=	Weight of the n^{th} grid point

10. REFERENCES

Bisson, J.L. and Roberge, F. (1983). Prévisions des apports naturels: Expérience d'Hydro-Québec. Paper presented at the Workshop on flow predictions, Toronto.

Boer, George G. (2004). Long time-scale potential predictability in an ensemble of coupled climate models. Climate dynamics, 23, 29-44.

Brekke, Levi. D., Miller, Norman L., Bashford, Kathy E., Quinn, Nigel W.T. and Dracup, John A. (2004). Climate change impacts uncertainty for water resources in the San Joaquin River Basin, California. Journal of the american water resources association, 40(1), 149-164.

Caron, Annie. (2005). Étalonnage et validation d'un générateur de climat dans le contexte des changements climatiques. École de technologie supérieure, Montréal.

Christensen, Niklas S., Wood, Andrew W., Voisin, Nathalie, Lettenmaier, Dennis P. and Palmer, Richard N. (2004). The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado river basin. Climatic change, 62, 337-363.

Diaz-Nieto, Jacqueline and Wilby, Robert L. (2005). A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: Impacts on low-flows in the river Thames, United Kingdom. Climatic Change, 69, 245-268.

Dietterick, Brian C., Lynch, James A. and Corbett, Edward S. (1999). A calibration procedure using topmodel to determine suitability for evaluating potential climate change effects on water yield. Journal of the American water resources association, 35(2), 457-468.

Duan, Q. (2003). Calibration of watershed models. In Q. Duan ,H. Gupta andA. N. Sorooshian (Eds.), Water science and application (Vol. 6, pp. 89-104). Washington D.C.

Environnement Canada. (2004). Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada. Burlington (Ontario): Institut national de recherche scientifique. 148 p.

Fortin, Vincent. (2000). Le modèle météo-apport HSAMI: historique, théorie et application. Varennes: Institut de recherche d'Hydro-Québec. 68 p.

Fowler, H.J., Kilsby, C.G., O'Connel, P.E. and Burton, A. (2005). A weather-type conditioned multi-site stochastic rainfall model for the generation of climatic variability and change. Journal of hydrology, 38, 50-66.

Georgakakos, Konstantine P., Seo, Dong-Jun, Gupta, Hoshin, Schaake, John and Butts, Michael B. (2004). Towards the characterization of streamflow simulation uncertainty throught multimodel ensembles. Journal of hydrology, 298, 222-241.

Hay, L.E., Wilby, Robert L. and Leavesly, H.H. (2000). Comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. Journal of the American water resources association, 36(2), 387-397.

Huth, Radan, Kysely, Jan and Dubrovsky, Martin. (2001). Time structure of observed, GCM-Simulated, downscaled, and stochastically generator daily temperature series. Journal of climate, 14(20), 4047-4061.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change. (2001). Climate change 2001: The scientific basis. Wembley, Royaume-Unis. 882 p.

Jones, Roger N., Chiew, Francis H. S., Boughton, Walter C. and Zhang, Lu. (2006). Estimating the sensitivity of mean annual runoff to climate change using selected hydrological models. Advances in water resources, 29(10), 1419-1429.

Maurer, Edwin P. (2007). Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California, under two emissions scenarios. Climatic change, 82, 309-325.

Merritt, Wendy S., Alila, Younes, Barton, Mark, Taylor, Bill, Cohen, Stewart and Neilsen, Denise. (2006). Hydrologic response to scenarios change in sub watersheds of the Okanagan basin, British Columbia. Journal of hydrology, 326, 79-108.

Muzik, Ivan. (2001). Sensitivity of hydrologic systems to climate change. Canadian water resources journal, 26(2), 233-253.

Nakicenovic, N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T. Y. Jung, T. Kram, E. L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Raihi, A. Roehrl, H-H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor and Dadi, Z. (2000). IPCC Special Report on Emissions Scenarios. United Kingdom and New York, NY, USA. 599 p.

Ouranos. (2004). S'adapter aux changements climatiques. Montréal: Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques. 83 p.

Palutikof, J.P., Winkler, J.A., Goodess, C.M. and Andresen, J.A. (1997). The simulation of daily temperature time series from GCM Output. Part 1: Comparison of model data with observations. Journal of climate, 10, 2497-2513.

Prudhomme, Christel, Jakob, Dörte and Svensson, Cecilia. (2003). Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments. Journal of hydrology, 277, 1-23.

Regonda, Satish Kumar, Rajagopalan, Balaji, Clark, Martyn and Pitlick, John. (2005). Seasonal cycle shifts in hydroclimatology over the western United States. Journal of climate, 18(2), 372-384.

Richardson, Clarence W. (1981). Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. Water resources research, 17(1), 182-190.

Risbey, James S. and Entekhabi, Dara. (1996). Observed Sacremento Basin streamflow response to precipitation and temperature changes and its relevance to climate impact studies. Journal of hydrology, 184, 209-223.

Roy, Luc, Brissette, François, Leconte, Robert and Marche, Claude. (2001). The impact of climate change on seasonal floods of a southern Quebec River Basin. Hydrological processes, 15, 3167-3179.

Semenov, Mikhail A., Brooks, Roger J., Barrow, Elaine M. and Richardson, Clarence W. (1998). Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. Climate research, 10, 95-107.

Singh, Pratap, Arora, Manohar and Goel, N.K. (2006). Effect of climate change on runoff of a glacierized himalayan basin. Hydrological processes, 20, 1979-1992.

Srikanthan, R. and McMahon, T.A. (2001). Stochastic generation of annual, monthly and daily climate data: A review. Hydrology & earth systems sciences, 5(4), 653-670.

Vicuna, Sebastian, Maurer, Edwin P., Joyce, Brian, Dracup, John A. and Purkey, David. (2007). The sensitivity of California water resources to climate change scenarios. Journal of the American water resources association, 43(2), 482-498.

Whitfield, Paul H. and Cannon, Alex J. (2000). Recent variation in climate and hydrology in Canada. Canadian water resources journal, 25(1), 19-65.

Wilby, Robert L., Hay, L.E. and Leavesly, H.H. (1999). A comparison of downscaled and raw output: Implications for climate change scenarios in the San Juan river basin, Colorado. Journal of hydrology, 225, 67-91.

Xu, Chong-Yu and Singh, V. P. (2004). Review on regional water resources assessment models under stationary and changing climate. Water resources management, 18, 591-612.

ANNEXE III

Article 3 : Minville *et al.* (2008b)

Cet article sera soumis en septembre 2008 pour publication dans Hydrology research (anciennement Nordic hydrology).

Minville, Marie, Brissette, François et Leconte, Robert. (2008). Uncertainties of climate change projections and hydrological models: Effects on Nordic watershed discharge. *Sera soumis en septembre 2008.*

Uncertainties of climate change projections and hydrological models: Effects on Nordic watershed discharges

Marie Minville, Eng., Ph.D.

François Brissette, Eng., Ph.D

Robert Leconte, Eng., Ph.D.

Abstract: The combined uncertainty of climate change projections and hydrological models on the annual and seasonal mean flows of a Nordic watershed is evaluated. Two climate projections are incorporated into two hydrological models, for a total of four hydrological simulations. Climate projections over the 2010-2099 period are determined from the delta change approach and dynamic downscaling. The anomalies of the delta change approach and the boundary conditions of the Canadian regional climate model are from the general circulation model CGCM3 for the greenhouse gas emission scenario A2. A conceptual and lumped HSAMI model and a physically-based and distributed Hydrotel model were used for the hydrological simulations. The main objective is to confirm or cancel earlier studies which affirm that the uncertainty of climate projection is greater than the uncertainty of a hydrological model.

The first major conclusion is that climate projection presents a strong signal compared to the hydrological model for the spring flood simulation. The second conclusion is that a hydrological model can generate more uncertainty on the summer flows than the climate projection does. The flows with HSAMI vary little in summer with both climate projections,

whereas they differ considerably with the Hydrotel model. Modeling of the actual evapotranspiration is the most likely cause for this difference.

The combination of a hydrological model and a climate projection is crucial on the hydrological impacts of the climate changes. The linking of a hydrological model to a climate projection should always be realized by evaluating their compatibility and their behaviour in contexts other than those in which the hydrological model was calibrated.

Key words: Climate change, Climate projections, Dynamical downscaling, Hydrological impacts, Hydrological models, Uncertainties.

LIST OF SYMBOLS

The following symbols are used in this article:

$Biais_T$ = Monthly temperature bias between CRCM and observations at the control period

$\overline{P}_{cont,m}$ = Control period precipitation simulated by GCM at month m and horizon h

$P_{fut,j,h}$ = Simulated future precipitation at day j and horizon h

$\overline{P}_{fut,m,h}$ = Simulated future precipitation at month m and horizon h

$P_{\text{CRCM } ajusted}$ = CRCM daily temperature, bias-corrected

$PoWDT$ = Precipitation threshold of observations

$P_{obs,j}$ = Observed precipitation at day j

$PsWDT$ = Precipitation threshold of CRCM

$\overline{T}_{cont,m}$ = Control period temperature simulated by GCM at month m and horizon h

$T_{fut,j,h}$ = Simulated future precipitation at day j and horizon h

$\overline{T}_{fut,m,h}$ = Simulated future temperature at month m and horizon h

T_{MRCC} = CRCM daily temperature, direct output

$T_{MRCC\ ajustée}$ = CRCM daily temperature, bias-corrected

T_{Obs} = Daily observed temperature

$T_{obs,j}$ = Observed temperature at day j

s = Scaling factor

INTRODUCTION

The water resource sector would be affected by climate change (Environnement Canada, 2004; 1996; Srikanthan et McMahon, 2001; Xu et Singh, 2004). For the Nordic watersheds, the impacts are generally quantified according to the changes in the annual and seasonal flows.

Modeling of the hydrological impacts of climate change requires climate projections on a watershed scale, at fine resolution. These projections are obtained by downscaling the general circulation models' (GCM) climate data. As mentioned by Salathé *et al.* (2007), research aimed at understanding the climate dynamics at a regional scale has increased confidence in climate projections. Consequently, they conclude that climate modeling is adequate for various applications in hydrology, and that the challenge resides in linking climate projections to the various impact evaluations tools.

The uncertainty of the hydrological impacts of climate change according to several MCGs has been approached in the literature (Maurer, 2007; Minville *et al.*, 2008; Prudhomme *et al.*, 2003). However, an analysis of the combined uncertainty of the hydrological model and a climate projection has received less attention. Prudhomme *et al.* (2003) suggest that the greatest uncertainty for a hydrological impact study is the climate model. They mention that a watershed's characteristics would not be sufficient to mask the geographical pattern of the climatic signal. However, their work referred to only one downscaling method and one hydrological model. The use of more downscaling methods was among their recommendations for future work.

Hulme and Carter (1999) concluded that a systematic treatment of the climate projections' and hydrological responses' uncertainty is necessary for the development of water resource management policies. However, hydrological model validation under climate projections is problematic because of the absence of observations with which to establish comparisons. Xu and Singh (2004) propose that distributed and physically-based hydrological models are suitable, compared to empirical or conceptual lumped models, but that they require considerable parameterization. Jones *et al.* (2006) remark that, although it is often assumed that the physically-based models are to be privileged for climate change studies, this assumption has never been rigorously tested.

Jiang *et al.* (2007) evaluated the potential impacts of climate changes with six monthly water balance models, for a watershed in subtropical climate. They concluded that all of the models adequately simulated the hydrological regimes for the current climate, but that great differences in the models' flows appeared with climate changes projections. A hydrological

models' uncertainty concerns their transferability in the future (Dietterick *et al.*, 1999). Hydrological models play a central role in the evaluation of future water resource availability. The relevance of using models calibrated according to the recent past climate for impact studies is to be questionable (Bergström et al., 2002).

Jones *et al.* (2006) compared the sensitivity of three hydrological models to the precipitations and evapotranspiration changes, for watersheds in a tropical and arid climate. The sensitivity of the flows was calculated independently for precipitations and the evapotranspiration, in order to quantify the uncertainty of the hydrological model for the catchments that are not influenced by snow accumulation and snowmelt processes.

The hydrology of a watershed in the mid and high latitudes is dominated by snow accumulation and snowmelt. It is influenced by the combined effect of the changes of temperatures and precipitations. This regime is conditioned in winter by the snow accumulation, in spring by the snowmelt and in summer-autumn by evaporation, evapotranspiration and rainy events. Dibike and Coulibaly (2005) concentrated on the hydrological impacts of climate changes for a Nordic watershed, according to the climate projections produced by two statistical downscaling methods. The hydrological impacts of these projections were evaluated with both a semi-distributed and a distributed conceptual hydrological model. They conclude that pairing the hydrological models with climate projections does not give univocal results for the annual mean flows. Moreover, they affirm that the choice of a combination of a downscaling method and a hydrological model is critical for the conclusions of a hydrological impact study. However, their study did not

investigate the share of uncertainty associated with the hydrological models and the downscaling methods, since the discussion was more centered on the downscaling methods.

The purpose of the study presented in this article is to reveal the uncertainty that is inherent when combining a climate projection and a hydrological model, and how its effect on the annual mean flows of a Nordic watershed. Two climate projections are incorporated into two hydrological models, for a total of four hydrological simulations. The hydrological regimes of each combination of a climate projection and a hydrological model are analyzed. The evaluation is carried out by comparing the statistics of the mean annual and seasonal flows on three future periods. The interest is to confirm, or cancel, within the framework of a discussion, previous studies which state that the uncertainty of climate projection is greater than the uncertainty of the hydrological model.

Climate projections are downscaled from the same general circulation model (MCG) and greenhouse gas emission scenario (GHGES). However, the "physics" subjacent of these climate projections is diametrically opposite. The monthly anomalies of the MCG are initially applied to the observations to produce the first climate projection according to the delta change approach. The second climate projection comes from a regional climate model (CRM) nested by the MCG for the same GHGES. The hydrological regimes are simulated according to conceptually and physically different modeling approaches. Each climate projection feeds a lumped conceptual hydrological model and a distributed physically-based hydrological model.

The article first presents the research background, and then the methodology is explained. In the third section, the climate data and hydrological regimes are presented, interpreted and discussed. The principal conclusions and recommendations comprise the last section.

STUDIED AREA

The Chute-du-Diable watershed, a sub-basin of the Péribonka river watershed (Figure 1), is located in the southern center of the province of Quebec, in Canada. Its surface is of 9700 km^2 and its territory is mainly uninhabited boreal forest.

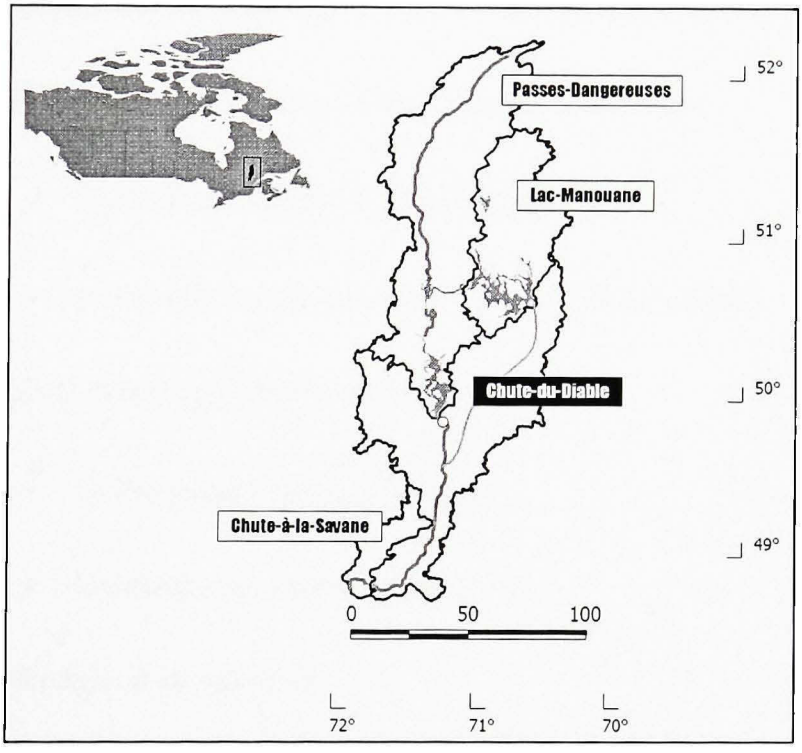


Figure 1. Péribonka river watershed and principal sub-basins

The climate of this region is moderate. According to the records for 1953-2003, the annual mean temperature is 0.5°C and annual mean precipitations is 962 mm, with 40% falling as snow. The period of freezing, when the temperature is under 0°C, is approximately from November to April. Thirteen meteorological stations are on or close to the watershed.

The basin is located in the mid latitudes and its hydrological regime is dominated by snow accumulation and snowmelt. The flows are controlled by two dams and hydroelectric stations located completely downstream and upstream on the Peribonka river. They are managed by Rio Tinto Alcan. The annual mean flow of the Chute-du-Diable basin is 210 m^3/s. The winter (DJF) flows account for 9% of the annual flows, whereas the spring flows (MAM) account for 36%, those of summer (JJA) for 31% and the autumn flows (SON) for 24%.

METHODS

The methodology followed to complete this work is summarized in three major steps:

i. Calibration and validation of the hydrological models
   - Conceptual lumped model (HSAMI)
   - Physically-based and distributed model (Hydrotel)

ii. Climate change projection preparation
   - Deltas change method (Deltas)
   - Dynamical downscaling (CRCM)

iii. Hydrological simulations
   - HSAMI-Deltas
   - Hydrotel-Deltas
   - HSAMI-CRCM
   - Hydrotel-CRCM

CALIBRATION AND VALIDATION OF THE HYDROLOGICAL MODELS

HSAMI model

The HSAMI model has been used by Hydro-Quebec to forecast flows for more than twenty years. It simulates the natural inflows of a managed watershed or the discharge of a basin where the flows are natural, according to observations or weather forecasts, such as of minimum and maximum temperatures, precipitations and sun radiation. It is a lumped conceptual model including three linear reservoirs in cascades which generate the runoff from surface and intermediary unit hydrographs. The main simulated processes are the evapotranspiration, the interception of the rain and snow, the snow melt and the vertical and horizontal flows (Bisson et Roberge, 1983; Fortin, 2000; St-Hilaire *et al.*, 2003). Simulation can be run on an hourly to a daily time step.

Hydrotel model

The Hydrotel model (Fortin *et al.*, 2001a; Fortin *et al.*, 2001b) was developed by the Institut national de recherche scientifique secteur Eau, terre et environnement (INRS-ETE). It is used operationally by the Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) for forecasting the flows of hydraulic works managed by the government of the province of Quebec in Canada.

Hydrotel is a distributed and physically-based model which integrates five sub-models: accumulation and melt of snowpack, potential evapotranspiration, vertical water budget, flow on the sub-watershed, and channel flow. Various options are offered to the user for the simulation of each of these hydrological processes. The hydrological processes were simulated with the options compiled in Table 1.They were validated for the hydrological conditions of a Province of Québec watershed (Turcotte *et al.*, 2007).

Table 1. Models used for simulation of the hydrological processes in Hydrotel

Sub-model	Options
Accumulation and melt of snowpack	Mixed approach: degree days and energy budget (Turcotte et al., 2007)
Potential evapotranspiration	Hydro-Québec (Fortin *et al.*, 2001a)
Vertical water budget	BV3C (Fortin *et al.*, 2001a)
Flow on sub-watershed	Kinematic wave equation
Channel flow	Kinematic wave equation

The meteorological data can be introduced into the model either in the form of meteorological stations or in a grid form. In this study, the data were imported in the form of a grid interpolated by kriging.

Calibration and validation

The capacity of the hydrological models to reproduce the observations is crucial within the framework of this study, in order to verify that the differences in the flows are not only attributed to the bias induced by the calibrated parameters. Calibration of the hydrological models was carried out with the objective of representing the behaviour of the watershed on a seasonal base. The Hydrotel model calibration was performed manually by sensitivity analysis. The parameters of the HSAMI model were calibrated using an automatic procedure with the Shuffled Complex Evolution optimization method (Duan, 2003) implemented in the model.

Table 2 presents the Nash-Sutcliffe criteria and the differences in percentage between the observations and simulations of the spring peak flow, and the times of peak and annual volumes over the period 1979-2003. The Hydrotel model reproduces annual volumes better than HSAMI model. However, the HSAMI model has a higher Nash-Sutcliffe criterion and it better reproduces the mean peak in spring.

Table 2. Calibration and validation performance for the HSAMI and Hydrotel hydrological models

Hydrological model	Nash-Sutcliffe		Difference between observations and simulations		
			Spring peak flow	Time of spring peak flow	Annual volume
	Calibration	Validation	(%)	(jour)	(%)
HSAMI	0,92	0,89	-2	- 3	+ 8
Hydrotel	0,85	0,78	- 18	+ 5	0

The mean annual hydrographs and the envelopes of the flows over the calibration-validation period are presented in Figure 2 for both hydrological models.

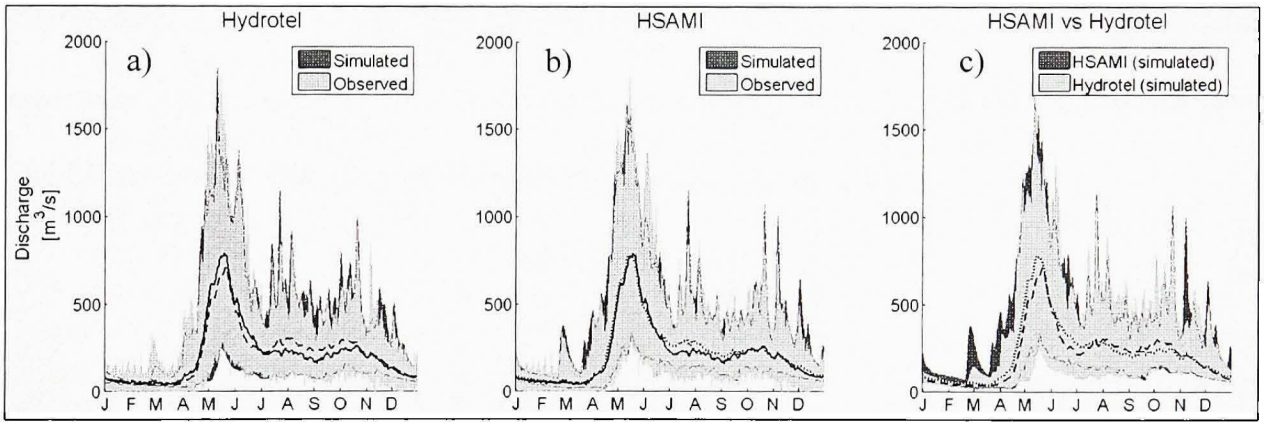


Figure 3. Envelopes of the observed and simulated hydrographs with two hydrological models: a) Hydrotel and b) HSAMI. The line represents the mean hydrograph (full line for the observed flows and dashed line for the simulated flows). **c) Envelopes of the hydrographs simulated with Hydrotel and HSAMI hydrological models.** The lines represents the mean hydrographs ("- - -" for HSAMI and "· · ·" for Hydrotel).

Figures 2a and 2b show the hydrographs simulated by the two models compared to the observations. The Hydrotel model underestimates the spring flows and over-estimates the

flows in summer and autumn. The HSAMI model over-estimates the flows in summer and autumn. Figure 2c presents the hydrographs simulated by Hydrotel compared to those by HSAMI. The HSAMI model has more variability than the Hydrotel model for the spring flood modeling. Moreover, it generates winter peaks, as well as higher winter flows. During summer and autumn, the Hydrotel model generates flows larger than those with HSAMI model. Analyses show that the mean seasonal flows in spring and winter are statistically different (T-test with p= 5%) between the models.

CLIMATE CHANGE PROJECTIONS PREPARATION

The climate data used come from observations and a regional climate model (CRM) grid, superimposed on Figure 3. The data observed were interpolated by kriging on a 10 km grid. The CRM climate data grid has a resolution of approximately 45 km.

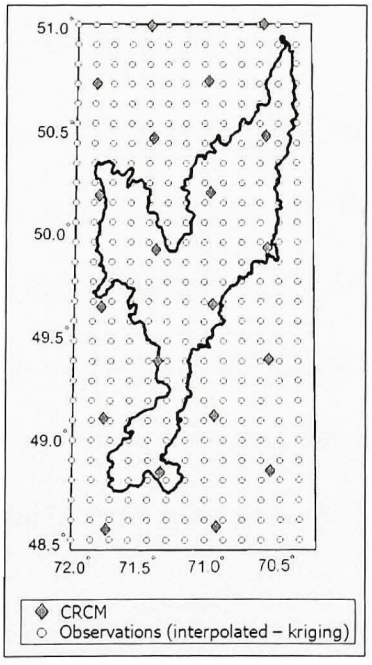


Figure 4. CRCM and kriging observation grids

The mean observed climate data on each equivalent tile of the CRM were calculated, in order to obtain similar grids for the hydrological simulations and to compare the results.

Delta change approach

The climate projections of the delta change approach (Diaz-Nieto et Wilby, 2005; Hay *et al.*, 2000; Minville *et al.*, 2008; Prudhomme *et al.*, 2003) were carried out with the monthly climate data of the General circulation model CGCM3 (McFarlane et al., 1992) for the (GHGES) A2 greenhouse gas emission scenario (Nakicenovic *et al.*, 2000). An A2 scenario is a mean scenario which corresponds approximately to a CO_2 tripling in the atmosphere in 2080, compared to the control period 1961-1990. The monthly anomalies of the MCG, also called "deltas", between the control period 1961-1990 and the future periods 2020 (2010-2039), 2050 (2040-2069) and 2080 (2070-2099) were extracted and added to the observed meteorology realised on each equivalent tile of the CRCM of the 1961-1990 period. Climate projections are stationary through each period.

This technique applies to the observed data and the difference (or the quotient) between the future monthly data simulated for a given horizon and the simulated monthly data of the control period. It is a manner of disturbing the means, without modifying the variance, in order to prepare daily projections usable in hydrological modeling on a watershed scale. Equations 1 and 2 represent the delta change method for the temperatures (equation 1) and precipitations (equation 2). The indices are specified in the list of symbols.

$$T_{scen,m,h} = T_{obs,j} + (\overline{T}_{scen,m,h} - \overline{T}_{cont,m}) \quad [1]$$

$$P_{scen,m,h} = P_{obs,j} \times (\overline{P}_{scen,m,h} \div \overline{P}_{cont,m}) \quad [2]$$

The monthly anomalies of the MCG, or deltas, were realised on several tiles of the MCG, as detailed in Minville *et al.* (2008).

Dynamical downscaling

The climate data used within the framework of this study come from the Canadian regional climate model (CRCM) (Caya et Laprise, 1999; Plummer *et al.*, 2006). The boundary conditions are prescribed by the Canadian general circulation model CGCM3 (McFarlane et al., 1992) under the GHGES A2 (Nakicenovic et al., 2000). The 1961 to 2099 climate projection is in a transitory regime.

According to Fronzek and Carter (2007), using the direct data of a CRM in impact studies should be avoided because their bias is too strong. Indeed, the precipitations and mean temperatures of the control period of the CRCM compared to the observations have presented bias. The monthly minimal temperatures of the CRCM, compared to the observations, are underestimated every month, by up to 6 °C in April. The maximum temperatures are underestimated in summer and autumn -- by up to 4 °C in August. Precipitations are over-estimated in spring, in summer and autumn, by up to 25% in June, and they are underestimated in winter, by up to 18% in December.

The CRCM temperature and precipitation data were corrected over the period 1961-2099, adjusting for the bias between the CRCM and the observations at the 1961-1990 period. For the control period, the monthly temperatures associated with each tile of CRCM (T_{CRCM}) and the mean of the kriging tile observations (TObs) were calculated. The bias (Bias_T) between the observed mean temperature and the simulated mean temperature (equation 5) for the control period was applied to the temperatures of the CRCM 1961-2099 (Equation 6). The

temperatures simulated by the CRCM, bias-corrected with each tile (adjusted T_{CRCM}), have the same monthly means as the observation temperatures for each tile.

$$Bias_T = T_{CRCM} - T_{Obs} \quad [3]$$

$$T_{ajusted\,CRCM} = T_{CRCM} + Bias_T \quad [4]$$

The precipitations (P_{CRCM}) were bias-corrected according to the LOCI method (Equation 7) adapted from Schmidli *et al.* (2006). The frequencies and intensities of the precipitations for each tile of the CRCM were adjusted locally so that they correspond to the intensities and mean frequencies of the observations for that tile. The method initially requires that the monthly frequencies (monthly fraction of the rainy days) of the CRCM are equalized at the frequencies of the observations. The median number of rainy days observed in one month (daily precipitations higher than the PoWDT threshold of 1 millimeter) is calculated and the threshold of daily precipitations of the CRCM PsWDT is found, which makes it possible to obtain the same number of rainy days. Next, a monthly factor, s, is generated to equalize the monthly means precipitations of the CRCM at the control period to the monthly mean precipitations of the observations. The monthly thresholds (PsWDT) and factors (s) that were found to adjust the control period precipitations are then re-used to adjust the precipitations of the 1990-2099 period.

$$P_{ajusted\,CRCM} = \begin{cases} if\ P_{CRCM} < PoWDT \\ PoWDT + s\ (P_{CRCM} - PsWDT) \\ else \\ 0 \end{cases} \quad [5]$$

With this method, the CRCM corrected monthly precipitations have the same intensities and monthly mean frequencies as the observed precipitations of the control period. One disadvantage is that this method supposes that the CRCM bias in the future is the same as for the control period.

HYDROLOGICAL SIMULATIONS

Hydrological simulations were completed by combining the HSAMI and Hydrotel hydrological models with climate projections constructed with the delta change approach and by the adjusted CRCM, for a total of four hydrological simulations.

The hydrological regimes with these combinations, for the control period and with the climate changes horizons 2020, 2050 and 2080, are compared and statistically analyzed according to the mean annual and seasonal flows. Moreover, the changes in monthly flows of each combination at the future horizons, compared to the control period, are calculated.

RESULTS

CLIMATE CHANGE PROJECTIONS

Figures 4 and 5 show the monthly mean temperatures and precipitations at the watershed according to the CRCM, in black, and the delta change method, in gray. The boxplots represent the variability of the annual mean temperatures over the 30 years composing each period: the control period (1961-1990) and future horizons (2020, 2050 and 2080). At the control period, the climate data with the delta change approach are the observations (before adjustment with the deltas anomalies).

Tables 3 and 4 complement figures 4 and 5 by identifying the annual and seasonal means and variances for which the differences between the CRCM and the deltas are statistically significant (with a threshold of 5%).

Temperatures

At the control period, the monthly mean temperatures of the deltas and the CRCM are the same because of the correction of the monthly mean bias. However, their annual and seasonal variability is different (table 3). The monthly temperatures of the CRCM in summer and autumn are more variable than the observations.

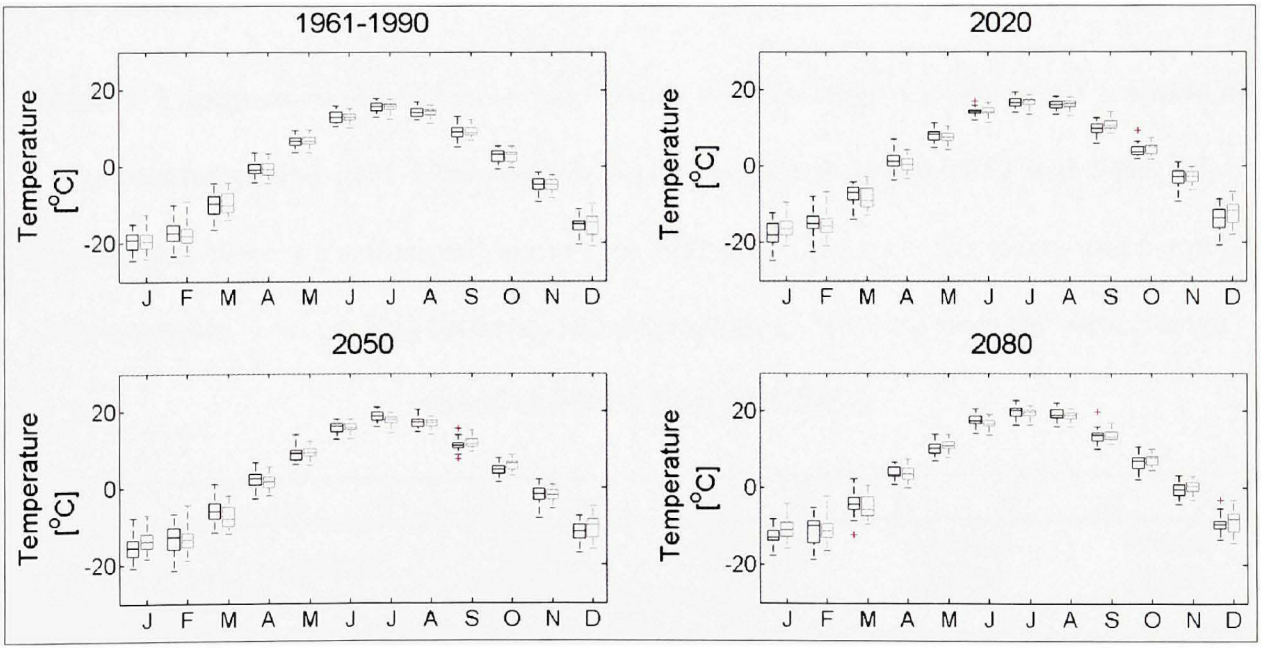


Figure 5. Monthly mean temperatures in the watershed for the control period 1961-1990 and the future periods with horizons 2020, 2050 and 2080. The black boxplots represent the CRCM and the gray boxes represent the delta change approach.

For the future horizons, the temperatures associated with both the deltas and the CRCM present tendencies, which are most accentuated in 2080. In spring and summer, the median

and the higher quartile of temperatures of the CRCM are higher than the projection with the delta change approach. In autumn and winter, the opposite situation occurs. The median and the last quartile of the monthly deltas' mean temperatures are systematically higher in the autumn and winter, in September to January, that projections with the CRCM. The median of the temperatures determined with the deltas is beyond the 75e percentile of the temperatures of the CRCM, which indicates that 25% of the monthly mean temperatures of the deltas are higher than those of the CRCM. The variability of the annual and seasonal mean temperatures of the deltas and the CRCM is statistically different at each of the horizons (table 3). The annual mean temperatures do not differ statistically, whereas they differ in certain seasons.

Table 4. Comparison of the annual and seasonal mean temperatures and variances at the control period 1961-1990 and for the future periods 2020, 2050 and 2080. "x" indicates that there is a statistically significant difference (T-test for the means and F-test for the variances, with p= 5%) between climate projections resulting from the delta change method and those from the CRCM.

	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
	Annual		Spring (MAM)		Summer (JJA)		Autumn (SON)		Winter (DJF)	
1961-1990		x		x		x		x		x
2020		x	x	x		x	x	x		x
2050		x		x		x	x	x	x	x
2080		x		x	x	x		x		x

Precipitations

At the control period, precipitations of the CRCM have the same means and monthly frequencies as the observations because of the bias correction. However, they do not have

same variability. Table 4 shows that the differences in variability on the annual and seasonal time scales are statistically significant at the control period.

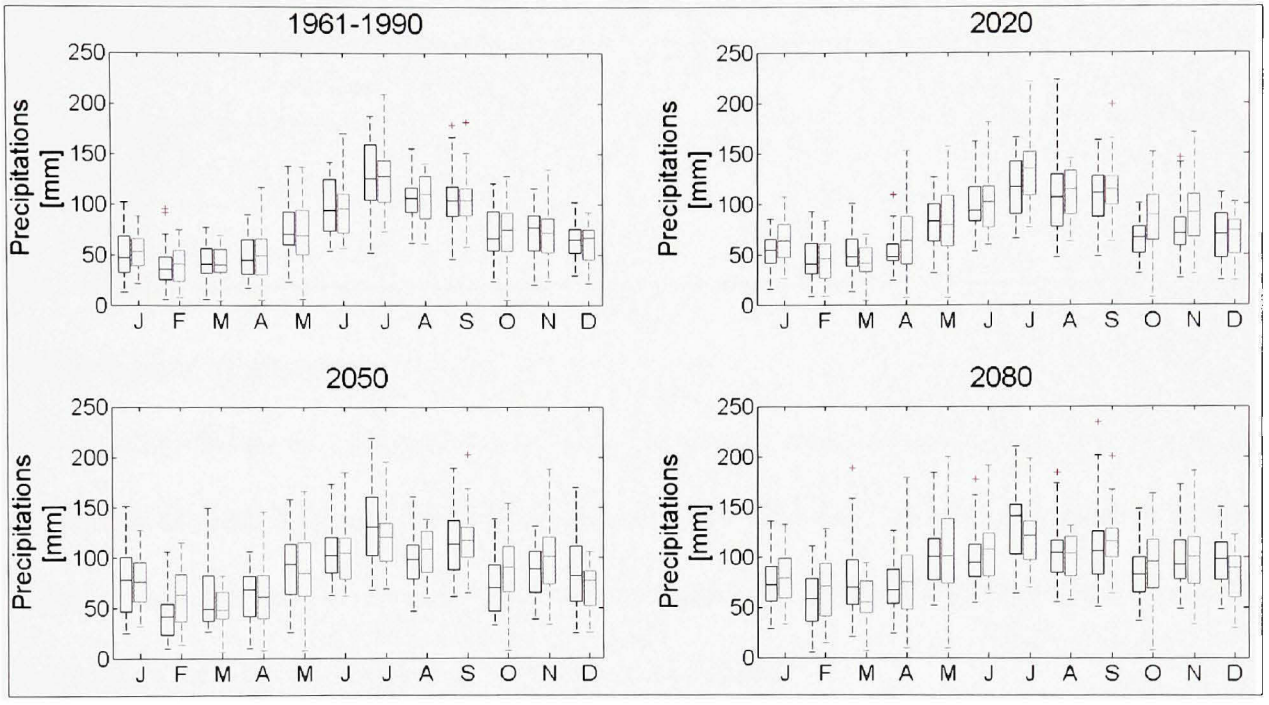


Figure 6. Monthly mean precipitations in the watershed for the control period 1961-2099 and the future periods 2020, 2050 and 2080. The black boxplots represent the CRCM and the gray represent the delta change approach.

At the future periods, mean precipitations with the deltas and the CRCM are generally not statistically different, with a few exceptions. Precipitations in autumn are greater with the deltas than with the CRCM in 2020 and 2050. In 2020, annual mean precipitations with the deltas are higher than with the CRCM. The variability of annual mean and seasonal precipitations is different at each horizon (table 4).

Table 5. Comparison of the annual and seasonal mean precipitations and variances at the control period 1961-1990 and at the future periods 2020, 2050 and 2080. "x" indicates that there is a statistically significant difference (T-test for the means and F-test for

the variances, with p= 5%) between climate projections resulting from the delta change method and the CRCM.

	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ	μ	σ
	Annual		Spring (MAM)		Summer (JJA)		Autumn (SON)		Winter (DJF)	
1961-1990		x		x		x		x		x
2020	x	x		x		x	x	x		x
2050		x		x		x	x	x		x
2080		x		x		x		x		x

HYDROLOGICAL REGIMES

The impact studies of risk analysis of water resources must compose with the bias of the hydrological models. These studies require values of "absolute" flows, compared to relative changes with the control period, which can disregard the bias of the hydrological model (by supposing that a bias in the past is the same in the future).

This section initially presents the annual mean hydrographs for the four combinations of hydrological models and climate projections. Thereafter, the mean annual and seasonal flows and the confidence intervals on the mean are shown in order to highlight statistically significant differences between the combinations. This representation also permits the importance of the model's effect and projection on the flows to be visualized. Lastly, the monthly relative changes of the flows in each period, compared to the control period, are presented.

Annual hydrographs

Figure 6 shows the annual mean hydrographs for the hydrological combinations of models and climate projections, at the control period and at the 2020, 2050 and 2080 horizons'

climate changes. The purpose of analyzing the hydrographs is to detect if a climate projection or the hydrological model has more impact on the flows.

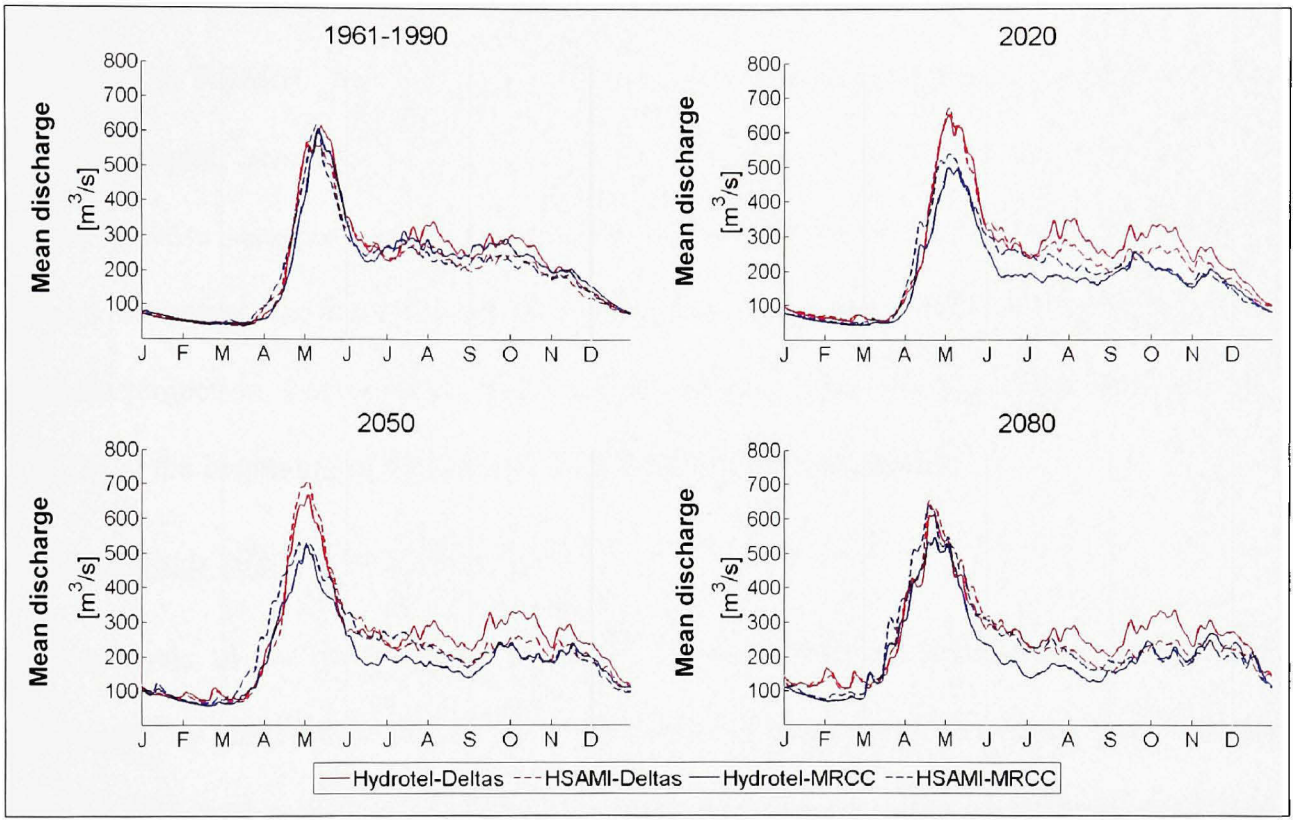


Figure 7. Means hydrographs of the control period 1961-1990 and the future periods 2020, 2050 and 2080, for each combination of climate projection and hydrological model.

Control period 1961-1990

The control period hydrographs illustrate the behaviour of the hydrological models subjected to the same monthly means climate variables, but resulting from different downscaling methods. These hydrographs allow the future hydrological regimes to be interpreted by relativizing them according to the bias of the hydrological models and the effect of climate projection.

The annual mean hydrographs (Figure 6) of the control period reflect the points identified between the hydrological models at the period of calibration and validation: over-estimation of the flows in summer and the beginning of the spring flood delayed with Hydrotel compared to HSAMI. There is little difference in the flows in summer and autumn with the HSAMI model, generated by the deltas method or by the CRCM. On the other hand, the flows at these seasons vary more according to the climate projections with the Hydrotel model. However, the hydrological models behave in the same manner in relation to the climate projection. For example, the flows are always higher with the deltas than with the CRCM at the beginning of the summer with both hydrological models.

Future periods 2020, 2050 and 2080

The analysis of the hydrographs in winter indicates that the hydrological regimes are dominated by the climate projections. The flows are higher with the deltas than with the CRCM with both hydrological models. However, the reaction of the hydrological models to the climate projections is not the same -- the Hydrotel model amplifies the direction of the change of climate projections. The flows with the combination Hydrotel-Deltas are higher than those of the HSAMI-Deltas, whereas the flows with the Hydrotel-CRCM combination are lower than those of the HSAMI-CRCMs. This serves to affirm that the HSAMI model is not very sensitive to climate projections and/or that the Hydrotel model amplifies the effect of climate projections. This behaviour of the Hydrotel model was not observed at the control period, which indicates that an uncertainty remains in the hydrological model at this season.

The hydrographs of spring at the future horizons indicate that climate projection conditions the peak flow. The flows are more influenced by climate projection that by the hydrological

model. They increase more with the deltas than with the CRCM, with both hydrological models. Another remark is that the amplitude of the spring flood is systematically smaller with the Hydrotel model than with HSAMI for the same projection. Also, HSAMI presents a greater variability in the peak flow: the rising limb of mean peak flow is early and the falling limb is late. The peak flow precocity with the HSAMI model had been identified at the control period, but not the late-falling limb. This greater variability in the peak flow is more accentuated with the CRCM data, which are also more variable. In short, a more variable mean peak flow would result from the combined effect of the hydrological model and climate projection.

In the summer, the predominance of climate projection on the mean hydrograph is less obvious than at the other seasons, with the detriment of the hydrological model. The principal observation is that the HSAMI model is rather insensitive to the climate projection at this season, in particular in 2050 and 2080. Hydrographs with HSAMI and the two climate projections are located between the hydrographs with Hydrotel. The hydrographs with Hydrotel are thus very divergent according to climate projection. Hydrotel is thus more sensitive to climate projection than HSAMI in summer. The effect of the Hydrotel model is to amplify the impact of climate projection on the hydrograph. On the one hand, the flows are higher with Hydrotel-Deltas than with the other combinations, on the other hand, they are weaker with Hydrotel-CRCM than with the other combinations. In the summer, there is more uncertainty in the hydrological model than in the climate projection with the distributed physically-based Hydrotel model. This behaviour was not observed in the control period.

Statistical comparisons of annual and seasonal mean flows

Figure 7 shows the annual and seasonal mean flows of the climate projection and hydrological model combinations. The circle represents the mean flow at each period and combination, and the line the confidence interval at 95% on the mean. The confidence intervals highlight the statistically significant differences between the flows in several combinations: when the confidence intervals of combinations do not intersect, the mean flows are statistically different (significant at 5%).

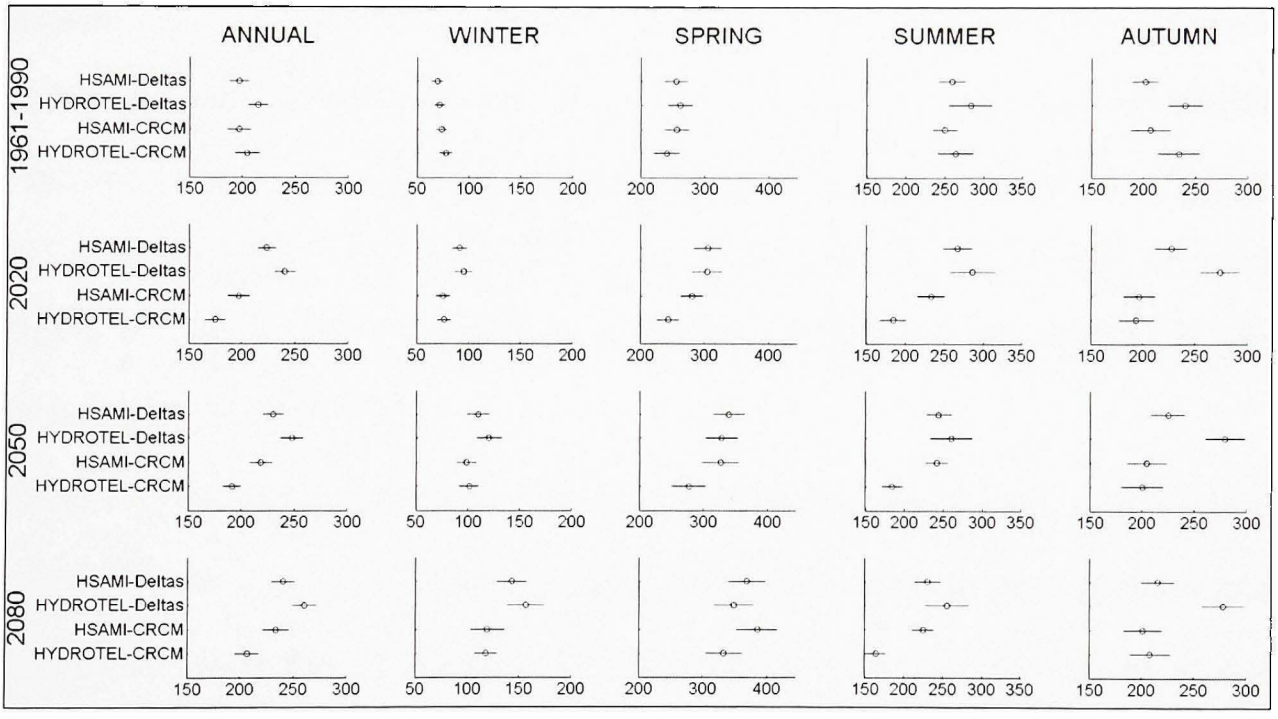


Figure 8. Annual and seasonal mean flows and confidence interval on the means of the combinations of climate projection and hydrological model in the control period 1961-1990 and for horizons 2020, 2050 and 2080

Control period 1961-1990

Figure 7 shows that the annual and seasonal mean flows are generally coherent with each other for the same hydrological model, with climate projections of different origins. For example, the flows with Hydrotel are higher than the flows with HSAMI with both climate projections, except in spring. These differences in the flows could be ascribable to the calibration of the models.

Moreover, the mean flows for the control period of the four combinations are not statistically different. One exception is the mean flow in autumn with HSAMI-Deltas, which presents a statistically significant difference with the flows of Hydrotel-Deltas and Hydrotel-CRCM. This difference can be ascribed to over-estimation of the Hydrotel model at the calibration and validation period. The reason that the Hydrotel model would not have the same behaviour with the CRCM projection is discussed in detail in the section "Results interpretation and discussion".

Figure 7 highlights that the relative differences between the combinations with the same climate projection in two hydrological models are equivalent. These can be attributed to bias due to model calibration. The seasonal flows with the CRCM are systematically higher than with the deltas method for the same hydrological model, despite the fact that of the climate data have the same means.

Future periods 2020, 2050 et 2080

At the future periods, the first observation is that despite the few significant differences in the annual and seasonal mean climate variables (tables 3 and 4), the mean annual and seasonal flows are statistically different for some of the hydrological combinations of models and

climate projections. The annual mean flows with Hydrotel-CRCM are statistically different from the flows of the other combinations, because of the lower seasonal flows.

Another observation is that the flows with the deltas vary little in spring and summer according to the hydrological model used, compared to the flows simulated with the CRCM projection. The hydrological models are thus more sensitive to the CRCM. The models' calibration was carried out with the observations, which constitute the base of the deltas. This explains the varying different behaviour of the hydrological models with CRCM. The differences between the mean flows of HSAMI-CRCM and Hydrotel-CRCM at these seasons are statistically significant in 2020. Moreover, the flows in summer with Hydrotel-CRCM are different statistically from the flows of the other combinations. The opposite situation is noticed in autumn, because the hydrological models are less sensitive to the data of the CRCM than with the deltas, at all the horizons. The mean flows in autumn with Hydrotel-Deltas differ (statistically significant) compared to the flows from the other combinations.

Changes in monthly mean flows

The results described above offer an overall portrait of the flows from the combinations of hydrological models and climate projections. However, it could be argued that they do not take the bias of the hydrological models into account. Figure 8 exposes the relative changes in the monthly mean flows for each combination, compared to the same combination at the control period. Thus, if a model under- or over-estimated the flows at the calibration-validation period, this "error" would be cancelled. This representation assumes that the bias of the model in the future is the same as at the control period.

The upper part of figure 8 illustrates the bias of the HSAMI and Hydrotel hydrological models, between the flows observed and the flows simulated with the observed meteorology at the control period. Observations similar to the analysis of the calibration and validation results arise: the HSAMI model over-estimates the flows each month, more so during summer. The Hydrotel model underestimates the flows from January to July, and over-estimates them between July and December. The annual budget is null, suh as is reported and commented on in table 2 above.

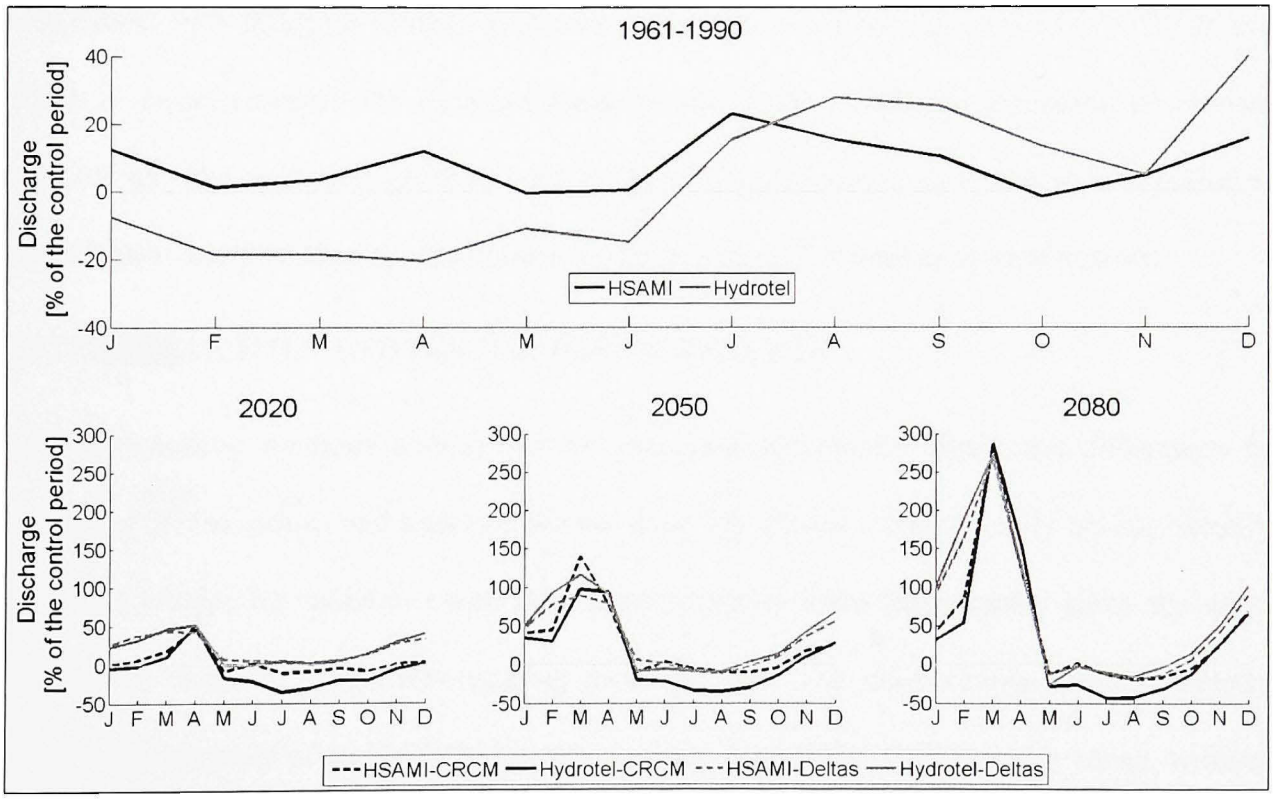


Figure 9. Monthly mean flows, expressed as a percentage of the control period. The upper graph illustrates the differences between the observed and simulated flows of the control period 1961-1990. The lower graphs illustrate the differences between each future period 2020, 2050 and 2080, and the control period 1961-1990.

Graphics in the lower part of Figure 8 show the changes in the monthly mean flows of each combination at the 2020, 2050 and 2080 horizons, compared to the control period. A general remark is that all of the combinations tend to cause flow increases in winter and in spring compared to the control period, and reductions or the statusquo in summer. In autumn, the signal of the change is not univocal, with reductions or increases. These changes are amplified between horizons 2020 and 2080.

More specifically, it appears that the HSAMI model involves changes of the same order of magnitude with different climate projections (except in winter), in particular in 2050 and 2080. In direct contrast, the Hydrotel model produces flow changes depending on climate projections. The reduction in flows with Hydrotel-CRCM compared to the control period is more significant than the other combinations from May to September at each horizon.

INTERPRETATION AND DISCUSSION OF RESULTS

The downscaling methods employed here generated statistically significant differences in variances for the annual and seasonal climate data. The means were generally not statistically different, except for isolated exceptions. Dissimilarities were foreseeable, given the great conceptual disparity of the downscaling methods used. The delta change method directly applies the anomaly of an MCG to the observations. It modifies their monthly mean, without modifying their variance (Diaz-Nieto et Wilby, 2005). In addition, the regional climate model uses the data of the MCG only to impose the boundary conditions. The climate processes are simulated at a fine resolution according to the physics and thermodynamics equations, and based on the geographical characteristics of the region. The delta change method, therefore, is a technique of simplistic downscaling compared to the more complex

(and thus more realistic) dynamic downscaling of the CRCM method (Fronzek et Carter, 2007).

Differences in the hydrological regimes were also anticipated because of the use of conceptually different hydrological models and because of the bias induced by the calibrated parameters. The lumped and conceptual HSAMI model simulates the hydrological processes with equations which require calibrated empirical parameters. The basin is considered as a homogeneous territory, where the climate variables are uniformly represented. The flows in the hydrographic network are not represented. The distributed physically-based Hydrotel model is based on simulation of the hydrological processes on small homogeneous sub-basins. The equations describing the hydrological processes comprise measurable physical parameters. The heterogeneity of the territory and spatial distribution of the climate variables are considered, providing a more detailed model.

In line with the problems stated in this study, the conclusion of authors that have analysed the uncertainties of hydrological models and climate projections on the hydrological regimes is that the uncertainty of projection is more important than that of the model (Dibike et Coulibaly, 2005; IPCC, 2001a; Prudhomme *et al.*, 2003). The work presented in this article partially confirms this assertion. For the climate projection of the delta change in both hydrological models, this assumption is consolidated. The signal of the relative changes in the mean flows varies little from one hydrological model to another. On the other hand, the use of the CRCM data in the hydrological models leads to more marked differences in flows in summer. Intermodel hydrological uncertainty can be higher than interprojection uncertainty. For example, the mean temperatures in summer with the deltas and the CRCM

methods were not statistically different. However, the changes of flows at this season for the Hydrotel-CRCM combination, at each horizon, were statistically different compared to the other combinations. This combination is particular compared to the others, with marked decrease of flows the summer, despite the over-estimation of flows in summer with the Hydrotel model over the calibration and validation period. Thus, the summer decrease here does not result from a bias in the hydrological model induced by the calibration at the control period.

Several authors concur that physically-based models are better to simulate hydrological regimes for changing conditions, such as climate, than the lumped and conceptual models (Jones *et al.*, 2006; Ogden et Julien, 2002; Xu et Singh, 2004). The results here, however, show that the flows in summer with the lumped and conceptual hydrological model HSAMI, fed from two different projections, presented smaller differences than the Hydrotel model, subjected to the same climate projections. On the other hand, the distributed physically-based Hydrotel model amplified the consequences of climate projections on the flows, compared to the HSAMI model.

Many authors also affirm that climate projections resulting from dynamic downscaling have a real advantage over the other downscaling methods (Fowler *et al.*, 2007; Fronzek et Carter, 2007; Salathé *et al.*, 2007). The delta change method did not modify the variability of the observed data. The change of variability of the data of the CRCM is one of its advantages. On this subject, Fronzek and Carter (2007) and the Intergovernmental Group of experts on the evolution of climate (Kundzewicz et al., 2007) evoke the importance of taking variability

into account in impact studies. The changes in variability can involve changes in reliability in management of the water resource.

As an extension of the preceding conclusions, combinations with the hydrological model Hydrotel (physically-based) and the climate projection of the CRCM (dynamic downscaling) would tend to be more robust. However, this combination is the one that is distinguished considerably from the others, particularly in summer. The dominant hydrological process in summer for a watershed in mid-latitudes is evapotranspiration. Thorough analyses were conducted in order to identify if this was a factor in the flow reduction. Figure 9 shows the evapotranspiration for the summer of each combination at all horizons. The same scheme is observed as for the summer mean flows: the Hydrotel-CRCM combination at the future horizons is particular, with greater quantities of water evapotranspirated. The HSAMI model generates less difference between projections, and the combination of Hydrotel-Deltas causes less evapotranspiration. The differences in the flows in summer would come from the modeling of the evapotranspiration.

It is important to mention that the potential evapotranspiration (PET) is the same in both models since it is modelled with a Hydro-Quebec equation (Fortin *et al.*, 2001a; Turcotte *et al.*, 2007). The differences are in the determination of the real evapotranspiration (RET). On the one hand, the Hydrotel model simulates the RET in a physical manner inside the sub-model of the vertical flows. It is mainly a function of the water content in the ground and the root depths of the vegetation. In addition, the HSAMI model establishes the quantity of evapotranspirated water with calibrated parameters which represent the fraction of the PET and the capacity of the unsaturated reservoir zone. The unsaturated reservoir zone is saturated

in summer with simulations of the CRCM, and not with the deltas, which restricts the RET. The analysis of daily precipitations in summer indicates that precipitations are more constant with the CRCM than with the deltas, which contributes to maintain the unsaturated zone reservoir at a higher level. Moreover, the water contents are higher with Hydrotel-CRCM than with the deltas, which supports this reasoning.

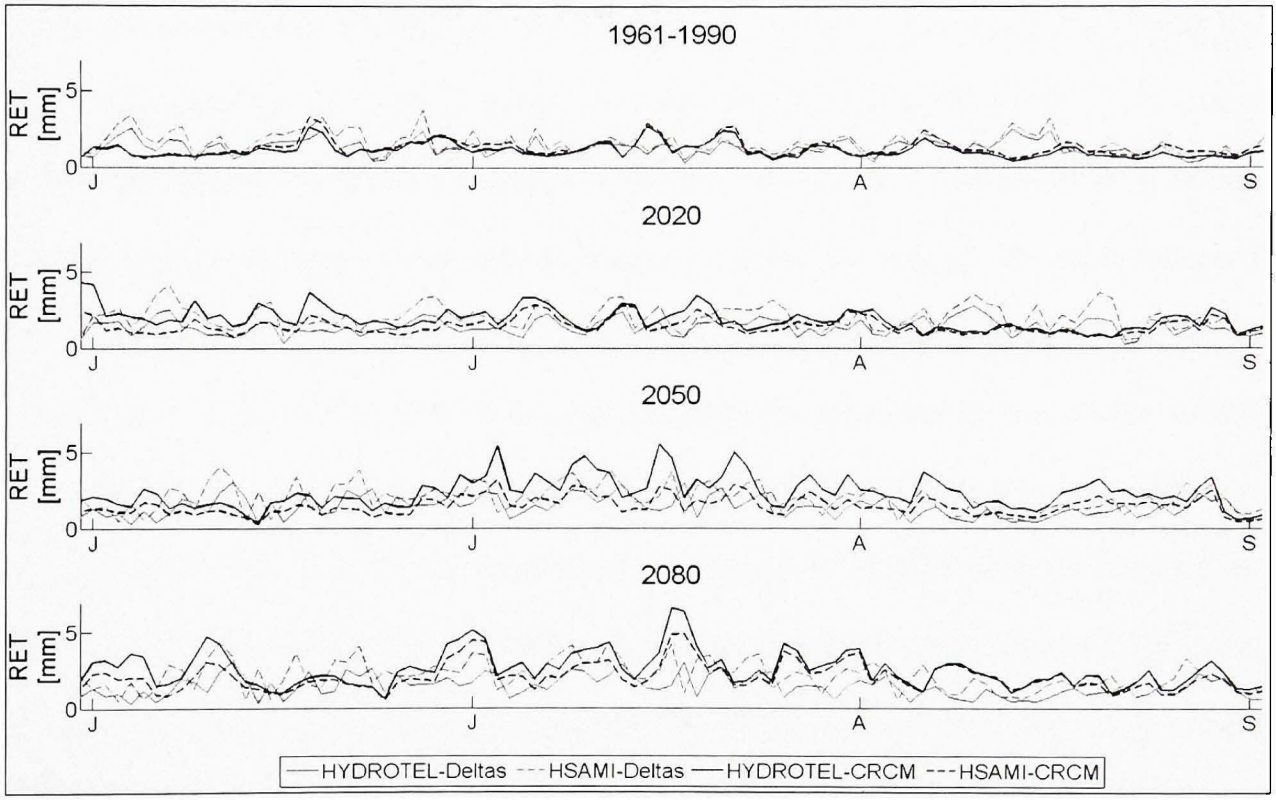


Figure 10. Mean real evapotranspiration over the control period 1961-1990 and the horizons 2020, 2050 and 2080 (summer months only).

The parameters influencing the RET of the HSAMI model are calibrated with the observations, which were used to produce the climate projection of the deltas. It is necessary to question the transferability of these parameters for the simulation of hydrological regimes with the projection of the CRCM, even at the control period, because of the differences in the variability of precipitations. Another research field is thus suggested: for conceptual models,

other sets of parameters which would give similar results to the calibration-validation, under the concept of equifinality (Beven, 2006; Beven et Freer, 2001). The interest would be to analyze the model states at the control period and at the future horizons, in order to identify behaviours with major incidences on the modeling of the processes, in particular the RET, and also the snowmelt for a Nordic watershed.

The results showed that the HSAMI-CRCM combination is particularly dissociated from the other combinations at the future horizons, with more variable spring floods. One explanation of the differences is the greater variability of the daily temperatures in the CRCM in spring, induced by the correction of bias (noticed but not shown in this article). The most important bias in the temperatures at the control period was in spring, with an underestimation of the temperatures of the CRCM of 6 °C in April compared to the observations. At the control period, an analysis of the daily temperatures showed that the application of a systematic bias to all the data of the CRCM had contributed to generate more days when the temperature exceeded the threshold, causing the snowmelt. The median of the temperatures in April and March, during the peak flow, is higher with the CRCM compared to the deltas, which would explain this precocity. There are also lower temperatures (0-25ième percentiles) with the CRCM in particular by 2020 and 2050, which explains the late falling limb of the hydrographs. Another reason that could explain the HSAMI differences is that it generated more variability in the spring flood than the Hydrotel model at the period of calibration and validation (Figure 2c). The combined effect of greater variability of both the HSAMI and the CRCM would make this projection dissociated from the others in spring.

CONCLUSIONS AND RECOMMANDATIONS

The purpose of this study was to investigate if the differences between hydrological regimes were more ascribable to the hydrological models or to climate projections. Marked characteristics in the future potential flows were identified in the results section. Some were attributed to the hydrological models, others to the differences between climate projections.

It can be seen from this work that the choice of a climate projection and a hydrological model influences the modeling of the flows. Differences often not statistically significant in the monthly means climate variables lead to statistically significant differences in the hydrological regimes. These impacts would be ascribable to the differences in variability of the climate data, in addition to some of the calibrated parameters of the hydrological models.

The first, most obvious conclusion is that climate projection presents a strong signal compared to the hydrological model for the modeling of the spring flood. The amplitude of the peak flow is greater with the deltas than with the CRCM. The HSAMI model generated a more variable spring peak flow, and the hydrological model thus has an impact on the form of the hydrograph. The second major conclusion of the study is that the hydrological model can generate more uncertainty than climate projection, in particular in the summer season. The lumped conceptual model, HSAMI, reacts in the same manner, with both climate projections, by simulating similar summer flows with the deltas or the CRCM. On the other hand, the flows with the distributed physically-based Hydrotel model presented marked differences in summer according to the climate projection. It was shown that the simulation of the evapotranspiration process, dominating in summer, was at the origin of the differences

obtained. The variability within the month of the climate data and the calibrated parameters of the lumped conceptual model would be the main factors at the origin of these differences.

The prediction of the spring peak flow, the means and the variability of the flows are key factors for the managers of Nordic water-resource systems, who must optimize the management of water to maximize the profits and/or to minimize the risks. The choice of climate projections and hydrological models to determine the potential impacts the climate changes can be decisive. The linking of a hydrological model to a climate projection should always be realized by previously evaluating their compatibility and their behaviour in different contexts than where the hydrological model was calibrated.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors want to thank Mrs Diane Chaumont from the Ouranos Consortium for providing the data necessary for the production of the climate projections.

REFERENCES

Bergström, S., Lindström, G. and Pettersson, A. (2002). Multi-variable parameter estimation to increase confidence in hydrological modelling. Hydrological processes, 16, 413-421.

Beven, K. (2006). A manifesto for the equifinality thesis. Journal of hydrology, 320(1-2), 18-36.

Beven, K. and Freer, J. (2001). Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. Journal of hydrology, 249, 11-29.

Bisson, J. L. and Roberge, F. (1983). Prévisions des apports naturels: Expérience d'Hydro-Québec. Paper presented at the Workshop on flow predictions, Toronto.

Caya, D. and Laprise, R. (1999). Semi-implicit semi-Lagrangian regional climate model: the Canadian RCM. Monthly weather review, 127(3), 341-362.

Diaz-Nieto, J. and Wilby, R. L. (2005). A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: Impacts on low-flows in the river Thames, United Kingdom. Climate Change, 69, 245-268.

Dibike, Y. B. and Coulibaly, P. (2005). Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models. Journal of hydrology, 307, 145-163.

Dietterick, B. C., Lynch, J. A. and Corbett, E. S. (1999). A calibration procedure using topmodel to determine suitability for evaluating potential climate change effects on water yield. Journal of the American water resources association, 35(2), 457-468.

Duan, Q. (2003). Calibration of watershed models. In Q. Duan ,H. Gupta andA. N. Sorooshian (Eds.), Water science and applicationVol. 6, pp. 89-104. Washington D.C.

Environnement Canada. (2004). Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada. Burlington (Ontario): Institut national de recherche scientifique. 148 p.

Fortin, J.-P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J. and Villeneuve, J.-P. (2001a). Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. 1: Description of the model. Journal of hydrologic engineering, 6(2), 91-99.

Fortin, J.-P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J. and Villeneuve, J.-P. (2001b). Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. II: Application to Chaudiere watershed. Journal of hydrologic engineering, 6(2), 100-108.

Fortin, V. (2000). Le modèle météo-apport HSAMI: historique, théorie et application. Varennes: Institut de recherche d'Hydro-Québec. 68 p.

Fowler, H. J., Blenkinsop, S. and Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. International journal of climatology, 27, 1547-1578.

Fronzek, S. and Carter, T. R. (2007). Assessing uncertainties in climate change impacts on resource potential for Europe based projections from RCMs and GCMs. Climate change, 81, 357-371.

Hay, L. E., Wilby, R. L. and Leavesly, H. H. (2000). Comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. Journal of the American water resources association, 36(2), 387-397.

Hulme, M. and Carter, T. (1999). Representing uncertainty in climate change scenarios and impacts studies. Paper presented at the Éclat-2 Helsinki workshop, Norwich, UK.

IPCC. (2001). Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability. Flow of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Mc Carthy, J.J, Canziani, O., Leary, N.A., Dokken, D.J. and White, K.S.). Cambridge: Intergovernmental Panel on Climate Change. 967 p.

Jiang, T., Chen, Y. D., Xu, C.-y., Chen, X., Chen, X. and Singh, V. P. (2007). Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China. Journal of hydrology, 336, 316-333.

Jones, R. N., Chiew, F. H. S., Boughton, W. C. and Zhang, L. (2006). Estimating the sensitivity of mean annual runoff to climate change using selected hydrological models. Advances in water resources, 29(10), 1419-1429.

Leavesly, G. H. (1994). Modeling the effects of climate change on water resources - a review. Climate change, 28, 159-177.

Maurer, E. P. (2007). Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California, under two emissions scenarios. Climate change, 82, 309-325.

McFarlane, N. A., Boer, G. G., Blanchet, J.-P. and Lazare, M. (1992). The Canadian Climate Centre second-generation general circulation model and its equilibrum climate. Journal od climate, 5, 1013-1044.

Minville, M., Brissette, F. and Leconte, R. (2008). Uncertainty of the Impact of Climate Change on the Hydrology of a Nordic Watershed. Journal of hydrology, 358(1-2), 70-83.

Nakicenovic, N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T. Y. Jung, T. Kram, E. L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Raihi, A. Roehrl, H-H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor and Dadi, Z. (2000). IPCC Special Report on Emissions Scenarios. United Kingdom and New York, NY, USA. 599 p.

Ogden, F. L. and Julien, P. Y. (2002). CASC2D: A two-dimensional, physically-bsed, hortonian hydrologic model. In V. P. SinghD. K. Frevert (Eds.), Mathematical models of small watershed hydrology and applicationspp. 950. Chelsea: Water resources publications.

Plummer, D. A., Caya, D., Frigon, A., Cote, H., Giguere, M., Paquin, D., Biner, S., Harvey, R. and De elia, R. (2006). Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM. Journal of climate, 19(13), 3112-3132.

Prudhomme, C., Jakob, D. and Svensson, C. (2003). Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK watersheds. Journal of hydrology, 277, 1-23.

Risbey, J. S. and Entekhabi, D. (1996). Observed Sacremento Basin streamflow response to precipitation and temperature changes and its relevance to climate impact studies. Journal of hydrology, 184, 209-223.

Salathé, E. P. j., Mote, P. w. and Wiley, M. W. (2007). Review of scenario selection and downscaling methods for the assessment of climate change impacts on hydrology in the United States pacific northwest. International journal of climatology, 27, 1611-1621.

Schmildli, J., Frei, C. and Vidale, P. L. (2006). Downscaling from GCM precipitation: A benchmark for dynamical and statistical downscaling methods. International journal of climatology, 26, 679-689.

Srikanthan, R. and McMahon, T. A. (2001). Stochastic generation of annual, monthly and daily climate data: A review. Hydrology & earth systems sciences, 5(4), 653-670.

St-Hilaire, A., Ouarda, T. B. M. J., Lachance, M., Bernard, B., Gaudet, J. and Gignac, C. (2003). Assessment of the impact of meteorological network density on the estimation of basin precipitation and runoff: A case study. Hydrological processes, 17(18), 3561-3580.

Turcotte, R., Fortin, L.-G., Fortin, V. and Villeneuve, J.-P. (2007). Operational analysis of the spatial distribution and the temporal evolution of the snowpack water equivalent in southern Quebec, Canada Nordic hydrology, 38(3), 211-234.

Turcotte, R., Lacombe, P., Dimnick, C. and Villeneuve, J.-P. (2004). Prévision hydrologique distribuée pour la gestion des barrages publics du Québec. Canadian journal of civil engineering, 31, 308-320.

Xu, C.-Y. and Singh, V. P. (2004). Review on regional water resources assessment models under stationary and changing climate. Water resources management, 18, 591-612.

ANNEXE IV

Article 4 : Minville *et al.* (2008c)

Cet article a été soumis le 31 août 2007 pour publication dans le Journal of water resources planning and management.

Minville, Marie, Brissette, François et Leconte, Robert. (2007). Impacts and Uncertainty of Climate Change on Water Resource Management of the Peribonka River System (Canada). *Soumis à Journal of water resources planning and management le 31 août 2007.*

Impacts and Uncertainty of Climate Change on Water Resource Management of the Peribonka River System (Canada)

Marie Minville, ing. Jr

François Brissette, ing., Ph.D.

Robert Leconte, ing., Ph.D.

Abstract: The impacts of climate change on medium-term reservoir operations for the Peribonka water-resource system (Quebec, Canada) were evaluated with annual and seasonal hydropower production indicators and flood control criteria. According to simulations under the current operating rules in a climate change context, the tendency is for a reduction in mean annual hydropower production and an increase in unproductive spills, despite an increase in the annual average inflow to the reservoirs. A broad range of climate projections -- a combination of 5 general circulation models with 2 greenhouse gas scenarios each -- were used in order to evaluate the uncertainty of these future potential climates on floods and hydroelectric production. Climate projections were downscaled with the change factor method at the horizon centered in 2050. To represent natural variability, a stochastic weather generator was used to produce 30 synthetic climate series of 30 years each, representative of each climate change projection as well as the climate of the control period. The hydrological impacts of climate change were evaluated with a lumped hydrological model and the hydrological regimes were analyzed according to spring flood characteristics and the average inflows. In general, the projections indicate an increase in annual inflow, earlier peaks and greater volumes during the spring flood.

The analyses show that power plant managed with a reservoir is sensitive to the operating rules and that these rules should be re-examined in order to take account of new potential seasonal hydrological contexts.

Keywords: Climatic changes, Water management, Reservoir operation, Hydroelectric power generation, Hydrology

1. INTRODUCTION

The scientific community supports the conclusion that climate change will have considerable effects on water resources. One of the most important aspects will relate to the availability of water resources on a regional scale with the modification of the hydrological cycle (Xu et Singh, 2004) . The changes in climate variables such as precipitations and temperatures will have hydrological impacts that will influence reservoir management. From the same perspective, drinking water supplies, floods risks, irrigation, and hydropower production will be affected at various levels (IPCC, 2001a).

Some hydrological impacts related to the climatic changes on a global scale were reported by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007a). It is estimated that snow coverage has decreased by 10% and that the freezing season of rivers and lakes has decreased by two weeks since 1960. For the impacts observed in the mid-latitudes, Whitfield and Cannon (2000) analyzed recent climatic and hydrological variations in Canada (1976 to 1995). They noticed that some regions, including some of the province of Quebec, presented hydrographs with an earlier spring flood, higher winter flows and lower summer flows. Their study reveals that small changes in precipitations and temperatures, often not statistically significant, nonetheless considerably affected the river discharge. Along the same lines, Christensen *et al.* (2004) support that weak changes in the inflows will have larger effects on a reservoirs' storage. Consequently, according to Xu and Singh (2004), energy production will be affected and the situation will require the adoption of adapted operation policies.

Overall, there are many works devoted to the evaluation of the hydrological impacts of climate change. They present the impacts for watersheds throughout the world, with projections from one or more general circulation models (GCMs), greenhouse gas emission scenarios (GHGES), downscaling techniques and hydrological models. However, studies

dealing with the impacts of the hydrological changes on the management of reservoirs are rare. On this subject, Christensen *et al.* (2004), Payne *et al.* (2004), VanRheenen *et al.* (2004), and Mimikou and Fotopoulos (2005) have completed work relating to the impacts of climate change on river systems. However, they have employed only to one to three climate change projections, which does not make it possible to represent the range of potential climatic changes. On this subject, Sharma and Shakya (2006) estimate that the evaluation of the hydrological impacts of climate change in a country is the first and the most important stage before planning for long-term management. In other words, it is important to consider a broad range of climate change projections to evaluate the hydrological impacts before evaluating the impacts on river system.

In this context, the aim of this work is to quantify the potential climate change impacts on reservoir operations, including flood control and hydropower production, for a broad range of climate projections, in order to consider the uncertainty of climate change.

Section 2 of this paper offers a short description of the studied catchment. Section 3 describes the methodology, i.e. the steps achieved for the climate change projections production, simulations of the hydrological regimes and the reservoir operations. Section 4 presents climate change projections, their impacts on hydrology and some aspects of reservoir operations such as hydroelectric production and flood indicators. A discussion of the results and recommendations for the next steps of the project follow in section 5. Section 6 is a conclusion and a return to the principal elements of the study.

2. STUDIED WATERSHED

The Peribonka river basin is located in the center-south of the province of Quebec in Canada. Its area is 27 000 km^2 and it is subdivided into 4 principal subbasins: Lake-Manouane (5 000 km^2), Passes-Dangereuses (11 000 km^2), Chute-du-Diable (9 700 km^2) and Chute-à-la-Savane (1 300 km^2). The site is mostly uninhabited forest, but close to the river's mouth the territory is mainly agricultural.

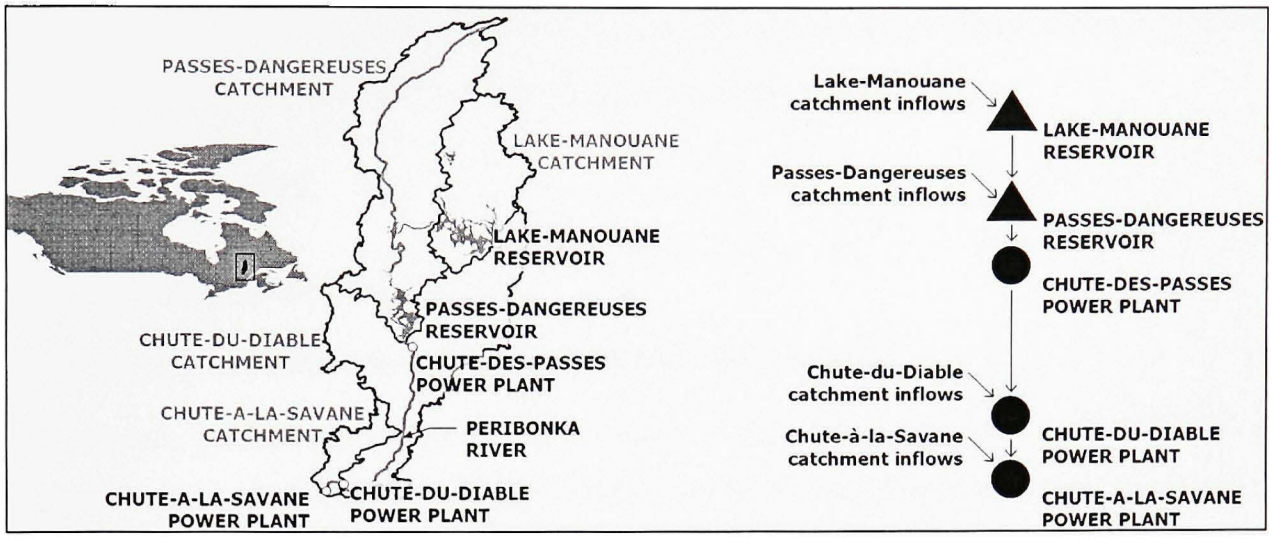


Figure 1 Peribonka water-resource system

For the control period (1961-1990), the annual average temperature is 0.5°C, with a monthly mean temperature of -19°C in January and 16°C in July. The freezing period is, on average, between October 21 and April 21, a 6 months duration. Annual mean precipitations are 1010 millimetres. During the winter (DJFM), 5% of the precipitation is rain.

The flows between each subbasin are managed using dams owned by the Rio Tinto Alcan Company (and Hydro-Quebec starting from 2008). Two large reservoirs, Lake-Manouane (2700 hm^3) and Passes-Dangereuses (5200 hm^3), store water in order to feed in water to 3 power plants (Chute-des-Passes, Chute-du-Diable and Chute-à-la-Savane) disposed in series on the main river. The power plant completely upstream (Chute-des-Passes) is a reservoir power plant while those downstream, Chute-du-Diable and Chute-à-la-Savane, are run-of-river power plants. Hydropower production is the principal use of the Peribonka River water-resource system, with an installed capacity of 1165 MW.

The annual average inflows are of 635 m^3/s. The hydrological regime can be subdivided into 3 phases related to the seasons: winter, spring and summer-autumn. A large part (43%) of the reservoir inflows occur in spring (AMJ) during the spring flood. Also, flows are minimal

(10%) in winter (DJFM) and the inflows in summer-autumn (JASON) result mainly from rainy events and account for 47% of the annual discharge.

3. METHODOLOGY

3.1 Climate change projections

3.1.1 General circulation model and greenhouse gas scenarios

The climate projections (Table 1) are obtained from 5 GCMs and 2 GHGES each (Nakicenovic *et al.*, 2000). The selected GCMs are the United-Kingdom model (HadCM3), the European model (ECHAM4), the Australian model (CSIRO), the Japanese model (CCSRNIES) and the Canadian model (CGCM3). These models have all been used in the Atmospheric Model Inter-Comparison Project (Boer, 2004), with the exception of the third version of the Canadian Climate Model (CGCM3), which is more recent. For the CGCM3 model, since results from the A2 scenario were not available, the B1 scenario (a more optimistic scenario) was chosen instead.

Table 1 Climate projections used

Number	GCMs-GHGES couple	Number	GCMs-GHGES couple
1	HadCM3 A2	2	HadCM3 B2
3	ECHAM4 A2	4	ECHAM4 B2
5	CSIRO A2	6	CSIRO B2
7	CCSRNIES A2	8	CCSRNIES B2
9	CGCM3 A2	10	CGCM3 B1

3.1.2 Downscaling

The data were downscaled according to the "change factor" (also called "delta-change") method (Diaz-Nieto et Wilby, 2005). This technique applies to the daily historical data the difference between the simulated monthly data of a future horizon (2050: 2040-2069) and the simulated monthly data of a control period (1961-1990). In the case of the minimum and

maximum temperatures, the difference between the simulated future monthly temperatures of a horizon and the simulated monthly temperatures of the control period are added to the historical data (equation 1).

$$T_{fut,j,h} = T_{obs,j} + (\overline{T}_{fut,m,h} - \overline{T}_{cont,m}) \quad [1]$$

For the precipitations, the ratio of the simulated monthly precipitations of a horizon over the simulated monthly precipitations of the control period is multiplied by the observed daily precipitations of the control period (equation 2).

$$P_{fut,j,h} = P_{obs,j} \times (\overline{P}_{fut,m,h} \div \overline{P}_{cont,m}) \quad [2]$$

3.1.3 Synthetic climate series

After the production of climate change projections for each subbasin, the next step was to produce synthetic series using a stochastic weather generator. The advantage of a synthetic series is to simulate the hydrology resulting from a projection according to several climate series in order to account for the natural variability of the climate, and at the same time, to limit the uncertainty related to a single time series.

The weather generator used, the WeaGETS (Caron, 2005) is Richardson (1981) based, with third order Markov chains and exponential functions implemented to determine the occurrences and the quantities of precipitations, respectively. The generator makes it possible to construct synthetic climate series with a desired length and which have the same statistical properties as the original series.

The synthetic data produced within the framework of this study are 30 series of 30 years each. For each 10 projections of climatic changes (5 GCMs X 2 GHGES X 1 time horizon), as well as for the reconstitutions of the control period, 900 years of synthetic data representative of these time series were generated under the stationarity assumption. The

climatic variables produced are minimum temperature, maximum temperatures and precipitations.

3.2 Hydrological modeling

3.2.1 HSAMI model

The HSAMI hydrological model (Bisson et Roberge, 1983) was developed and has been used by Hydro-Quebec for twenty years in an operational frame for short and medium term flow forecasting. HSAMI is actually used for daily forecasting of natural inflows on 84 watersheds with surface areas ranging from 160 km^2 to 69195 km^2. HSAMI makes it possible to simulate the naturalized inflows of a managed river or the discharge of a basin where the flows are natural, according to climate observations or weather forecasts of variables such as minimal and maximum temperatures, precipitations, radiations and snow level on the ground. It is a lumped conceptual model that is linear reservoir-based and which can generate the runoff from two unit hydrographs. HSAMI simulates evapotranspiration, precipitation, interception of rain and snow, and infiltration, as well as the vertical flow processes. It is designed to compute with one-hour to one-day time steps.

3.2.2 Model calibration

Because the HSAMI model is lumped, calibration must be carried out for each subbasin of the catchment, with an average climate series produced with the historical data from 1984-2003 of the surrounding meteorological stations. Table 2 presents the calibration-validation results expressed with the Nash-Sutcliffe coefficient.

Table 2 Nash-Sutcliffe coefficients for each catchment

	Calibration	Validation
Lake-Manouane	0.68	0.51
Passes-Dangereuses	0.81	0.77
Chute-du-Diable	0.93	0.89
Chute-à-la-Savane	0.78	0.68

3.2.3 Climate change impacts on hydrological regimes

The hydrological regimes resulting from climate change were evaluated with HSAMI and the synthetic climate series at the horizon 2050. Generating several series allows a greater variability of inflows to be captured.

3.3 Water-resource management simulations

3.3.1 ResSim model

Modeling of the water-resource system was carried out with the ResSim model developed by the US Army Corps of Engineers (Klipsch, 2003). It is the new generation, in a Windows environment, of the HEC-5 software widely used in the management of the public domain water-resource system in the United States. ResSim is a reservoir simulation model that allows turbinated and spilled flows to be simulated according to imposed operating rules, specific constraints, and objectives. It is modular software, which makes the combinations of different configurations of water-resource systems, reservoir geometries, constraints, reservoir inflows and initial conditions possible. The principal input data are the naturalized inflows into the reservoirs, the physical properties of the rivers and reservoirs, the evacuation capacity and the characteristics of the power plants, particularly the installed capacity, their efficiency as well as the rating curves.

3.3.2 Operating rules

Current annual operations are divided into three periods: Winter (DJFM: December 1st to March 31), spring (AMJ: April 1st to June 30) and summer-autumn (JASON: July 1st to November 30). During winter, the upstream reserve (Lake-Manouane and Passes-Dangereuses reservoirs) is managed according to the anticipated spring flood. The operations are carried out according to a target objective of storage at April 1st. In the spring season, management of the upstream reserves, which were lowered during the winter, is carried out with the objective to produce an acceptable level of hydropower. During the summer-autumn season, the production is modulated in order to ensure good performance over the whole system while maintaining the reservoirs at the normal operating zone to limit flood risks. At

every season, the upstream reserve is operated according to a ratio table of the monthly storage to maintain between Lake-Manouane and Passes-Dangereuses for a specified total storage.

3.3.3 Impacts indicators

Climate change impacts on the management of this water-resource system are evaluated by entering the 30 series of 30 years of future inflows simulated with HSAMI under 10 projections of climatic changes into the simulation model, while preserving the current operation rules, and compared with the simulations with the inflows of the control period.

The reservoir level indicators (Simonovic et Li, 2003), i.e. reliability and vulnerability, are given for the Lake-Manouane and Passes-Dangereuses reservoirs. Briefly, as shown in equation 3, the reliability of a system is the probability that a reservoir is in a state considered satisfying and it is expressed as the relationship between the numbers of time steps when the state of a system is satisfactory and the number of time steps in a simulation,

$$\alpha = \frac{1}{NS}\sum_{t=1}^{NS} z_t \begin{vmatrix} z_t = 1 & \forall z_t \in S \\ z_t = o & \forall z_t \in F \end{vmatrix} \qquad [3]$$

where α is reliability, z_t is the state of the system for the time step considered, S is a satisfactory state, F is an unsatisfactory state and NS is the number of time steps of a time period. In this study, a reservoir is reliable, for a given time step, if its level is under the overflow level. "Overflow level" is defined as the water level that would lead to a dam failure.

Vulnerability is an indicator of the severity of an unsatisfactory state and it is the maximum difference between a reference value and a value exceeding this level. This criterion is annual, and the greatest variation measured during a year constitutes the vulnerability for that year,

$$\beta_y = \begin{cases} 0 & \text{if} \quad V_t \leq V_f \\ Max(V_t - V_f) & \text{else} \end{cases} \qquad [4]$$

where β_y is the vulnerability, V_t is a reference value (level or flow) and V_f is the value simulated or observed. Within the framework of this study, a reservoir is vulnerable when its level exceeds the normal operating level.

Next, the impacts on hydropower production are evaluated on annual and seasonal time scales.

3.3.4 Model calibration

The ResSim model calibration was realized for the 1990-2003 period. This is the only period for which observed inflows and reservoir level data was available. The ResSim model reproduced the reliability indicator (observations versus simulations for the period of control) quite well, but it overestimates the vulnerability. The model overestimated the observed annual hydropower production by less than 1%. Seasonal hydropower production is overestimated by 8% and 2% for winter and summer-autumn respectively. This is offset by the spring production which is underestimated by 15%. Also, as shown in Table 3, ResSim simulated well all impact indicators for both reservoirs, despite an overestimation of the vulnerability for the Lake-Manouane reservoir and an underestimation of the reliability and vulnerability of the Passes-Dangereuses reservoir. The potential causes of these variations are explained in the section "Discussion and recommendations".

Table 3 ResSim calibration results.

Comparison between observed (obs) and simulated (sim) indicators

	Lake-Manouane		**Passes-Dangereuses**	
	Obs	Sim	Obs	Sim
Reliability (%)	100	100	99.73	93.35
Vulnerability (m)	0.02	0.07	0.03	0

4. RESULTS

4.1 Climate change projections

The scatter plot of figure 2 shows the mean precipitations deltas as a function of the mean temperatures deltas for each climate change projection (annual and seasonal) at the horizon centered in 2050 compared to the control period.

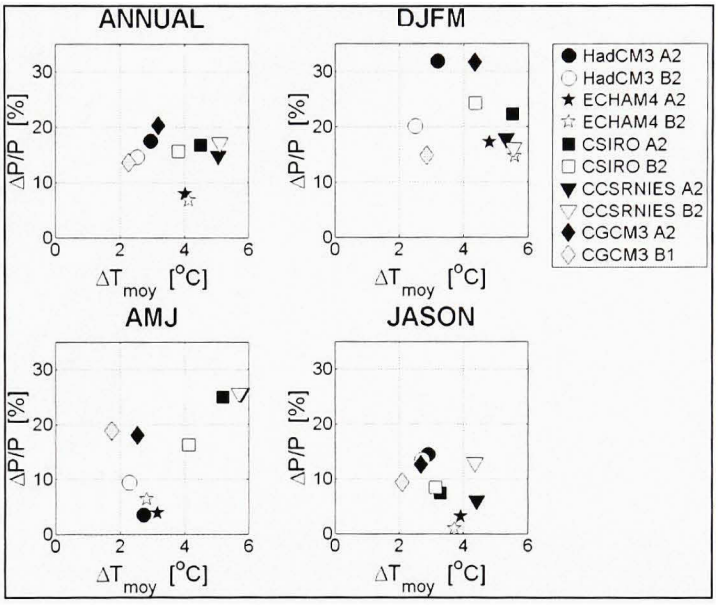


Figure 2 Scatter plots of temperature and precipitation changes (annual and seasonal) for all combinations of GCM and GHGES, at the 2050 time horizon

The annual tendency of the GCMs is univocal for the catchment of the Peribonka River: on the annual and seasonal scales, all of the projections suggest increases in temperatures and precipitations. The uncertainty between temperature projections is smaller at summer-autumn, with differences of 3°C compared to 4°C at the other seasons. For precipitations, the uncertainty between projections is less in summer-autumn with a variation of 15% compared to 20 to 25% at the other seasons.

For the climatic variables, the indicators of climate changes most likely to partly explain the impacts on the medium-term operations of a water-resource system in a Nordic area are the annual temperature cycle and the ratio of liquid compared to solid precipitations in winter. In

this context, figure 3 presents the annual cycle of temperatures. It shows the mean of the 900 years (30 series of 30 years) of temperatures representative of the control period compared to the average of the 900 years (30 series of 30 years) of the temperatures of each climate change projection.

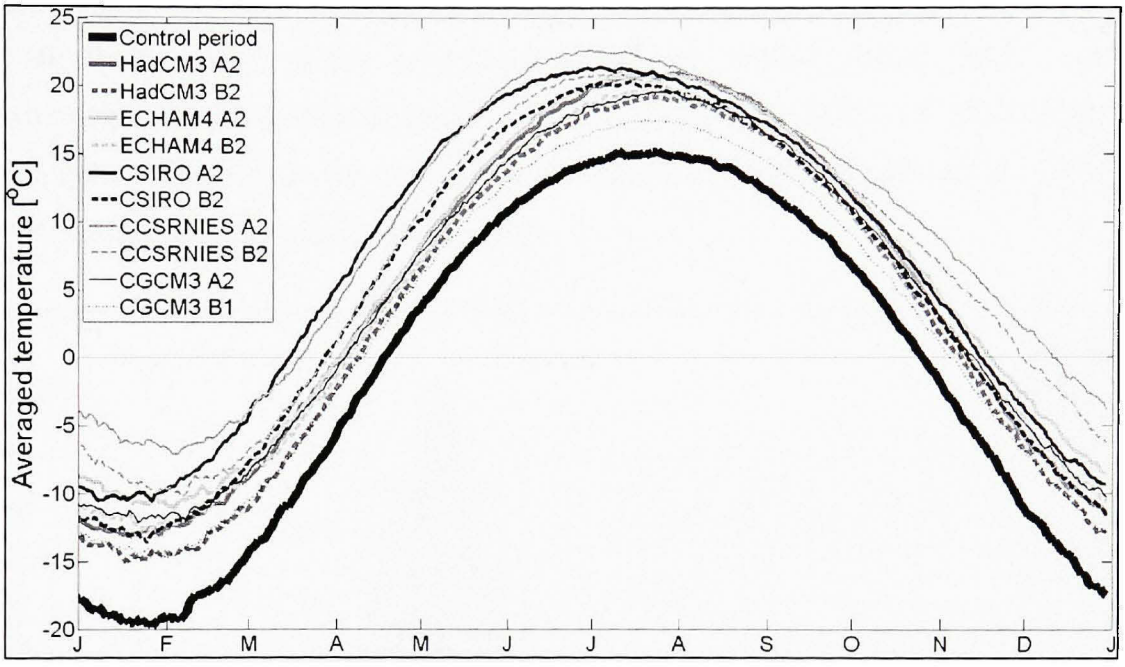


Figure 3 Averaged temperature for each climate change projection compared to reconstituted climate of the control period

Relevant information to be extracted from the annual cycles is the period at which the average temperatures cross the freezing point. Figure 3 shows that compared to the temperatures representative of the recent past (dark bold line), where the passage dates of the average temperature over and below zero are approximately on April 21 and October 21, respectively, climate change projections show that these passage dates could, in the most extreme cases, occur at the end of March and mid-December by 2050. This situation would modify the regimes of winter hydrology, in particular by potentially decreasing the stock of snow to the basin, the volume of spring flood, and by advancing the snowmelt period.

4.2 Climate change impacts on hydrological regimes

The average hydrograph for the Passes-Dangereuses is presented in figure 4 (results are similar for the other catchments). The bold black line is for the reconstituted flows and the lines in grey scale represent the 10 projections of climate change. For all of the subbasins, the tendency of projections is an increase in the winter flows and a reduction in the summer-autumnal flows. Also, every projection shows an earlier spring flood. However, approximately half of the projections (CCSRNIES A2 and B2, CSIRO A2, ECHAM4 A2 and B2) anticipate reductions in the peak while the other half (HadCM3 A2 and B2, CSIRO B2 and CGCM3 A2 and B1) anticipate increases.

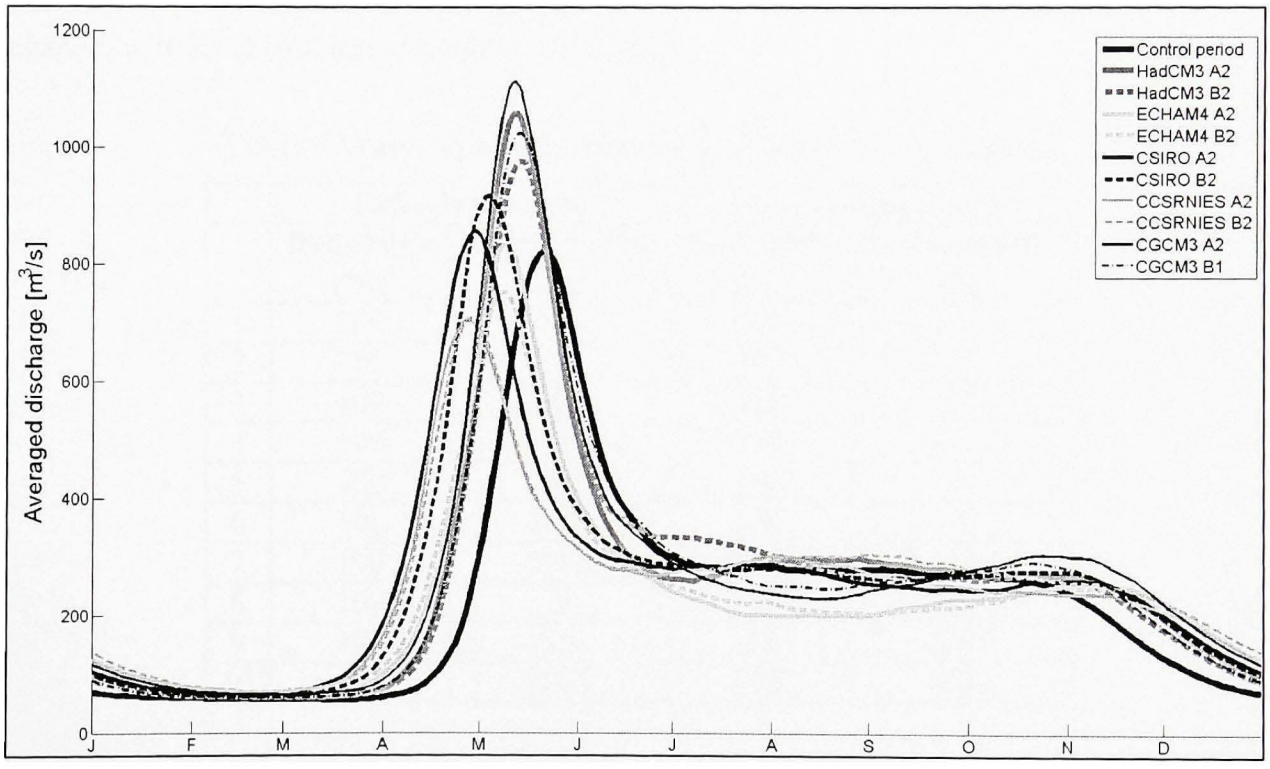


Figure 4 Averaged annual hydrograph for climate change projections compared to the reconstituted hydrographs of the control period (example for Passes-Dangereuses catchment)

4.3 Climate change impacts on the water-resource system

4.3.1 Reservoir levels

As it shown in table 4, in the context of climate change, reliability is compromised for the Lake-Manouane reservoir under the 10.CGCM3 B1 projection and for Passes-Dangereuses under the 9.CGCM3 A2 projection. In both cases, the reliability of the reservoirs is 99%, with 1 year (out of 900) overpassing the overflow level for the Lake-Manouane and Passes-Dangereuses reservoirs.

For Lake-Manaoune, in the context of climate changes, the reservoirs are vulnerable under 4 projections. The Passes-Dangereuses reservoir is also vulnerable in the context of climate change, with level exceedance under 3 projections.

Table 4 Water-system indicators in climate change context

	Lake-Manouane		Passes-Dangereuses	
	Reliability (%)	Vulnerability (m)	Reliability (%)	Vulnerability (m)
1	100	0	100	0
2	100	0	100	0
3	100	0	100	0
4	100	0	100	0
5	100	0	100	0
6	100	0.04	100	0
7	100	0.01	100	0
8	100	0	100	0.018
9	100	0.1	99	0.85
10	99	0.13	100	0.02

4.3.2 Annual and seasonal hydropower production

The impacts on hydropower production are presented for the total mean production of the system, i.e. the sum of production at the 3 power plants (figure 5). The actual values of production are modified by a factor in order to preserve proprietary confidentiality. This factor makes it possible to bring the annual median reconstitutions back to 1. The same operation was done to the annual and seasonal production in order to illustrate the seasonal

proportions of the production. For example, as illustrated by the box plots of reconstituted data of the control period at each season, the productions reconstituted in spring (AMJ), in summer-autumn (JASON) and during winter (DJFM) correspond to approximately 0.67, 0.92 and 1.35 times the annual average production.

From the annual point of view, the first observation is that production decreases by 1 to 12% for all of the climatic projections except under 9.CGCM3 A2, which would increase production by 2% for the median. The reductions and the increases appear to be weak in general, but it is important to notice that the median of the production of all the decreasing projections is located under the first interquartile interval of the control period. This means that for the future, more than half of the years would present an annual average production lower than that of the control period 25th percentile. The annual average productions that reveal an even greater reduction are from climate change projections 3.ECHAM4 A2 and 4.ECHAM4 B2.

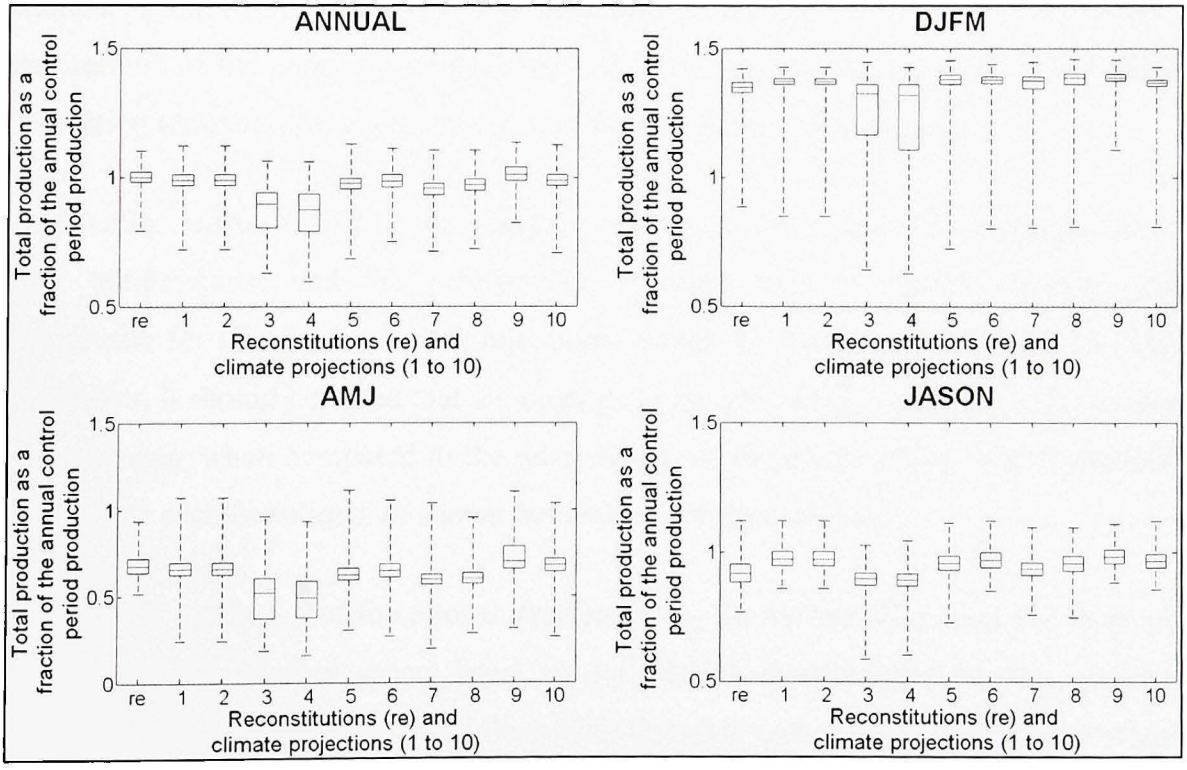


Figure 5. Annual and seasonal total hydropower production for the control period (re) and for climate change projections (1 to 10)

For spring season (AMJ) production, variability between projections is more pronounced than for the other seasons. Compared to the reconstituted production of the control period, 3.ECHAM4 A2, 4.ECHAM4 B2, 5.CSIRO A2, 7.CCSRNIES A2 and 8.CCSRNIES B2 projections result in lower production in spring, while projections 1.HadCM3 A2, 2.HadCM3 B2, 6.CSIRO B2, 9.CGCM3 A2 and 10.CGCM3 B1 anticipate increases. Projection 4.ECHAM4 B2 indicates the most significant reduction, of -15% (compared to the median of the control period) and 9.CGCM3 A2 proposes the greatest increase, with 3%. An interesting observation is that the spring production, compared to the other seasons, shows a greater interannual variability for the climate projections, illustrated by the particularly long whiskers, as much for the production values under the 25^{th} percentile as for values above the 75^{th}.

For the summer-autumn production (JASON), all climate projections propose increases up to 7%, except for 3.ECHAM4 A2 and 4.ECHAM4 B2, which propose reductions of 2%. The interannual production variability for this season is relatively the same as for the reconstitutions of the control period. From July to November, the increase in precipitations and the rising temperatures exert a positive influence on the production.

For the winter season (DJFM), the general tendency is for an increase in production. The warmer temperatures and the precipitation increase lead to runoff increases almost systematically for all of the climate projections, except for 3.ECHAM4 A2 and 4.ECHAM4 B2. However, it should be noted that although there are production increases in the context of climate changes, when compared to the reconstitutions, more years have overall productions lower than the reconstitutions, as shown by the longer lower whiskers.

Lastly, despite the fact that the annual production of the system decreases (as most of the projections show), another aspect must be considered: production from the run-of-river power plants (Chute-du-Diable and Chute-à-la-Savane) compared to the reservoir power plant (Chute-des-Passes) (figure 6).

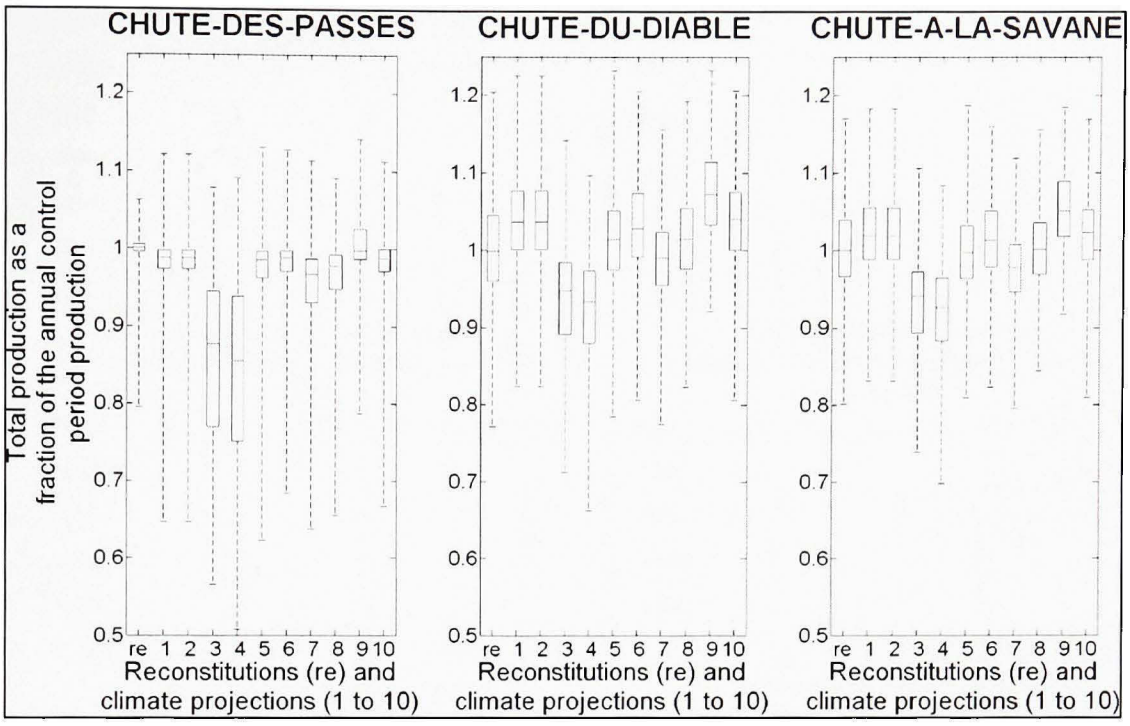


Figure 6 Mean annual production at each power plant for the control period (re) and for climate change projections (1 to 10)

The results show that it is the production at the Chute-des-Passes power plant that influences the tendency towards lowered production. The power plants that are run-of-river however, show a marked increase tendency in average annual production, most evident for Chute-du-Diable power plant.

4.3.3 Unproductive spills

Figure 7 illustrates the box plot of annual and seasonal average values of 900 simulated years (30 series of 30 years) of total unproductive spills for the 10 projections of climatic changes compared to the reconstitutions of the control period.

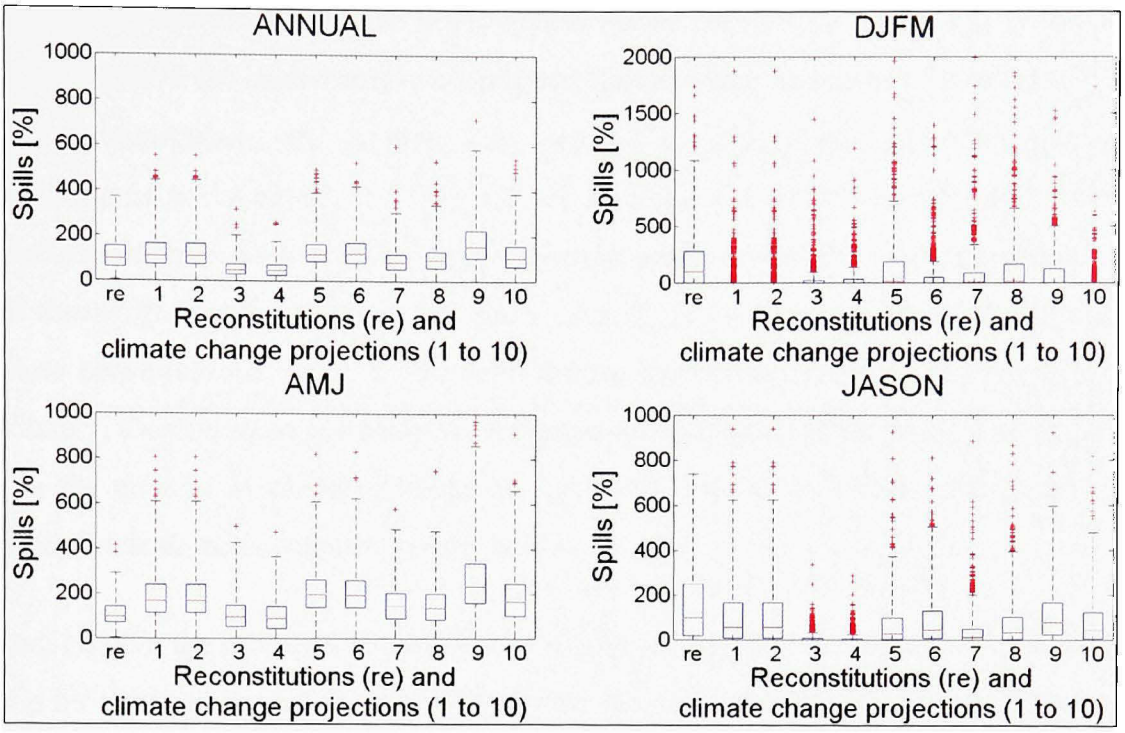


Figure 7. Annual and seasonal unproductive spills in percentage of the control period, for the control period (re) and for climate change projections (1 to 10)

For the annual discharges, the general tendency of climate change projections compared to the reconstitutions is that unproductive spills would increase in the future. However, discharges under climate projections 3.ECHAM4 A2 and 4.ECHAM4 B2 are the exceptions for their reduction. These smaller discharges are related to the fact that these two projections are characterized by their modest increase in annual average precipitations (6 to 8%) combined with higher rises of average annual temperatures (4 to 4.2°C), as illustrated in figure 2. These climatic conditions generated a reduction in the reservoir inflows compared to the reconstituted inflows of the control period. The general tendency of seasonal spills in the context of climate changes follows the tendency of reconstituted spills of the control period, i.e. they are lower in winter and higher in spring.

In winter (DJFM), climate change projections 1.HadCM3 A2, 2.HadCM3 B2 and 10.CGCM3 B1 are notable for their weaker spills compared to other projections, as shown by the interquartile variation of the years that are 0 m3/s, i.e. the majority of the 900 years under

these three projections present null unproductive spills. This can be explained by the fact that these models have the least-warmer projections (temperature increases of less than 3°C), and although precipitations are greater, they remain in solid form and contribute to the accumulation of snow cover, and thus are not available for runoff during these months. At the opposite extreme, unproductive spills under projection 5.CSIRO A2 are characterized by greater discharges. This climate projection is among the warmest and rainiest, which means that these precipitations are in liquid form during the winter and they contribute to runoff immediately. Compared to the reconstituted unproductive spills of the control period, median spills in the context of climate change are generally smaller in winter, although a greater variability leads to more frequent greater spills.

In spring (AMJ), the medians of unproductive spills are higher in a context of climate change than the reconstituted unproductive spills during the same months. Moreover, the years with greater spills are more frequent – illustrated by the whisker that is definitely longer than for the reconstitutions of the control period. It should be observed that unproductive spills under projections 1.HadCM3 A2 and 2.HadCM3 B2 are greater compared to those under 3.ECHAM4 A2 and ECHAM4 B2, even though they anticipate relatively the same variations in temperatures and precipitations. Under the HadCM3 model (projections 1 and 2), the winter is not as warm as other projections, and therefore there was more snow accumulation. However, under ECHAM4 (projections 3 and 4), the winter is much warmer, and therefore with a less important winter snow cover available for the spring runoff. For the less-warm winter projections, unproductive spills are greater in spring.

Finally, for the summer-autumn period (JASON), unproductive spills in the context of climate change are of the same order as for the reconstituted conditions, but with a slight decrease. Unproductive spills under projections 3.ECHAM4 A2 and 4.ECHAM4 B2 remain the exceptions. These two projections anticipate slight increases in precipitations for this season, on the order of 3-4%, combined with relatively high rises of temperatures, of approximately 4°C. The increase of temperatures causes increases in evaporation and evapotranspiration, which, from the hydrological point of view, compensated for the increase

in precipitations. The average hydrograph (figure 4) under ECHAM4 (projections 3 and 4) showed a reduction of the flows for this season.

5. DISCUSSION AND RECOMMANDATIONS

The results presented suggest that climate changes could affect the water-resource system of the Peribonka River. While the analysis of the hydrological regimes showed a general increase in the annual inflows, a reduction in mean annual hydropower production and a general increase in unproductive spills was found.

For the reconstitutions of the control period, whereas the reservoir levels are maximal at the beginning of winter, they are lowered gradually until May when they reach a minimal level. The reservoir operation model apparently behaved well during this season in the context of climate change by increasing production when the inflows were greater, while limiting unproductive spills. In general, the response of the water-resource system in winter is a production increase.

In spring, however, there is no marked tendency either for an increase or reduction in hydropower production, despite a general increase in the spring average inflows. The analyses showed that the increase in the spring inflows was due to a combination of the snowmelt and especially of the increase in precipitations at this season. Spring operations being conditional with winter management, i.e. water levels lowered to contain flooding, so unproductive spills were proportional to the increase in the inflows in order to preserve acceptable water levels while awaiting the anticipated flood volumes. In the same way, the analysis of the unproductive spring spills combined with the hydropower production at this season allows for the projection that the current operation rules can be modified to increase spring production. Because spring floods are, in general, becoming smaller in terms of volumes, it will be necessary to modify the operating rules in order to decrease unproductive spills. For example, simulations of the water-resource system under projections ECHAM4 A2 and B2 (projections 3 and 4) show that production would decrease by approximately 13% in spring, with unproductive spills equal to the reconstitutions of the control period. This

variation is due to the fact that under ECHAM4, even if there are more solid precipitations during winter compared to the reconstitutions, the snow cover does not persist all winter because of the many warm spells. For example, the analysis of the snow on the ground variable in the hydrological model under the ECHAM4 projections showed that the maximum snow cover water equivalent was 15.8 cm compared to 26 cm for the reconstitutions of the control period. When we look at the winter results, it is important to specify that annual real management in spring is based on an algorithm that optimizes the water level to be reached on April 1 for maximum production. The model employed, HEC-ResSim, does not optimize the levels to be reached on a given date, which is why the operation rules were calibrated for winter with the observed inflows to approach the average needed for real management. The climate change impacts on this season are thus compared with reconstitutions of the control period (none are optimized), which allows the intercomparisons. Therefore, simulations of this season should be viewed with caution.

For summer-autumn operations, the results suggested the statu quo in production. These results should also be viewed with some judgment because of the downscaling method used to produce the climate change projections. The change factor method has the disadvantage of not modifying the temporal and spatial pattern of precipitations and temperatures (Diaz-Nieto et Wilby, 2005; Fowler *et al.*, 2005). It seems that the extreme events will be more frequent in a climate change context (IPCC, 2007b). The climate projections used only the modified monthly average climates of historical data, and not the extreme occurrences of events. The operations of the reservoirs under extreme events would undoubtedly be less optimistic. However, for a study focusing on a basin where the most important hydrologic features are linked to snow accumulation and snowmelt, this weakness is less relevant. Diaz-Nieto and Wilby (2005) recommend the change factor method for a broad-brush high-level assessment of climate change impacts, like the study presented, and suggest more complex statistical downscaling techniques for the investigation of more subtle changes in the temporal sequencing and persistence of daily events.

On an annual scale and for each hydropower power plant, the results show that the run-of-river power plants compared to the reservoir-managed plant do not respond in the same way under future conditions. Indeed, for the Passes-Dangereuses power station, managed by reservoir, general reductions in production are projected, compared to the increases or status quo for the run-of-river power plants Chute-du-Diable and Chute-à-la-Savane. With a power plant managed by reservoir, an analysis of the variables suggests that it is mainly an effect of the reduction of the water head that causes the reduction in the production relative to the reduction in the turbinate flows. The increases of production for the run-of-river plants are related to the increase in the turbinate flows, since their smaller reservoirs are maintained, within the simulation, at the normal operating level.

The power plants managed by reservoir will require that the operation policies are adapted to new climatic and hydrological realities. To accomplish this, a privileged avenue would be the use of an adaptive model that optimizes the reservoir operations, rather than only a simulation model with the current rules. The use of a dynamic and stochastic reservoir optimization model is recommended to validate if the hydropower production of a power plant with a large reserve capacity can be improved, compared to production in a non-adaptive simulation process.

Also, an aspect to be revisited in the concept of the operation rules relates to the dates separating the seasons. For example, if a very hot climatic projection would prevail in the future, it would be relevant to move the beginning dates of winter to January instead of December. Likewise, the beginning date of spring could be shifted as much as 1 month earlier in order to account for the earlier spring flood. Another solution would be to use weekly optimized operating rules based on inflows and reservoir states to replace seasonal rules.

Under conditions where climate projections of the sort in CGCM3 A2 could occur (marked increase in the inflows at each season), it would be necessary to further study the relevance of modifying the power plant equipment in order to turbinate discharges which would

otherwise be unproductive spills. However, an analysis of inflows' interannual variability would be required so as not to oversize the equipment.

6. CONCLUSION

The results presented highlight that the operations of the water-resource system of the Peribonka River, according to the current operating rules, would be influenced by climate change. For example, from the flood control point of view, some projections suggest that the reservoirs would be less reliable and more vulnerable in the context of climate change. The exceedance of the overflow level was simulated one time for the Lake-Manouane and Passes-Dangereuses reservoirs. Total hydropower production is assumed to decrease under all but one climate change projection -- certain projections being more pessimistic with average annual reductions on the order of 13%. However, the reductions in total production are mainly due to the power plant managed by reservoir. It can be surmised that the use of adapted rules, rather than current rules, could reverse the tendency since in general, an increase in the inflows is projected.

In conclusion, this study was the first stage of a broader project that will propose adaptation policies to manage the Peribonka water-resource system in a climate change context. Work is currently in progress to quantify the water-resource system performance indicators under adapted operation rules resulting from a dynamic and stochastic optimization model.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

This article presents a portion of a project of the Impacts and adaptation program of the Ouranos Consortium on regional climatology and adaptation to climate change. The authors want to thank specific members of the Ouranos Consortium. Firstly, Mrs. Diane Chaumont, for her contribution to the production of climate change projections and Mr. Luc Roy for his advice about the hydropower production indicators. Also, the authors want to thank Mr. Bruno Larouche from the Alcan Company for their collaboration in supplying of all the data needed to simulate the water-resource system.

8. NOTATION

The following symbols are used in this paper:

α = Reliability

β_y = Vulnerability

F = Unsatisfactory state

NS = Number of time steps of a time period

$P_{cont,m}$ = Simulated actual precipitation at month m

$P_{fut,j,h}$ = Future precipitation at day j and horizon h

$\overline{P}_{fut,m,h}$ = Simulated future precipitation at month m and horizon h

$P_{obs,j}$ = Observed historical time series of precipitation at day j

S = Satisfactory state

$T_{cont,m}$ = Simulated actual temperature at month m

$T_{fut,j,h}$ = Future temperature at day j and horizon h

$\overline{T}_{fut,m,h}$ = Simulated future temperature at month m and horizon h

$T_{obs,j}$ = Observed historical time series of temperature at day j

V_t = Reference value (level or flow)

V_f = Value (level or flow) simulated or observed

z_t = State of the system for the time step t considered

9. REFERENCES

Bisson, J. L. and Roberge, F. (1983). Prévisions des apports naturels: Expérience d'Hydro-Québec. Paper presented at the Workshop on flow predictions, Toronto.

Boer, G. G. (2004). Long time-scale potential predictability in an ensemble of coupled climate models. Climate dynamics, 23, 29-44.

Caron, A. (2005). "Étalonnage et validation d'un générateur de climat dans le contexte des changements climatiques". MS Thesis, École de technologie supérieure, Montréal.

Christensen, N. S., Wood, A. W., Voisin, N., Lettenmaier, D. P. and Palmer, R. N. (2004). The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado river basin. Climatic change, 62, 337-363.

Diaz-Nieto, J. and Wilby, R. L. (2005). A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: Impacts on low-flows in the river Thames, United Kingdom. Climatic Change, 69, 245-268.

Fowler, H. J., Kilsby, C. G., O'Connel, P. E. and Burton, A. (2005). A weather-type conditioned multi-site stochastic rainfall model for the generation of climatic variability and change. Journal of hydrology, 38, 50-66.

IPCC. (2001). Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Mc Carthy, J.J, Canziani, O., Leary, N.A., Dokken, D.J. and White, K.S.). Cambridge: Intergovernmental Panel on Climate Change. 967 p.

IPCC. (2007a). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change (Parry, M.L., Canziani, J.P., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. and Hanson, C.E.). Cambridge, UK: Intergovernmental Panel on Climate Change. 1000 p.

IPCC. (2007b). Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group 1 to the Fourth assessment report of the IPCC (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller). Cambridge, United Kingdom and New-York: Intergovernmental Panel on Climate Change. 996 p.

Klipsch, J. D. (2003). HEC-ResSim, Reservoir System Simulation, User's Manual. Davis: US Army Corps of Engineers. 426 p.

Mimikou, M. and Fotopoulos, F. (2005). Regional effects of climate change on hydrology and water resources in Aliakmon River Basin, Foz do Iguaçu, Brazil.

Nakicenovic, N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T. Y. Jung, T. Kram, E. L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Raihi, A. Roehrl, H-H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor and Dadi, Z. (2000). IPCC Special Report on Emissions Scenarios. United Kingdom and New York, NY, USA. 599 p.

Payne, J. T., Wood, A. W., Hamlet, A. F., Palmer, R. N. and Lettenmaier, D. P. (2004). Mitigating the effects of climate change on the water resources of the Columbia river basin. Climatic Change, 62, 233-256.

Richardson, C. W. (1981). Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. Water resources research, 17(1), 182-190.

Sharma, R. H. and Shakya, N. M. (2006). Hydrological changes and its impact on water resources of Bagmati watershed, Nepal. Journal of hydrology, 327, 315-322.

Simonovic, S. P. and Li, L. (2003). Methodology for assessment of climate change impacts on large-scale flood protection system. Journal of water resources planning and management, 129(5), 361-371.

VanRheenen, N. T., Wood, A. W., Palmer, R. N. and Lettenmaier, D. P. (2004). Potential implications of PCM climate change scenarios for Sacremento-San Joaquin river basin hydrology and water resources. Climatic Change, 62, 257-281.

Whitfield, P. H. and Cannon, A. J. (2000). Recent variation in climate and hydrology in Canada. Canadian water resources journal, 25(1), 19-65.

Xu, C.-Y. and Singh, V. P. (2004). Review on regional water resources assessment models under stationary and changing climate. Water resources management, 18, 591-612.

ANNEXE V

Article 5 : Minville *et al.* (2008d)

Cet article a été soumis le 14 mai 2008 pour publication dans la revue Water Resources Management.

Minville, Marie, Krau, Stéphane, Brissette, François and Leconte, Robert. (2008d). Behavior and performance of a Nordic water-resource system under adapted operating policies in a climate change context. *Soumis à Water Resources Management le 14 mai 2008.*

Behaviour and performance of a Nordic water-resource system under adapted operating policies in a climate change context

Marie Minville, Eng. jr

Stéphane Krau, Ph.D.

François Brissette, Eng., Ph.D., member ASCE

Robert Leconte, Eng., Ph.D.

In this paper, the behaviour of the water resource system of the Peribonka River (Quebec, Canada) is evaluated under various hydrological regimes, using different climate change scenarios. The hydrological regime of the recent past and the regimes of 30 climate projections are considered. The potential hydrological regimes are simulated for climate projections from five general circulation models (GCM) for two greenhouse gas emission scenarios (GHGES) and three temporal horizons (2020, 2050 and 2080). For each hydrological regime, weekly reservoir operating rules are calculated with a dynamic and stochastic optimization model. Simulations of the water resource system with adapted operating rules in these climate change contexts are compared with the water-resource system management of the control period (1961-1990).

The analysis of simulations in the context of climate change shows, for the majority of climate projections, an increase in hydropower and in annual unproductive spills. These increases reach 22% and 300%, respectively, compared to the control period. Also, the reliability of a reservoir is compromised for half of the climate projections, with annual probabilities reaching above the maximum operating levels, up to 0.3%, whereas these probabilities were null for the control period. Despite the rise in production, the annual efficiency of the power plants would fluctuate between -5 to +8%, depending on the power plant, the climate projection and the horizon.

Keywords: Climate change, Adaptation, Water resource systems, Operating policies, Hydropower, Reservoir reliability

INTRODUCTION

The international scientific community recognizes that climate changes will impact water resources. Observations in the last decades reveal that climate change has already begun. Regonda *et al.* (2005) and Whitfield and Cannon (2000) analyzed the recent hydrological tendencies in the United States and Canada, respectively. They observed that several areas presented an early spring flood and higher winter flows. Consequently, changes in the hydrological regimes will have effects on the storage and management of reservoirs (Christensen *et al.*, 2004). The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) reports that these changes could have positive or negative impacts (Kundzewicz *et al.*, 2007). They specify that "current water management practices are very likely to be inadequate to reduce the negative impacts of climate change on water supply reliability, flood risk, health, energy, and aquatic ecosystems". Modifications in climate variables, such as precipitations and temperatures, will have impacts on the hydrological regimes, which will affect the management of water resource systems.

The aim of the work is to evaluate the impacts of and the adaptations to climate changes in the management of the water resource system of the Peribonka River, a Nordic water resource system exploited for hydropower. The evaluation of these impacts was carried out by adapting operating rules according to the potential hydrological regimes of 2010 to 2099, and then comparing these rules with the management of the control period, 1961-1990. A dynamic and stochastic optimization model (Turgeon, 2005) is used. The model pre-calculates the weekly reservoir operating rules according to the inflows distribution of a given hydrological regime and the levels of the reservoirs. These operating rules are then used with a water resource simulation model to simulate the management of the water resource system for each hydrological regime in a climate change context, and also for the control period. Management strategies resulting from the various hydrological regimes are

then compared according to the reservoir levels' trajectories, the hydropower, power plant efficiency and unproductive spills.

Thirty hydrological regimes, simulated with 30 climate projections, were used to consider climate change uncertainty. These were developed from five general circulation models (GCMs), each forced with two greenhouse emission scenarios (GHGES) at three temporal horizons (2020, 2050 and 2080). Climate projections were downscaled according to the deltas change approach. Climate series representative of each projection, as well as for a control period (1961-1990), were then produced with a stochastic weather generator, in order to include, at least partially, the climates' natural variability. The flows resulting from each climate projection and the control period were then simulated with a lumped hydrological model.

The first section of the article is a literature review, followed by an overview of the studied water resource system. In the third section, an overall portrait of the methodology is presented and the principal steps are described. The results of the hydrological and water resource system simulations are then presented. Lastly, a discussion is followed by a mention of limitations and the conclusion.

LITERATURE REVIEW

Many works have been published recently on the impacts of climate changes on the hydrological regimes of watersheds. In general, these studies incorporate one or more climate change projections into a hydrological model. Very few studies have investigated the impacts of climate changes on the management of water resource systems.

However, among those few, Payne *et al.* (2004), Christensen *et al.* (2004) and VanRheenen *et al.* (2004) realized, within the framework of companion papers, studies that make use of a similar methodology. Their objective was to evaluate the impacts of climate changes on the management of three water resource systems intended for multiple uses. These authors did not consider the adaptive character of the management of a water resource system and so they applied the current reservoir operating rules to the simulations with future hydrological

inflows. They evaluated the impacts on the annual average hydropower, the fish target and unproductive spills, in particular. Payne *et al.* (2004) proposed a first-adaptation study to counter the decrease in management performance in the context of climate change. They carried out a sensitivity analysis of reservoir filling dates, energy demand and summer reservoir minima levels.

Markoff and Cullen (2008) studied the impacts of climate changes on the hydropower of the installations of the Pacific Northwest Power and Council conservation in the United States. They prepared 35 climate projections, using the delta change method, for the horizons 2020 and 2050, and incorporated them into a Variable Infiltration Capacity (VIC) hydrological model. The projected hydrological inflows were then incorporated into two reservoir simulation models, with current operating rules, in order to determine the impacts of climate change on hydropower. The principal conclusion of their study is that hydropower would decrease in the future for the majority of climate projections. However, they specify that this result is too pessimistic because their methodology does not optimize the reservoir operating rules with the future hydrological regimes.

A dynamic approach to modifying the operation rules was employed by Carpenter and Georgakakos (2001) and Yao and Georgakakos (2001), who evaluated the impacts of one climate change projection with recourse to a decision support system that dynamically modified the operation rules. They concluded that adapted operating rules could substantially increase the performance of the management indicators, and that the dynamic approach was a promising avenue for climate change adaptation studies.

The significant originality of the work presented is that climate change uncertainty is combined with evaluating the adaptive potential of management under various hydrological regimes over a 90-year period (2010-2099).

STUDIED AREA

The Peribonka River watershed (figure 1) is located in the southern center of the province of Quebec, Canada.

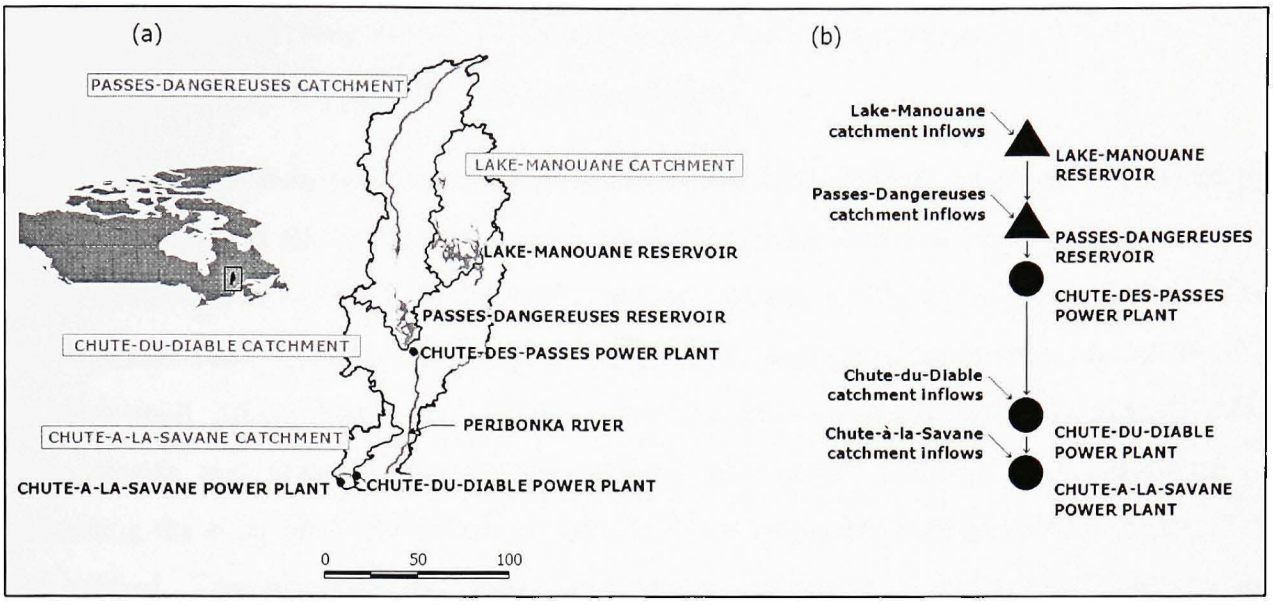


Figure 1. (a) Peribonka river watershed and its components (b) Water resource system scheme

The water resource is exploited exclusively for hydropower by Rio Tinto Alcan, with an installed capacity of 1165 MW. Power plants feed energy into the company's various Aluminum smelting facilities. The system is managed to maximize hydropower. Two large reservoirs store water (Lake-Manouane - 2700 hm^3 and Passes-Dangereuses - 5200 hm^3) and they feed three power plants laid out in series on the Peribonka river (Chute-des-Passes, Chute-du-Diable and Chute-à-la-Savane). The Chute-des-Passes power plant is adjacent to the Passes-Dangereuses reservoir. The Chute-du-Diable and Chute-à-la-Savane power plants are classified as run-of-river in the study, even though they have small reservoirs.

The Peribonka river watershed (27000 km^2) is subdivided into four principal subbasins, from upstream towards downstream: Lake-Manouane (5000 km^2), Passes-Dangereuses (11000 km^2), Chute-du-Diable (9700 km^2) and Chute-à-la-Savane (1300 km^2). The watershed is mainly comprised of uninhabited boreal forest.

This regions' climate is moderate, with an annual average temperature of -0.5°C and annual average precipitations of 1010 mm, with 40% falling as snow (according to the records for

1953-2003). The freezing period, when the average daily temperatures are lower than 0°C, spreads over six months between November and April.

The watershed is located in the mean latitudes and its hydrological regime is dominated by snow accumulation and snow melt. The management of the water resource system is related to the hydrological context at three distinct periods: winter, spring and summer-autumn. The hydrological year begins with the winter, when the average temperatures are below the freezing point. Snow accumulates on the ground and does not contribute to the runoff. Some rainy events and rises in temperature episodes can occur, however, and contribute to increasing the base flow. Nevertheless, inflows to the reservoirs remain weak in general for this period. The level of the Passes-Dangereuses reservoir is held very close to its exploitation level so that the adjacent power plant benefits from a bigger water head. In spring, the temperatures rise above the freezing point and there is snowmelt. The Passes-Dangereuses reservoir level must be sufficiently lowered at the end of winter in order to store the spring flood and to thus minimize spills. The fluctuations of flows during the summer-autumn season are caused by rainy events. The Passes-Dangereuses reservoir is managed in order to prevent flood while maximizing the water head of the adjacent power plant. Since there is no power plant at Lake-Manouane, this reservoir is only used as a water reserve to fill the Passes-Dangereuses reservoir.

The annual mean flow of the Peribonka river is 635 m3/s. Spring mean flows (AMJ) account for 43% of the annual mean flow, whereas the winter inflows (DJFM) account for 10% and those of summer-autumn (JASON) for 47%.

METHODOLOGY

The methodology followed is summarized in five parts:

i. Preparation of 30 climate change projections (5 GCMs x 2 GHGES x 3 time horizons).

ii. Generation of synthetic climate data representative of climate projections and the control period (30 series of 30 years for each of the 30 climate projections as well as the control period, for a total of 31 series totalling 900 years).

iii. Simulation of the hydrological regimes for each of the four principal sub-basins with the 31 climate series.

iv. Generation of 31 sets of reservoir operating rules for the 31 hydrological regimes.

v. Simulation of the reservoirs' operations with the 31 hydrological regimes and the corresponding weekly operating rules set.

CLIMATE CHANGE PROJECTIONS

The decisions for the development of regional adaptation strategies of water resource system management are slowed down by the uncertainty of climate projections. The first stage to achieve is to be able to consider an uncertainty while trying to circumvent it, while accessing all the climate projections available for an area.

The minima and maxima temperatures and mean precipitations used here are from five GCMs for two GHGES (Nakicenovic *et al.*, 2000). These climate data were drawn from the GCMs of the United Kingdom (HadCM3), Europe (ECHAM4), Australia (CSIRO), Japan (CCSRNIES) and Canada (CGCM3). They cover the period 2010 to 2099, which is split into three time horizons (2020: 2010-2039, 2050: 2040-2069 and 2080: 2070-2099). Monthly variations (usually called "deltas") of the climate data, between the control period (1961-1990) and each horizon were extracted from each GCM.

GHGES A2 and B2 were selected for each GCM, except for CGCM3, for which the B1 scenario was selected. The climate data under the B2 scenario were not available for CGCM3. The A2 scenario is an average scenario which corresponds roughly to a tripling of CO_2 in the atmosphere in 2080, compared to the control period. The B2 scenario suggests a doubling for the same horizon and B1 predicts a return to the level of 1990 GHG. These projections are presented in Table 1. The numbers of the projections (1 to 10) will be referred in the text and in the figures.

Climate data was downscaled to the daily time step according to the delta changes method (Diaz-Nieto et Wilby, 2005; Minville *et al.*, 2008). This method was applied to the historical

data of the control period, and to the deltas of temperatures and precipitations of the GCMs at each horizon.

Table 1. Climate projections used

Id	GCMs-GHGES couple	Id	GCMs-GHGES couple
1	HadCM3 A2	2	HadCM3 B2
3	ECHAM4 A2	4	ECHAM4 B2
5	CSIRO A2	6	CSIRO B2
7	CCSRNIES A2	8	CCSRNIES B2
9	CGCM3 A2	10	CGCM3 B1

SYNTHETIC TIME SERIES

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) has stated that "improved incorporation of current climate variability into waters-related management would make future adaptation to climate changes easier" (Kundzewicz *et al.*, 2007). In complete agreement this view, synthetic climate series representative of 30 climate projections and climate data for the control period were produced. For each one of these 31 series, 30 series of 30 years (900 years of data) were created with a stochastic weather generator. The climate data thus generated are the minimal and maximum temperatures, and precipitations at the daily time step.

A Richardson-type (1981) weather generator was used (Caron, 2005; Mareuil *et al.*, 2007). One advantage of using a weather generator is that it produces synthetic climate series of theoretically infinite lengths. These series have the same statistical properties as the original series while partly accounting for a climate's natural variability. The synthetic series limit the uncertainty associated with a single climate series. However, variability is only partially considered since the decanal cycles are not simulated for the generated climate data. The creation of synthetic series implies that the data are supposed to be stationary at each temporal horizon.

HYDROLOGICAL SIMULATIONS

Hydrological simulations were carried out for each of the 31 synthetic climate series (30 representating the different projections and 1 representating the control period). The HSAMI hydrological model was used with a daily time step interval. The flows were then averaged at a weekly time step for simulations of the water resource system operations.

HSAMI is a linear reservoir-based lumped conceptual model that can generate the runoff from two unit hydrographs. It can simulate the naturalized inflows of a managed river or the discharge of a basin where the flows are natural, according to climate observations or weather forecasts of variables such as minimal and maximum temperatures, precipitation, radiation and snow depth. HSAMI simulates evapotranspiration, precipitation, interception of rain and snow, and infiltration, as well as the vertical flow processes (Bisson et Roberge, 1983; Fortin, 2000). It can simulate flows at hourly to daily time steps. The HSAMI hydrological model was developed and has been used operationally by Hydro-Quebec for twenty years for short- and medium-range flow forecasting. It is currently used for daily forecasting of natural inflows on 84 watersheds with surface areas ranging from 160 km^2 to 69195 km^2.

OPERATING RULES GENERATION

The reservoir operating rules were produced with a dynamic and stochastic optimization model (Turgeon, 2005). For each of the 31 climate regimes, 31 hydrological inflows were generated with the HSAMI hydrological model. The optimization model calculates weekly reservoir operating rules for each one of these climate regimes. The reservoir operating rules consist of the weekly regulated outflow of the reservoirs. Outflow will depend on the week of the year, the initial levels of these two reservoirs, and the inflows. Two assumptions are made: that the cumulative flows of the current week are known at the beginning of each week and that the inflows into the reservoirs are perfectly correlated. These reservoir operating rules maximize the goal of future profits, calculated as the monetary value of the production minus the cost of any violation of exploitation constraints.

The optimization model requires, for each hydrological regime, knowledge of weekly hydrological inflows as well as the characteristics of the water resources system: characteristics of the turbine-alternator groups, production curves, hydraulic capacity, operation constraints, reservoir characteristics and the penalties for the violation of constraints.

WATER RESOURCE SYSTEM SIMULATIONS

The reservoirs' operations were simulated with a weekly time step using a model specifically programmed for the needs of the study. The particular characteristics of the spillways and power plants are considered. Reservoir operating rules, generated by the optimization model, are used in order to simulate the operations of the water resource system subjected to weekly hydrological inflows.

The simulations of the operations for the different projected climate changes were not compared with the observed operations, but instead, compared with the operations that were simulated with the control period. This strategy allows any bias from the hydrological model to the inflows to be eliminated. However, it should be mentioned, as an indication, that the simulation model reproduced the observed annual average production with an over-estimate of 1.5%. The history of the operations of the water resource system used for this comparison comprised 15 years of data.

For simulations of the water resource system operations, no energy demand was specified -- either at the control period or for future simulations. The simulations' objectives are to maximize the average weekly hydropower.

RESULTS

CLIMATE CHANGE PROJECTIONS

Figure 2 shows the annual deltas of temperatures and precipitations at each temporal horizon, compared to the control period. The scatter plot presents the changes of mean annual temperatures as a function of the changes in mean annual precipitations projected by each GCM.

The annual tendency of the MCG is univocal: each one projects rises in annual temperatures and precipitations. The amplitude of these increases is accentuated with time. The temperatures increase by 2 to 10°C and precipitations from 2 to 28% between 2020 and 2080. The changes in temperature as a function of the changes in precipitations are dispersed more and more at each horizon, which indicates that intermodel uncertainty is accentuated with time.

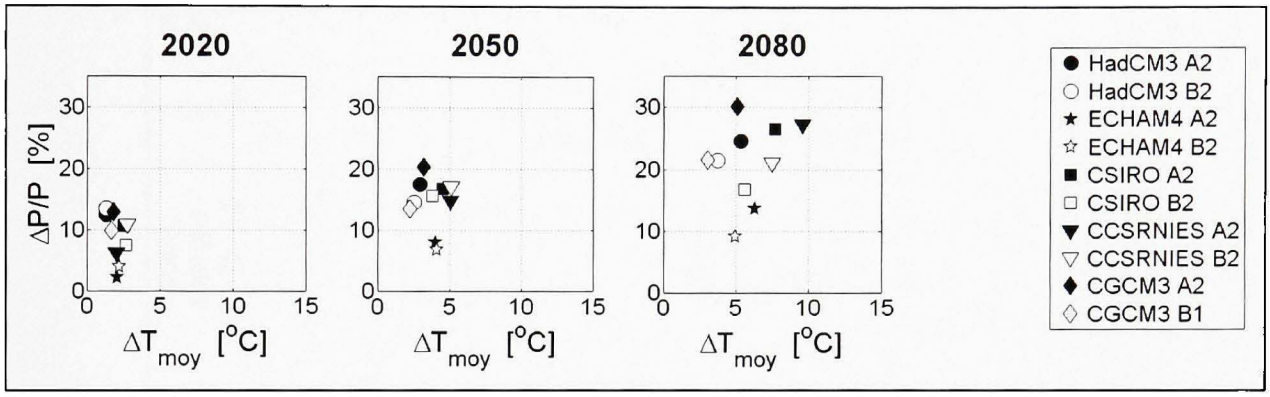


Figure 2. Annual deltas of climate change projections

The seasonal deltas are presented in figure 3. Most of the climate projections show seasonal increases in precipitations, except for ECHAM4 in the spring, which projects reductions of less than 1%. For the majority of projections, the largest increases in temperature would occur in the winter. For horizon 2080, the winter temperatures could increase by 12°C under CCSRNIES A2 and precipitations by 47% with CGCM3 A2.

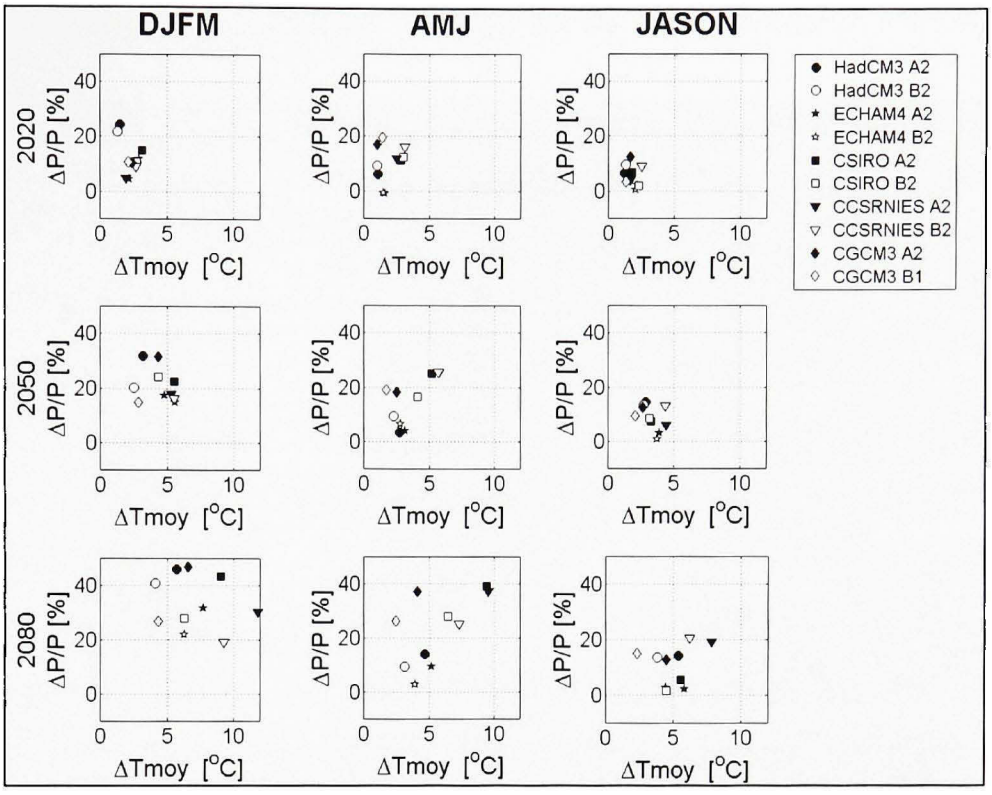


Figure 3. Seasonal deltas of climate change projections. (DJFM: December, January February and March; AMJ: April, March and June; JASON: July, August, September, October and November)

Three characteristics of the climate variables are particularly likely to have an impact on the reservoir operations as the climate changes: freezing period, winter precipitation and the proportion of winter precipitations falling as rain. Table 2 shows the starting and ending dates of the freezing period for climate projections compared to the control period. The freezing period, which is six months in the control period, could shrink to as short as four months under the climate projected by CSIRO A2 in 2080.

Table 2. Mean freezing period. Example for the Passes-Dangereuses subbasin

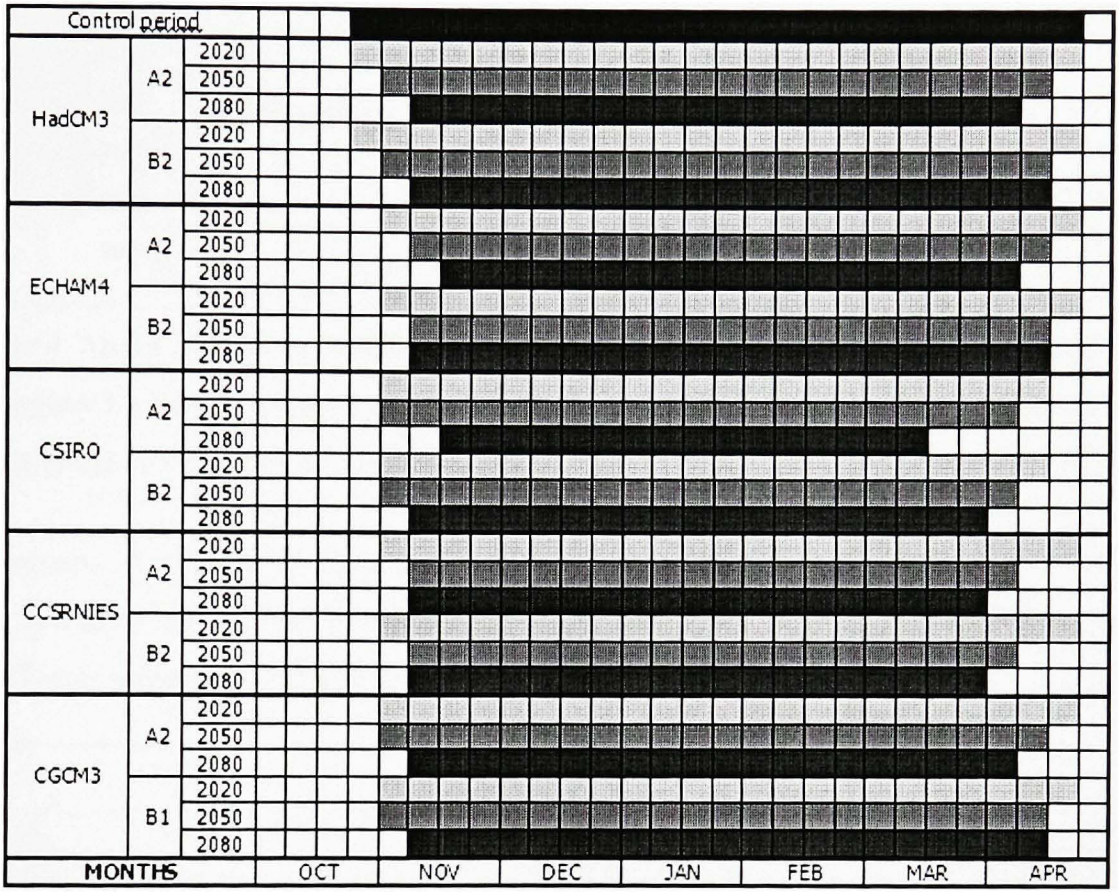


Figure 4 presents the average winter precipitations at each climate change horizon and for all projections, compared to the control period. The quantities of winter rain are represented by the gray bar, and the quantities of snow, by the white. It is obvious that winter precipitations tend to increase between 2020 and 2080 for all projections.

For the years from 2020 to 2050, the quantities of precipitation in snow form would not be lower than the quantities of the control period. The excess would fall in as rain. However, by 2080, the quantities of snow precipitation would decrease by almost a quarter compared to the control period. Winter rain precipitations could increase by more than a factor of 10 compared to the control period.

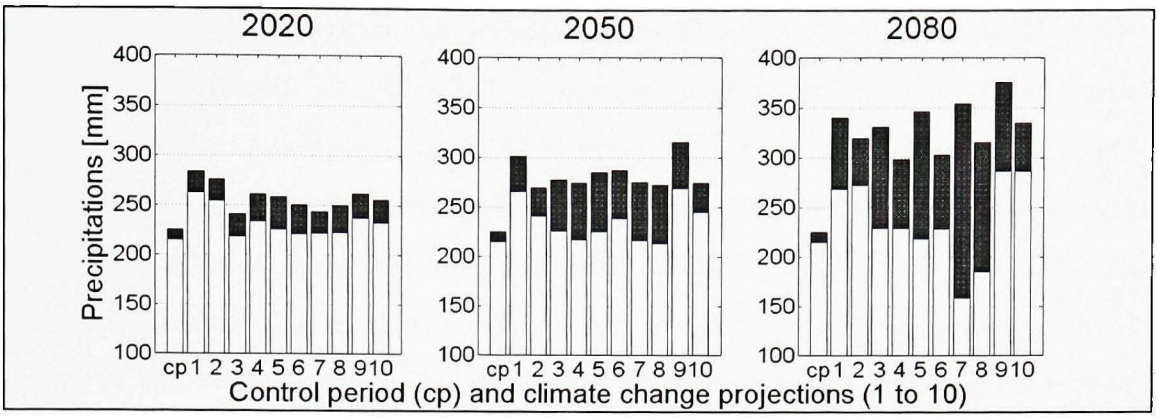


Figure 4. Mean annual precipitations. The quantities of winter rain are represented by the gray bar, and the quantities of snow, by the white. Numbers 1 to 10 refer to the climate projections of table 1. Representative example for the Passes-Dangereuses sub-basin

The impacts of climate changes on the mean annual and seasonal flows are illustrated in figure 5. Flows are expressed as a percentage of the annual flow of the control period, for each climate projection and horizon.

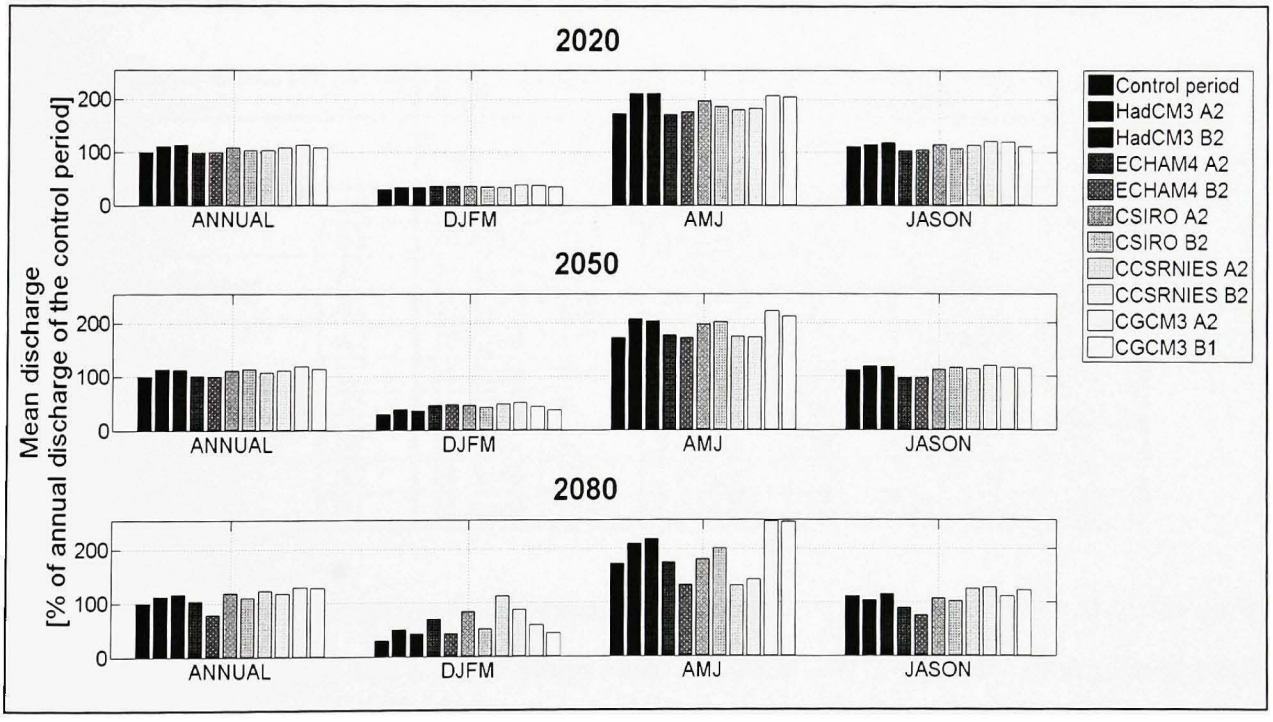


Figure 5. Mean annual and seasonal discharge, as a percentage of the annual discharge of the control period

In 2020, climate projections generate increases in the annual and seasonal flows compared to the control period, except for ECHAM4 in summer-autumn. By 2050, this same tendency is more accentuated. Conversely, by 2080, mean annual flows decrease for projection ECHAM4 A2 and the spring, and summer-autumnal flows decrease for approximately half of the climate projections. The winter flows increase, and with projection CCSRNIES A2 they are almost quadrupled. As a comparison, these winter flows are equivalent to the annual mean flow of the control period. This projection is also unique for its important decreases in spring flows. CCRSNIES A2 is the climate projection that utilizes hydrological regimes with the most attenuated interseasonal differences.

Table 3 synthesizes the median values of the spring flood starting dates and the peak flow under each climate projection. The flows are expressed as a percentage of the median peak flow for the control period.

Table 3. Beginning date of the spring flood, and mean peak flow as a percentage of the control period. The beginning date for the control period is April 30

Horizon		2020		2050		2080	
		Date	Débit (%)	Date	Débit (%)	Date	Débit (%)
HadCM3	A2	30 April	136	25 April	133	13 April	134
	B2	30 April	137	24 April	122	21 April	144
ECHAM4	A2	23 April	100	19 April	103	9 April	99
	B2	25 April	103	17 April	97	13 April	99
CSIRO	A2	18 April	117	8 April	115	18 March	107
	B2	18 April	105	15 April	121	4 April	114
CCSRNIES	A2	21 April	98	8 April	92	19 March	53
	B2	19 April	98	9 April	89	3 April	50
CGCM3	A2	28 April	129	23 April	141	15 April	159
	B1	26 April	120	24 April	130	23 April	164

In the control period, the spring flood began on average on April 30. By 2020, it could occur two weeks earlier under the CSIRO projections. In 2050 and 2080, the spring flood could start three to five weeks earlier, respectively, under the CCSRNIES and the CSIRO projections. In general, the spring peak flow tends to increase for most projections at each horizon, with the exception of projections where the increases in winter temperatures are the

highest. Higher winter temperatures, by projections CCSRNIES and ECHAM4, increase the winter runoff because of the rain and the warmer episodes. The stock of snow accumulated during winter, and consequently the quantity available for the spring flood is reduced, decreasing the spring flood peak.

IMPACTS AND ADAPTATION OF THE RESERVOIR SYSTEM

Reservoir operating rules

The trajectories of the reservoirs' mean levels are illustrated in figure 6, which shows the mean levels of reservoirs Lake-Manouane and Passes-Dangereuses, resulting from 10 climate projections at the three horizons and for the control period.

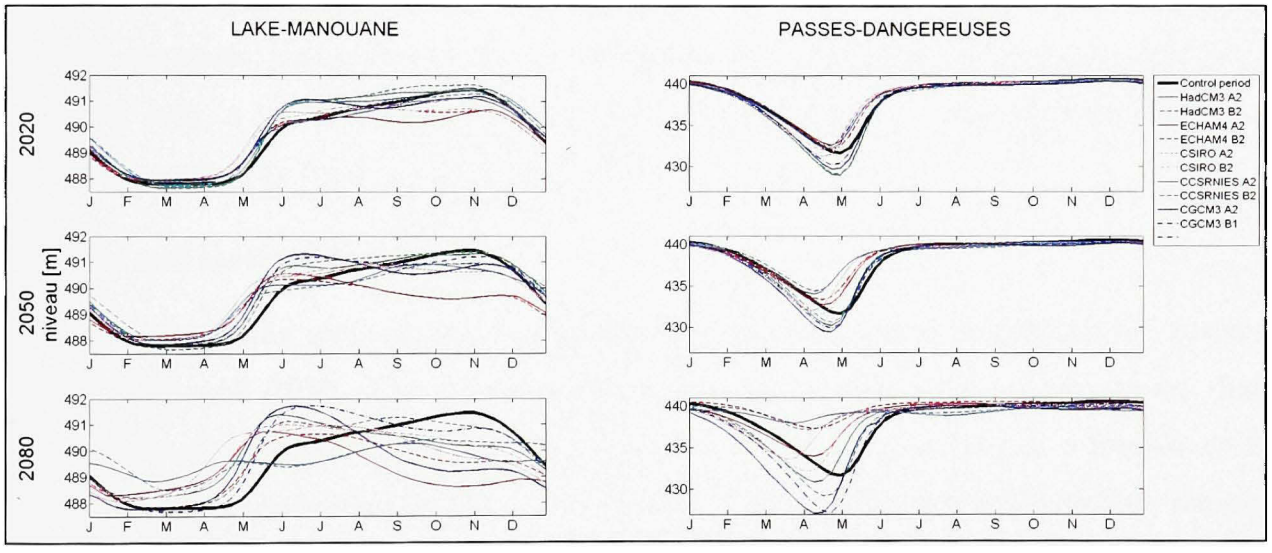


Figure 6. Mean reservoir levels for the climate change projections, compared with the mean level of the control period (in the dark bold line)

A first observation is that the levels of the Lake-Manouane reservoir are lowered later in winter in a climate changes context, and for the Passes-Dangereuses reservoir, they are generally lowered earlier.

Specifically for the Lake-Manouane reservoir, a greater variability between climate projections is simulated for summer-autumn. This inter-projection variability grows more pronounced as the studied horizon is extended. In 2080, an inversion of the seasonality of the

mean levels occurs between the summer-autumn and spring compared to the control period: they are maintained higher in spring and lower in summer-autumn for most of the climate change projections at each horizon.

For the Passes-Dangereuses reservoir, the impacts of climate projections on the mean levels were analyzed according to two indicators: the minimum level in spring and the mean week when this minimum level is reached. In the control period, the spring minimum occurred at week 18 on average. Comparatively, the level is at a minimum at week 16, 15 and 12 at horizons 2020, 2050 and 2080, respectively. Also, the minimum mean annual level of the reservoir is lower for half of the climate change projections.

The trajectories of the mean levels with the CCSRNIES climate projection in 2080 are worth special mention. Under this projection, the level of the Passes-Dangereuses reservoir is lowered only a small amount in spring and the level in the Lake-Manouane reservoir fluctuates very little from one season to another.

Annual and seasonal hydropower

Figure 7 shows the total annual and seasonal hydropower for 10 projections for horizons 2020, 2050 and 2080. The results are expressed as a percentage of the annual mean production of the control period. The seasonal values are also presented as a fraction of the annual average production of the control period. This representation allows any seasonal changes which may occur to be easily highlighted.

The first observation is that the annual mean production decreases only under climate projection 3-ECHAM4 B2 in 2020, and by 1%. For other projections, the increases in the annual average production vary between 1 and 22%.

Another observation is that the seasonal variation changes with time. The production is at a maximum in summer-autumn for the control period and in 2020. In 2050 and 2080, it gradually reaches its maximum in the winter. Also, the seasonal mean production is almost always higher in the context of climate change, compared to the control period, except for projections 3-ECHAM4 A2 and 4-ECHAM4 B2.

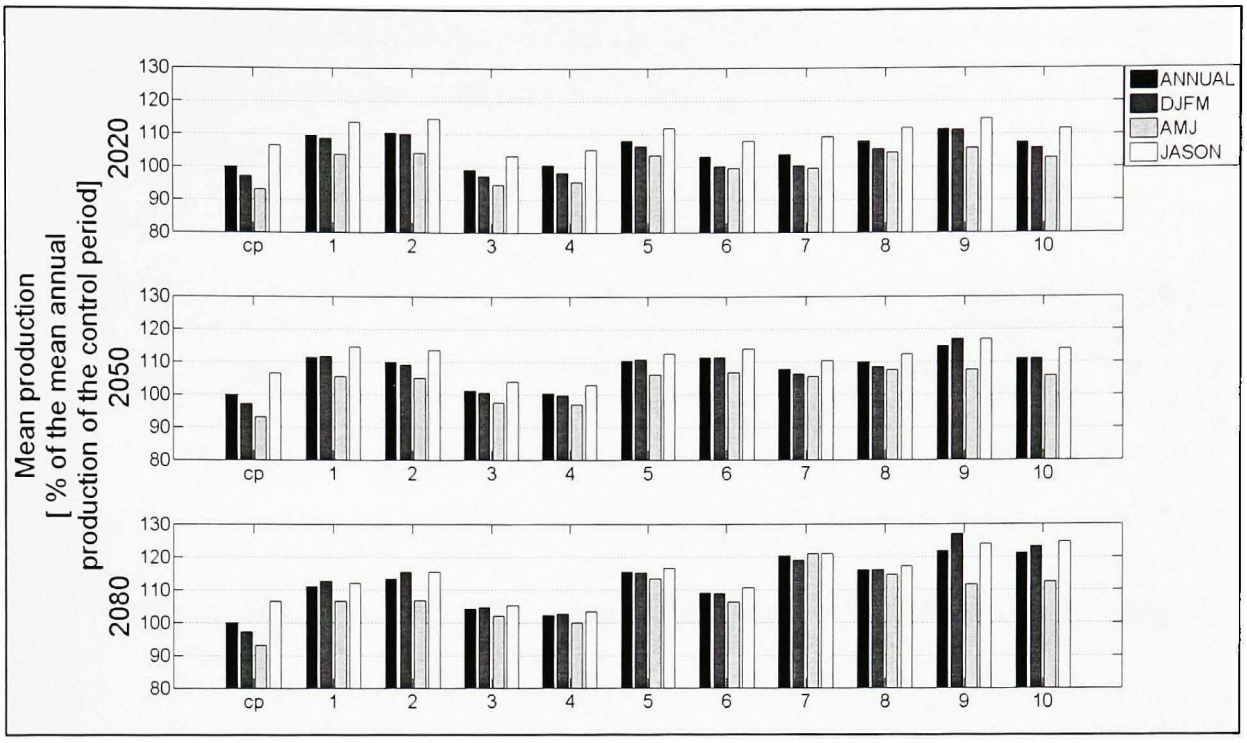


Figure 7. Annual and seasonal mean hydropower, as a percentage of the annual production of the control period. cp is the control period and numbers 1 to 10 refer to the climate projections of table 1

Power plant efficiency

Power plant efficiency is the ratio of the hydropower to the sum of the spills and turbinated flows. Figure 8 presents the gain and loss in annual efficiency of each power plant, for each climate projection and future period, compared to the control period.

The trend shows a reduction in the power plants' efficiency with time, which means that for the same quantity of water used in the future, there would be less production. The ECHAM4 (3 and 4) projections are the exceptions, with an increase in efficiency up to nearly 5% in 2080 for the Chute-à-la-Savane power plant. The losses in efficiency are most significant for climate projections CGCM3 (9 and 10), with decreases up to 8% in 2080 for the Chute-à-la-Savane power plant.

In general, the decreases in efficiency affect the downstream more than the upstream power plants, except for projections CCSRNIES (7 and 8), for which the Passes-Dangereuses' decrease in efficiency is greater.

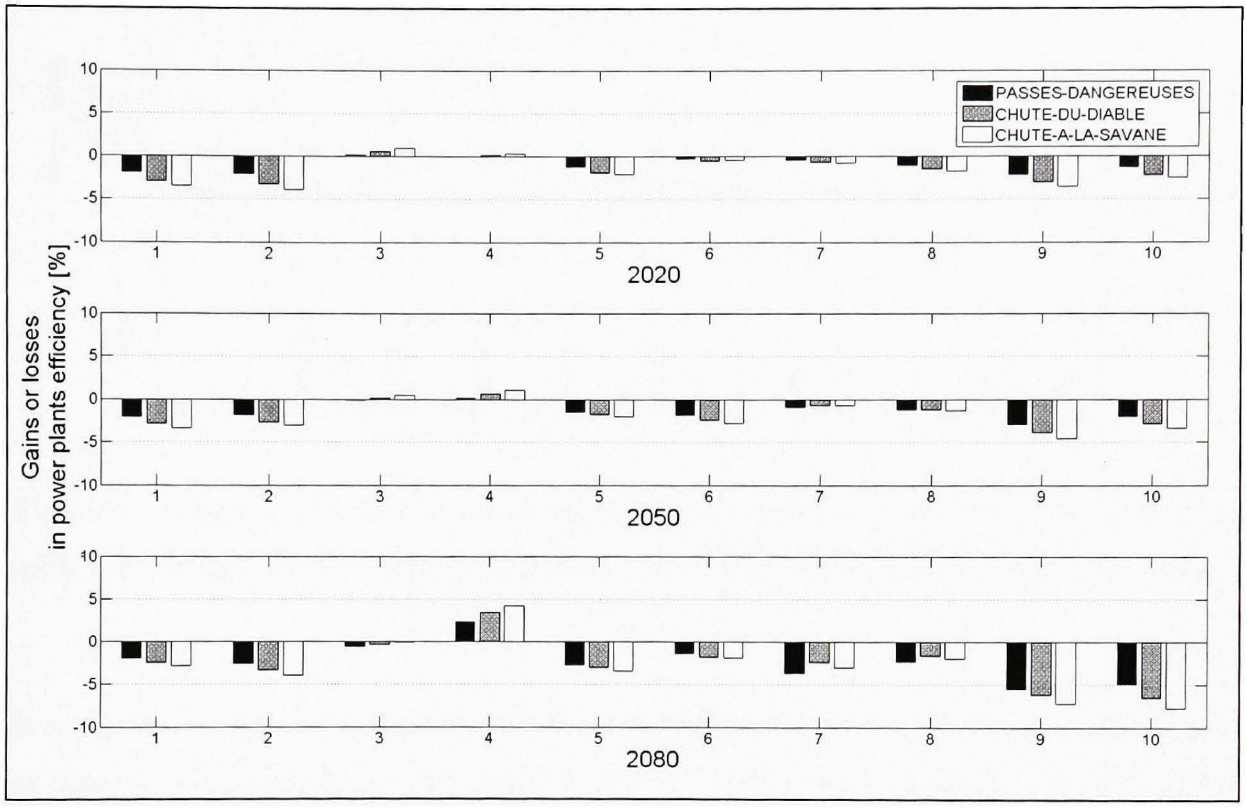


Figure 8. Gains and losses in annual efficiency, as percentages of the annual efficiency for the control period.

Unproductive spills

Figure 9 shows the mean annual and seasonal unproductive spills of the Passes-Dangereuses reservoir, for the control period and the climate projections.

On an annual scale, all simulations of reservoir operations in a climate change context involve more spills than for the control period. Simulations under 3-ECHAM4 A2 and 4-ECHAM4 B2 are, however, exceptions.

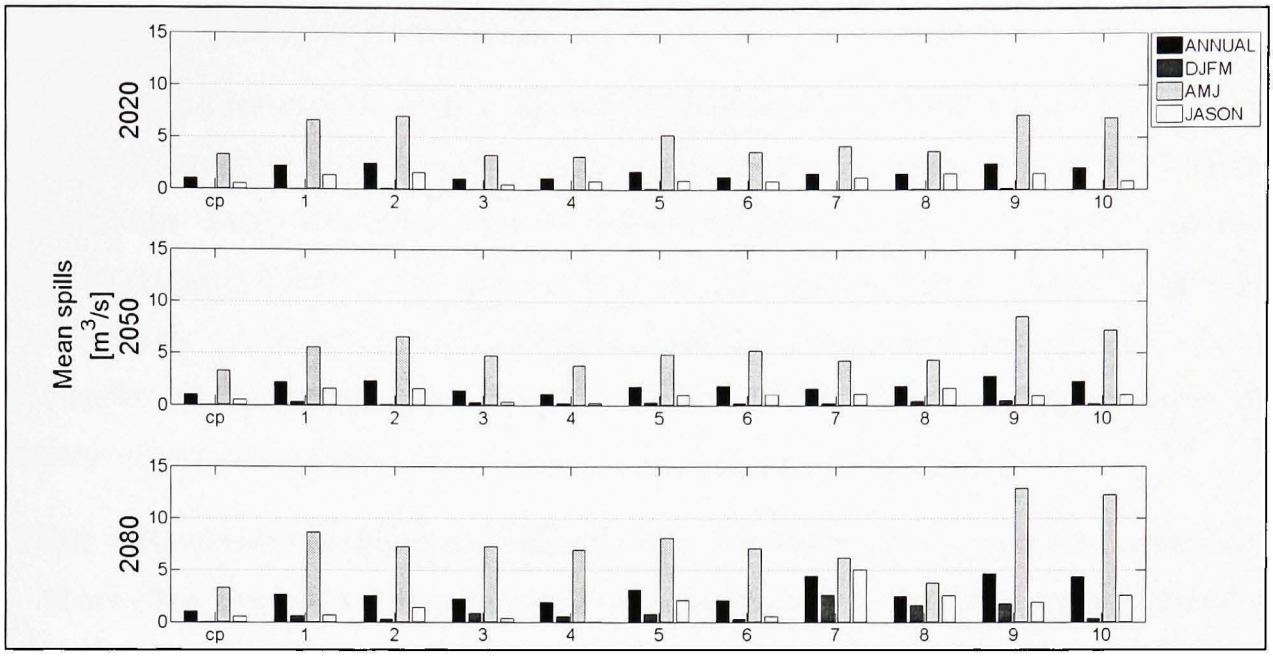


Figure 9. Annual and seasonal mean unproductive spills, as percentages of the annual spills for the control period (cp). Numbers 1 to 10 refer to the climate projections of table 1

On a seasonal scale, the spills increase more in winter and spring. In winter, average spills are almost non-existent for the control period. They increase for all of the climate projections, and in particular by more than four orders of magnitude in 2080 with projections 7-CCSRNIES A2 and 8-CCSRNIES B2. In spring, spills also increase with almost all the projections except for 4-ECHAM4 A2 in 2020, which is at the control level. The largest spring increases are with projections 9-CGCM3 A2 and 10-CGCM3 B1 in 2080, where the spills more than triple. The summer-autumnal spills decrease by half under projections 3-ECHAM4 A2 and 4-ECHAM4 B2 in 2050 and 2080. Other projections propose increases, up to the quintuple of the control level with 10-CGCM3 B1 in 2080. Spills with 7-CCSRNIES A2 and 8-CCSRNIES B2 present less inter-season differences and tend to become more constant throughout the year.

Reservoir reliability and vulnerability

In this study, a reservoir is reliable, for a given time step, if its level is under the overflow level. The "overflow level" is defined as the water level that corresponds to the low point of the reservoir. Table 4 shows the results of reservoir reliability and vulnerability. The first value is the annual probability of going beyond this maximum level. The value between brackets is the maximum overflow simulated at each horizon and projection. The probability of overflow is obtained from the ratio of the number of years when there are overflow to the number of simulation years.

Table 4. Reservoir reliability and vulnerability. The first values express the probability of overflow as a percentage and the value in parenthesis is the maximum simulated overflow in meters

		Lac-Manouane			Passes-Dangereuses		
Control period		0 (0)			0 (0)		
		2020	2050	2080	2020	2050	2080
HadCM3	A2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0.1 (0.34)	0.1 (0.68)
	B2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0.2 (0.20)	0.1 (0.21)	0 (0)
ECHAM4	A2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	B2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
CSIRO	A2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	B2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
CCSRNIES	A2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	B2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0.1 (0.15)	0 (0)
CGCM3	A2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0.1 (0.67)	0.1 (0.26)	0.2 (1.76)
	B1	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0.3 (0.60)

In summary, the levels of the Passes-Dangereuses reservoir exceed the maximum level in the context of predicted climate change, whereas they were not exceeded in simulations of the control period. Climate projections for which the reservoirs reliability is compromised are HadCM3 and CGCM3. However, projection CGCM3 is notable for larger and more frequent overflow. An analysis of the overflows showed that they occur in spring, between weeks 16 and 24.

DISCUSSION

The simulation of the operations of the Peribonka river water resource system, with the hydrological regimes using climate change models and operating rules adapted to these scenarios, shows that the system would be managed differently in the context of climate change. The trajectories of the mean levels indicate that an optimal management in the future would be different than that for the control period. Despite the inter-projection variability, which is accentuated with time, certain tendencies can be observed in the trajectories. In spring, the average week for lowering the Passes-Dangereuses reservoir is earlier, while it is delayed for Lake-Manouane. The Passes-Dangereuses reservoir, located downstream in the water-resources system, is emptied so it can contain the spring flood in order to minimize the overflow. The Lake-Manouane reservoir, located upstream of the Passes-Dangereuses reservoir, is emptied later to in order to maximize the water head to the Passes-Dangereuses reservoir. In summer-autumn, the levels are maintained lower, on average, in both reservoirs. This modification of the rule is due to two characteristics of the hydrological regimes. Firstly, they are kept low when the inflows increase. This management allows the overflow to be minimized under projections which generate increases in flows. Secondly, the levels are maintained higher when the flows decrease, to ensure a maximum water head to the Chute-des-Passes power plant.

The adaptation of the reservoir operating rules is consequent with changes in the hydrological regimes. The changes in the hydrological regimes are reflected by increases of the mean annual flow in the context of climate change, compared to the control period. These annual increases generally produce rises in annual mean hydropower. However, the increases or reductions in seasonal flows compared to the control period do not necessarily involve change in the same direction for the seasonal hydropower, in particular in spring. For example, projections 4-ECHAM4 B2, 7-CCSRNIES A2 and 8-CCSRNIES B2 in 2080 showed marked reductions in the spring flows compared to the control period. However, an increase in hydropower at this season is nevertheless projected, which can be explained by the reduction of the spring flood, making the inflows more uniform. This condition generates

higher mean levels in the reservoirs. Consequently, the water head is higher for the power plants with a reservoir. Also, the flow is more constant for the run-of-river power plant. However, the reductions and increases in the seasonal average production are coherent with the changes of sign in the flows in winter and summer-autumn.

The increase in hydropower in the context of climate change is not accomplished without compromising the reliability of the Passes-Dangereuses reservoir. Whereas no overflow was simulated for the control period, the reliability decreases over time with the climate change predictions. An analysis of the reservoir level in the context of climate change was carried out. One observation is that all of the overflows occur in spring, simulated for climate projections that generate increases in spring mean flows from 10% to 35% compared to the control period. It is supposed that the operating levels are possibly not adapted to the future potential hydrological regimes of these climate projections

Another aspect that was investigated is the impact of the annual hydrograph shape on the management indicators of the water resource system. For example, the seasonal mean flows for climate projections 7-CCSRNIES A2 and 10-CGCM3 B1 were compared. These projections differ largely in their hydrograph shape, but they anticipate rises of hydropower of the same order of magnitude. Their seasonal mean flows nevertheless differ in several aspects: 7-CCSRNIES A2 causes mean seasonal flows close to its annual medium flow whereas 10-CGCM3 B1 generates a hydrograph with a very marked spring flood, with weak increases in winter flows. The difference in the management indicators is that the inter-seasonal hydropower is more uniform under 7-CCSRNIES A2 and it is markedly increased under 10-CGCM3 B1. Also, projections 7-CCSRNIES A2 and 10-CGCM3 B1 in 2080 cause equivalent mean annual spills, but they are very different when analyzed on a seasonal scale. Projection 7-CCSRNIES A2 involves relatively uniform seasonal spills, whereas the differences between the seasons are very marked under 10-CGCM3 B1.

Lastly, it should be emphasized that the trend of increasing hydropower simulated with the future potential hydrological regimes does not necessarily lead to the conclusion that the performance of the water resource system increases. The power plants' efficiency changes

from -8 to + 5% compared to the control period, depending on the power plant, climate projection and horizon. Reduction in efficiency means that more water is necessary to produce the same hydroelectricity. The climate projections that made the flows increase are those which involve the most marked decrease in efficiency. The water exceedances are then spilled instead of being turbinated. The run-of-river power plants are affected most by the efficiency decreases.

LIMITATIONS AND RECOMMANDATIONS

The methodology followed for the realization of this work is prone to certain limitations if it were to be used in other contexts. In the situation where there could be a persistence of climatic conditions, extreme events or a special importance is granted to the energy demand, other tools or criteria would be recommended, in particular:

- A statistical or dynamic downscaling technique. The delta change method has been adapted for a seasonal study (Diaz-Nieto et Wilby, 2005).
- A hydrological model that is distributed in order to better represent local events.
- Daily time step inflows scenarios and reservoir operating rules to evaluate the impacts of the extreme events.
- Various energy demand scenarios.

In practice, the operating rules are refreshed at the beginning of each year by the addition of the data observed from the previous year. This modeling level will be relevant only when climate projections in a transitory regime are used, and so this process was not fully exploited within the framework of the present work. The study here carries out a comparison between strategies perfectly adapted to stationary hydrological regimes. It would be interesting to supplement this with a similar study with transitory climate projections by using annually-adapted reservoir operating rules. This method would allow the evolution of the performance indicators of a water-resources system to be studied as the climate changes evolve.

Moreover, the decreases in the reliability of the reservoirs leads to the prediction that the spillways do not have the hydraulic capacity to evacuate the increase in flows or that the

level constraints are not suitable. Other studies should be carried out in order to validate if the dimensioning of the current spillways is adequate under different hydrological regimes. Other solutions within the management practice could also allow the level overflow to be minimized. For example, the operating level or the penalties for the violation of constraints could be redefined in the optimization model. This sort of fine-tuning was not carried out in the optimization model within the framework of this study in order to preserve the same conditions, thus allowing the inter-comparison of the results between the future and the control period. Also, since unproductive spills are predicted to increase, it would be interesting to check if the installed capacity of the power plants could be upgraded.

It is also necessary to question the current way that reservoir operating rules are adapted. The reservoir operating rules are adapted each year, optimized based on one additional year of flows; the indicators of climate changes can be lost by the length of this selected records. This subject deserves to be investigated. Possible solution tracks could be the use of a shorter history, where the climate is stationary, or the attribution of more weight to recent inflows.

CONCLUSION

The aim of the work was to evaluate the impacts of and the adaptation to climate changes of the water resource system management of the Peribonka River, a Nordic water resources system exploited for hydropower.

It was shown that the management of the Péribonka river water resources system, adapted to future hydrological regimes, would involve increases in hydropower and in unproductive spills for most projections. However, one of the reservoirs would become more vulnerable and less reliable. These general results were obtained at each horizon, and they are accentuated as the horizon advances. Also, the efficiency of the power plants tends to decrease.

In conclusion, having recourse to several climate projections allows the uncertainty of the potential impacts of climate change to be evaluated. As the climate evolves, the results could

be used as a guide to the managers of the Peribonka river water resource system to establish adapted management guidelines. .

ACKNOWLEDGEMENTS

This paper is part of a larger project funded by the Ouranos Consortium on Regional Climatology and Adaptation to Climate Change (www.ouranos.ca) and the Natural Science and Engineering Research Council of Canada (NSERC). In particular, the authors would like to thank Diane Chaumont of Ouranos for her help in preparing the climate change projections. Also, the authors want to thank Mr. Bruno Larouche from the Rio Tinto Alcan Company for their collaboration in supplying of all the data needed to simulate the water resource system.

REFERENCES

Bisson, J. L. and Roberge, F. (1983). Prévisions des apports naturels: Expérience d'Hydro-Québec. Paper presented at the Workshop on flow predictions, Toronto.

Caron, A. (2005). "Étalonnage et validation d'un générateur de climat dans le contexte des changements climatiques". MS Thesis, École de technologie supérieure, Montréal.

Carpenter, T. M. and Georgakakos, K. P. (2001). Assessement of Folsom lake response to historical and potential future climate scenarios: 1. Forecasting. Journal of hydrology, 249, 148-175.

Christensen, N. S., Wood, A. W., Voisin, N., Lettenmaier, D. P. and Palmer, R. N. (2004). The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado river basin. Climatic change, 62, 337-363.

Diaz-Nieto, J. and Wilby, R. L. (2005). A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: Impacts on low-flows in the river Thames, United Kingdom. Climatic Change, 69, 245-268.

Fortin, V. (2000). Le modèle météo-apport HSAMI: historique, théorie et application. Varennes: Institut de recherche d'Hydro-Québec. 68 p.

Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Arnell, N. W., Döll, P., Kabat, P., Jiménez, B., Miler, K. A., Oki, T., Sen, Z. and Shiklomanov, I. A. (2007). Freshwater resources and their management. In O. F. C. M.L. Parry, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (Ed.), Climate change 2007: Impacts, Adaptation and Vunerability. Contribution of Working Group II to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Changepp. 173-210. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Mareuil, A., Leconte, R., Brissette, F. and Minville, M. (2007). Impacts of climate change on the frequency and severity of floods in the Châteauguay River basin, Canada. Canadian journal of civil engineering, 34, 1048-1060.

Markoff, M. S. and Cullen, A. C. (2008). Impact of climate change on Pacific Northwest hydropower. Climatic Change, 87, 451-469.

Minville, M., Brissette, F. and Leconte, R. (2008). Uncertainty of the Impact of Climate Change on the Hydrology of a Nordic Watershed. Journal of hydrology, Accepted.

Nakicenovic, N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T. Y. Jung, T. Kram, E. L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Raihi, A. Roehrl, H-H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor and Dadi, Z. (2000). IPCC Special Report on Emissions Scenarios. United Kingdom and New York, NY, USA. 599 p.

Payne, J. T., Wood, A. W., Hamlet, A. F., Palmer, R. N. and Lettenmaier, D. P. (2004). Mitigating the effects of climate change on the water resources of the Columbia river basin. Climatic Change, 62, 233-256.

Regonda, S. K., Rajagopalan, B., Clark, M. and Pitlick, J. (2005). Seasonal cycle shifts in hydroclimatology over the western United States. Journal of climate, 18(2), 372-384.

Richardson, C. W. (1981). Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. Water resources research, 17(1), 182-190.

Turgeon, A. (2005). Solving a stochastic reservoir management problem with multilag autocorrelated inflows. Water resources research, 41, W12414.

VanRheenen, N. T., Wood, A. W., Palmer, R. N. and Lettenmaier, D. P. (2004). Potential implications of PCM climate change scenarios for Sacremento-San Joaquin river basin hydrology and water resources. Climatic Change, 62, 257-281.

Whitfield, P. H. and Cannon, A. J. (2000). Recent variation in climate and hydrology in Canada. Canadian water resources journal, 25(1), 19-65.

Yao, H. and Georgakakos, A. P. (2001). Assessement of Folsom lake response to historical and potential future climate scenarios: 2. Reservoir management. Journal of hydrology, 249, 176-196.

ANNEXE VI

Article 6 : Minville *et al.* (2008e)

Cet article a été soumis le 2 juillet 2008 pour publication dans la revue Water Resources Management.

Minville, Marie, Brissette, François, Krau, Stéphane, and Leconte, Robert. (2008e). Adaptation to climate changes in the management of a Nordic water-resources system exploited for hydropower. *Soumis à Water Rersources Management le 2 juillet 2008.*

Adaptation to climate change in the management of a Nordic water-resources system exploited for hydropower

Marie Minville, Eng.

François Brissette, P.Eng., Ph.D.

Stéphane Krau, Ph.D.

Robert Leconte, P.Eng., Ph.D.

Abstract: The management adaptation potential of the Peribonka River water resource system (Quebec, Canada) is investigated in the context of the evolution of climate change. The objective of this study is to evaluate the impacts on hydropower, power plant efficiency, unproductive spills and reservoir reliability due to changes in the hydrological regimes.

The climate change projections used here are from the Canadian regional climate model (CRCM) nested by the Canadian-coupled global climate model (CGCM3) forced with the A2 greenhouse gas emission scenario. The hydrological regimes were simulated with the distributed hydrological model Hydrotel. They were incorporated into a dynamic and stochastic optimization model in order to annually adapt the operating rules of the water resource system, according to the evolution of the climate. The impacts were analyzed over the 1961-2099 period, which was split into four periods for comparison purposes: control period (1961-1990), horizon 2020 (2010-2039), horizon 2050 (2040-2069) and horizon 2080 (2070-2099).

The main results indicate that annual mean hydropower would decrease by 1.8% for the period 2010-2039, and then increase by 9.3% and 18.3% during the periods 2040-2069 and 2070-2099, respectively. The trend to increase is statistically significant starting from 2061 (Mann-Kendall with p=5%). The change in the mean annual production is statistically significant for the 2040-2069 and 2070-2099 periods (t-test with p=5%). Also, the change in

the variance is significant for the periods 2010-2039, 2040-2069 and 2070-2099 (F-test). Annual mean unproductive spills would increase from 1961-2099, but the trend is not statistically significant. However, the changes in the variance of the annual mean spills are significant in the periods 2010-2039, 2040-2069 and 2070-2099. And, the reliability of a reservoir would decrease as the climate changes.

Keywords: Climate change, adaptation, water resource system, hydrology, regional climate model

INTRODUCTION

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007) recognizes that climate change will exacerbate the current stress on water resources. The consequences will include modifications in flow seasonality and hydropower. The changes in temperatures and precipitations will thus have impacts on the runoff, which will increase by 10 to 40% from 2050 in the high latitudes, and decrease by 10 to 30% in the mid-latitudes. The beneficial impacts of the increases in runoff in some regions will be moderated by some negative effects, such as changes in the variability and seasonality.

The managers of water resource systems must develop policies to mitigate the effects of the anticipated climate fluctuations. Trends have been identified in the hydroclimatic variable observations over the last decades in North America. Kalra *et al.* (2007) carried out many statistical tests to detect the trends and the changes in the streamflows and the snow water equivalent in the United States for the period 1951-2002. Their results indicate that there is a gradual trend towards an increase in the flows in the northeast and the eastern United States. Moreover, significant changes in annual and spring mean flows were detected in the Great Lakes area. However, no significant trend or change in the snow water equivalent was observed. Also, Regonda *et al.* (2005) and Whitfield and Canon (2000) analyzed the recent hydrological trends in the United States and Canada, respectively. They concluded that several rivers have presented an early spring flood and higher winter flows.

Consequently, changes in the hydrological regimes will have effects on the storage and management of reservoirs (Christensen *et al.*, 2004). The IPPC (Kundzewicz *et al.*, 2007) supports the view that changes in the hydrological regimes will have both positive and negative impacts. They specify that « *current water management practices are very likely to be inadequate to reduce the negative impacts of climate change on water supply reliability, flood risk, health, energy, and aquatic ecosystems* ». The expected modifications in the climatic variables, such as precipitations and temperatures, will have impacts on the hydrological regimes, which will affect the management of water resource systems. Markoff and Cullen (2008) evaluated the impacts of hydrological regime changes on the hydropower of the installations of Pacific Northwest Power and Conservation Council in the United States. The main result of their study is that hydropower will decrease for the majority of climatic projections. However, they qualify their results as pessimistic, because their reservoir simulation model does not use optimized operating rules under the new hydrological conditions. It was a study with unadapted management to the climate change.

The aim of the work is to evaluate the impacts of and management's adaptation to the projected climate change for a Nordic water resource system, here the Peribonka River (Quebec, Canada), a system exploited for hydropower. The study was carried out with annual adaptations to the reservoir management. A dynamic and stochastic optimization model (Turgeon, 2005) was used. This model pre-calculates the weekly operating rules according to the flows given by a hydrological model and the levels of the reservoirs which compose the water resource system. These operating rules are then used with a reservoir simulation model which simulates the operations. The adaptation of the water resource system management is analyzed according to the trajectories of the reservoirs' levels, hydropower, power plant efficiency and unproductive spills. The evolution of these variables over the period is analyzed in order to detect statistically significant trends. Also, the means and variances of the indicators at the future periods 2010-2039, 2040-2069, and 2070-2099 are compared with the indicators at the control period 1961-1990 in order to detect the statistically significant changes.

The article first describes the studied area. Then, the data used and the methodology followed are presented. In the third section, the results obtained for the climatic data, hydrological regimes and indicators of water resource management are described and discussed, followed by the main conclusions and recommendations.

STUDIED AREA

The Peribonka River watershed (figure 1) is located in the southern center of the province of Quebec, Canada. The water is exploited exclusively for hydropower by Rio Tinto Alcan, with an installed capacity of 1165 MW. Power plants feed energy into the company's various Aluminium smelting facilities. Two large reservoirs store water (Lake-Manouane - 2700 hm^3 and Passes-Dangereuses - 5200 hm^3) and they feed three power plants, laid out in series on the Peribonka River (Chute-des-Passes, Chute-du-Diable and Chute-a-la-Savane). The Chute-des-Passes power plant is adjacent to the Passes-Dangereuses reservoir. The Chute-du-Diable and Chute-a-la-Savane power plants are classified as run-of-river, even though they have small reservoirs.

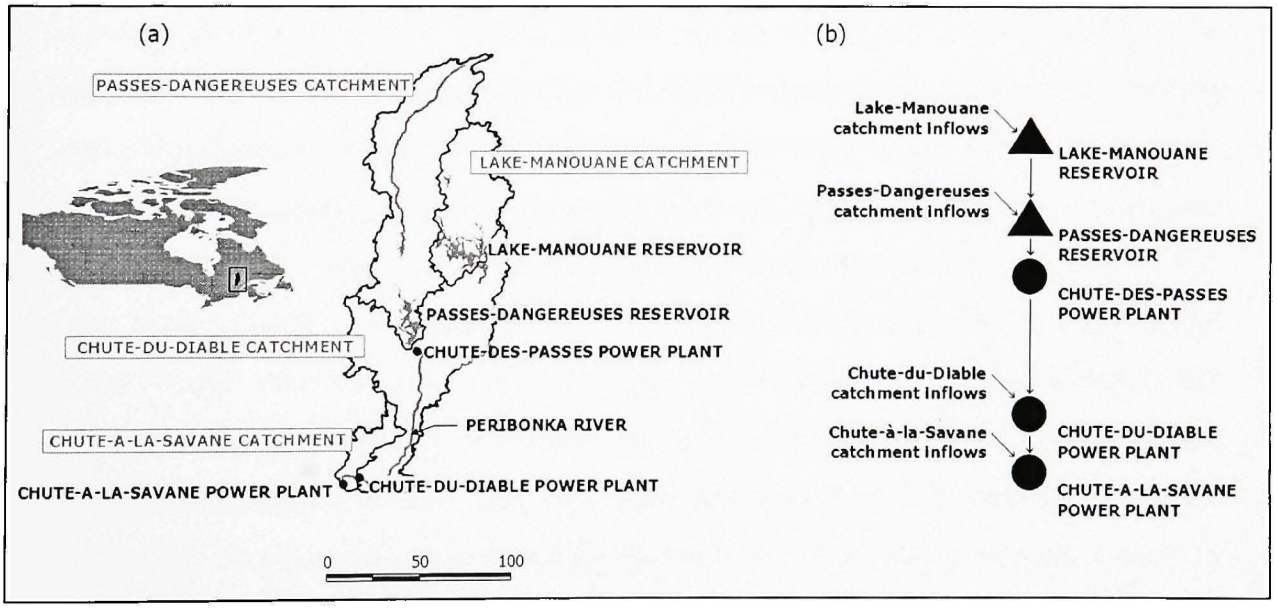


Figure 1(a) Peribonka River watershed and its components (b) Water resource system scheme

The Peribonka River watershed (27000 km^2) is subdivided into four principal subbasins, from upstream towards downstream: Lake-Manouane (5000 km^2), Passes-Dangereuses (11000 km^2), Chute-du-Diable (9700 km2) and Chute-a-la-Savane (1300 km^2). The watershed is mainly comprised of uninhabited boreal forest.

This regions' climate is moderate, with an annual mean temperature of -0.5°C and annual mean precipitations of 1010 mm, with 40% falling as snow (according to the records for 1953-2003). The freezing period, when the mean daily temperatures are lower than 0°C, spreads over six months between November and April.

The annual mean flow of the Peribonka river is 635 m^3/s. Spring mean flows (AMJ – April, May and June) account for 43% of the annual mean flow, whereas the winter inflows (DJFM – December, January, February, March) account for 10% and those of summer-autumn (JASON – July, August, September, October and November) for 47%.

The watershed is located in the mid-latitudes and its hydrological regime is dominated by snow accumulation and snow melt. The management of the water resource system is related to the hydrological context at three distinct periods: winter, spring and summer-autumn. The hydrological year begins with the winter, when the mean temperatures are below the freezing point. Snow accumulates on the ground and does not contribute to the runoff. Some rainy events and raised-temperature episodes can occur, however, and contribute to increasing the base flow. Nevertheless, inflows to the reservoirs remain weak in general for this period. The level of the Passes-Dangereuses reservoir is held very close to its exploitation level so that the adjacent power plant benefits from a bigger water head. The Passes-Dangereuses reservoir level must be sufficiently lowered at the end of winter in order to store the spring flood and thus minimize spills. In spring, the temperatures rise above the freezing point and there is snowmelt. The fluctuations of flows during the summer-autumn season are caused by rainy events. The Passes-Dangereuses reservoir is managed to prevent flooding while maximizing the water head of the adjacent power plant. Since there is no power plant at

Lake-Manouane, this reservoir is only used as a water reserve to fill the Passes-Dangereuses reservoir.

DATA AND METHODS

The methodology followed to perform this work can be summarized in four parts:

i. Climate change projection preparation and bias-correction

ii. Simulation of the hydrological regimes

iii. Generation of the operating rules of the water resource system

iv. Simulation of the water resource system operations

The trends in the hydroclimatic variables and in the management indicators are analyzed using the Mann-Kendall test. The statistically significant changes in means and variances between the future periods 2010-2039, 2040-2069 and 2070-2099, and the control period 1961-1990, are identified with the t-test and the F-test respectively. The normality of all indicators was verified before application of the statistical tests.

CLIMATE CHANGE PROJECTION AND BIAS-CORRECTION

Downscaling

The impact studies generally used statistical downscaling or the simpler bias-correction method for the climatic variables of general circulation models (GCMs). CGMs are simulators of the climatic system which solve the equations of physics and thermodynamics on a grid with a resolution of approximately 350 km. These large-scale climatic data are widely diffused for many CGMs and greenhouse gas emission scenarios (GHGES). The downscaled variables, such as temperatures and precipitations, are used as inputs for impact studies on the water resources (Diaz-Nieto et Wilby, 2005; Prudhomme *et al.*, 2003).

Markoff and Cullen (2008) and Minville *et al.* (2008) used the delta change approach to carry out impact studies with about thirty climatic projections. Studies that use many projections can investigate a broad range of potential impacts. Multi-scenario impact studies are more common with these approaches, because they have the advantage, compared to dynamic downscaling, of requiring less computer resources and they produce a broader range of climatic scenarios (Salathé *et al.*, 2007). The delta change approach assumes that climate is stationary over a certain period (usually 30 years), and does not allow the evolution of hydrological and management impacts to be evaluated.

Regional climate models (RCMs) are applications of dynamic downscaling. An interesting aspect of this method is that it simulates the climatic system at a finer resolution than CGMs -- up to 50 times higher. The high resolution of the RCM allows the regional climatic variables to be represented in much more detail. Moreover, the data are in a transitory regime, and thus the evolution of the impacts on water resources can be evaluated. However, one disadvantage is that RCMs are nested into GCMs that specify lateral and lower boundary conditions. Also, the projections of RCMs are not widely diffused, which limits their application in multi-scenario impact studies.

Climate data grids

The climatic projection used within the framework of this study comes from the Canadian regional climate model (CRCM) (Caya et Laprise, 1999; Plummer *et al.*, 2006). The boundary conditions are prescribed by the Canadian general circulation model (CGCM3) (McFarlane *et al.*, 1992) with the A2 greenhouse gas emission scenario (GHGES) (Nakicenovic *et al.*, 2000). The climatic data were available at the daily time step over the period 1961 to 2099, on a grid of approximately 50 kilometers of resolution. A total of 30 grid points on and near the Peribonka River watershed were used.

The CRCM climate data for the control period were compared with the climate observed for the same period. A 10-km resolution observation grid was used, interpolated by kriging. The

interpolations were carried out with data from the weather stations located on and close to the watershed.

Climate variables bias

An analysis of the monthly precipitations and temperature means of the control period 1961-1990 of the CRCM showed that they presented a bias compared to the observations.

The monthly minimum temperatures of the CRCM, compared to the observations, are underestimated every month, up to a maximum of 6°C in April. The maximum temperatures are underestimated in the summer-autumn, by up to 4°C in August. Also, precipitations are over-estimated in spring and in summer-autumn, by up to 25% in June. In winter, the precipitations are underestimated by up to 18% in December.

A bias-correction of temperatures and precipitations, as well as of frequencies of precipitations, was performed to adjust the simulated data with the observations at the control period, using the assumption that the monthly bias of the CRCM at the control period will be the same in the future.

Bias correction of temperatures

A bias-correction of the monthly means was carried out for the temperatures of the CRCM. Each grid point of the CRCM was compared with the observations. The monthly mean temperatures of the CRCM and the observations for the control period were calculated. The difference between the monthly mean of the observed temperatures and the monthly mean of the simulated temperatures for the control period 1961-1990 was applied to the daily data of the CRCM 1961-2099. This technique ensures that the temperatures of the CRCM over the period 1961-1990, bias corrected at each grid point, have the same monthly means as the observed temperatures. The bias correction was performed for minimal and maximal temperatures.

Bias correction of precipitations

The precipitations data were corrected for the monthly mean frequencies and the monthly mean intensities with the LOCI method, adapted from Schmidli (2006). With this approach, the adjusted monthly precipitations of the CRCM have the same frequencies and the same monthly mean intensity as the observed precipitation for the control period 1961-1990.

The monthly frequency is the ratio of the number of rainy days exceeding a threshold during one month to the number of days in the month. The monthly intensity is the daily mean precipitation for one month. The adjustment was carried out initially by comparing each grid point of the CRCM with the observations. This method then requires a monthly threshold to be calculated, which allows the monthly frequencies of rainy days of the CRCM for the control period 1961-1990 to be adjusted at the same frequency as the observations. Next, a monthly factor is calculated to equalize the means of the CRCM's monthly precipitations for the control period 1961-1990 with the mean of the monthly precipitations of the observations. Lastly, the monthly thresholds and factors, which allow adjustment of the precipitations for the control period, are used to adjust precipitations in the 1990-2099 period.

HYDROLOGICAL SIMULATIONS

Hydrological simulations were carried out with the physically based distributed model Hydrotel (Fortin *et al.*, 2001a). It is used operationally by the Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) for forecasting the flows of hydraulic works managed by the government of the province of Quebec, Canada.

Hydrotel is a distributed model which integrates five sub-models: accumulation and melt of snowpack, potential evapotranspiration, vertical water budget, flow on the sub-watershed, and channel flow. Various options are offered to the user for the simulation of each of these hydrological processes. The hydrological processes were simulated with the options compiled in Table 1.

Table 1 Models used for the simulation of the hydrological processes in Hydrotel

Sub-model	Options
Accumulation and melt of snowpack	Mixed approach: degree days and energy budget (Turcotte *et al.*, 2007)
Potential evapotranspiration	Hydro-Québec (Fortin *et al.*, 2001a)
Vertical water budget	BV3C (Fortin *et al.*, 2001a)
Flow on subwatershed	Kinematic wave equation
Channel flow	Kinematic wave equation

The calibration and validation results of the Hydrotel hydrological model for the four subbasins are synthesized in Table 2. The differences in flows and peak dates, as well as annual volume, are presented distinctly for the calibration and validation periods. A negative value must be interpreted as an undervaluation of the model compared to the observations.

The flows were simulated with the grid of climatic variables of the bias-corrected CRCM climate projection over the period 1961-2099.

Table 2 Calibration and validation results of the hydrological model Hydrotel

Sous-bassins	Nash-Sutcliffe		Peak flow (%)	Time of peak flow (jour)	Annual volume (%)
	Calibration (1980-1985)	Validation (1986-2003)			
Chute-a-la-Savane	0,70	0,66	- 11	0	- 2
Chute-du-Diable	0,85	0,78	- 18	+ 5	0
Lac-Manouane	0,54	0,47	- 10	+ 2	- 14
Passes-Dangereuses	0,76	0,69	- 8	0	- 5

OPTIMIZATION OF THE OPERATING RULES

There are several ways of calculating the operating rules of a water resource system. Labadie (2004) draws up the state of the art of the methods. The stochastic and dynamic programming

approach (Turgeon, 2005) allows the calculation of operating rules that maximize the hope for future profits. In the case of a water resource system, the profit function is the production minus the costs of the violations of constraints. This approach is used when a water resource system requires the introduction of a restricted number of state variables, which is the case for the Peribonka River system. Two state variables describe the two reservoirs (Lake-Manouane and Passes-Dangereuses). The other reservoirs are not modelled, given their small storage capacities. The flow times between the two reservoirs and between Passes-Dangereuses and Chute-a-la-Savane are less than one week, so the problem of management is decomposable in a succession of one-week duration management problems. The operating rules are the weekly outflows to carry out for the two reservoirs, according to the week of the year, the initial levels of these two reservoirs at the beginning of the week and the flows during the week. The reservoirs' inflows are assumed to be perfectly correlated during the same week.

Weekly operating rules of the two reservoirs are generated for each year of the period 1990-2099, for a total of 110 weekly operating rules. During this period, the annual mean flows of 1990-2099 present an upward trend but respect the assumption of stationarity on 35-year mobile periods (Mann-Kendall test). For each year, the weekly operating rules were produced while using only the flows of the 35 previous years in the history of the flows.

SIMULATIONS OF THE WATER-RESOURCES SYSTEM

The reservoirs' operations were simulated for a weekly time step with a model specifically programmed for the needs of the study. The characteristics of the spillways and power plants are introduced. The model calls the operating rules generated by the optimization model to simulate the operations of the water resource system, subjected to series of weekly hydrological flows. The operations' simulation model retains the levels of the reservoirs, the hydropower and the unproductive spills for each time step.

The simulations of the operations with the climate change projection were not compared with the observed operations, but instead, compared with the operations simulated at the control period. This strategy allows any bias from the hydrological model to the inflows to be eliminated. However, it should be mentioned, as an indication, that the simulation model reproduced the observed annual average production with an over-estimate of 1.5%. The operation records used for this comparison comprised 15 years of available data.

For the simulations of the water resources system operations, no energy demand was specified, either at the control period or for future simulations. Energy is fed to the smelting facilities of Rio Tinto Alcan. There is no peak in demand as in the case of a water resource system exploited for residential or standard commercial use.

RESULTS AND DISCUSSION

The trends in the climate projection variables and the hydrological and management indicators were analyzed. The Mann-Kendall statistical test was performed to detect the year of a regime change.

The changes in means and variances were also analyzed with the statistical t-test and F-test, respectively, after checking for the assumption of normality. The t-test was carried out by fixing the probability at 5%, so that the null assumption (the means do not differ) is rejected where this is true. The changes are studied for the future periods 2010-2039, 2040-2069 and 2070-2099, compared to the control period of 1961-1990.

CLIMATE CHANGE PROJECTIONS

Figure 2 shows the annual and seasonal evolution of minimal (lower line) and maximal (higher line) temperatures in the watershed. The bold black lines represent the mean minimal and maximal temperatures over the basin. The envelope marks the spread of the temperatures at each point of the CRCM: the higher temperatures are representative of the area in the south of the basin and the lower temperatures of the northern area.

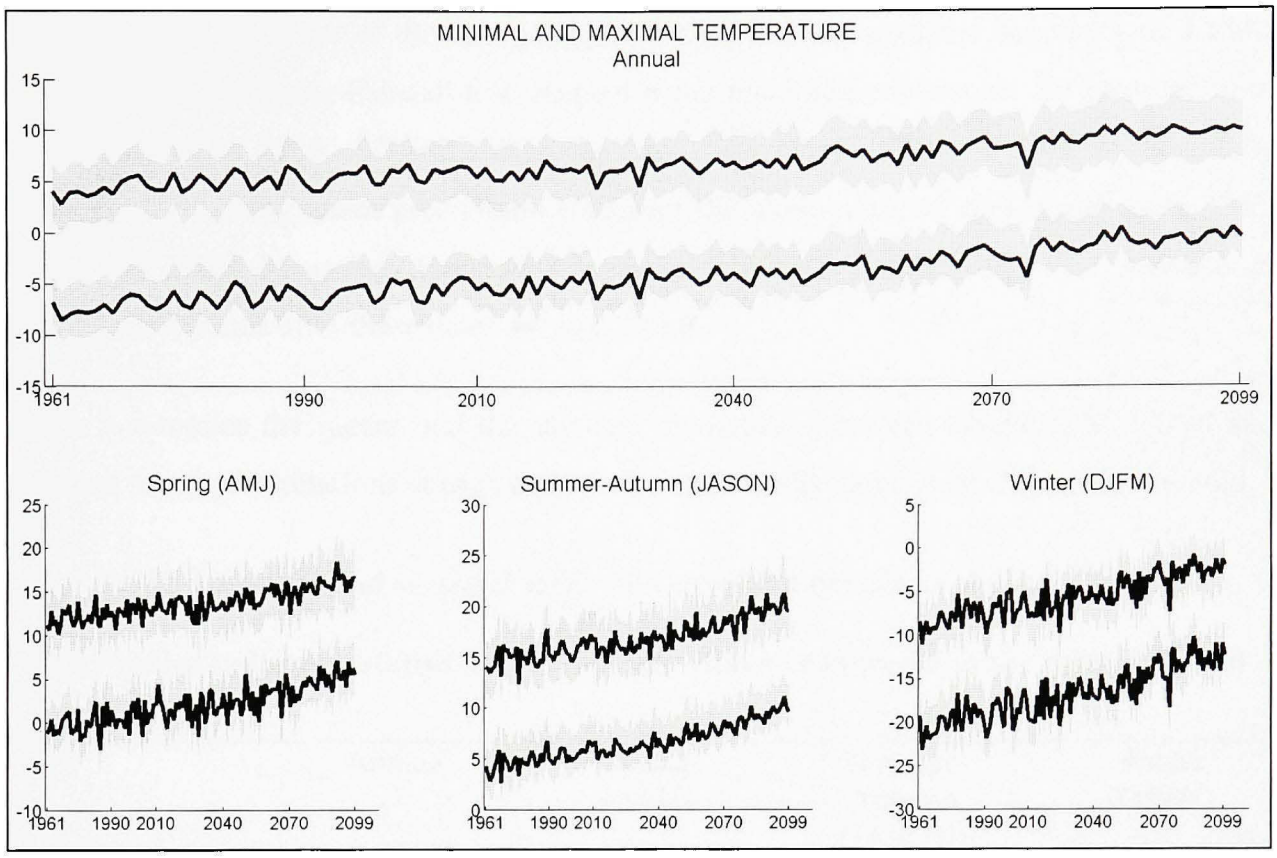


Figure 2 Annual and seasonal temperature (minimal and maximal) over the 1961-2099 period

The minimum and maximum temperatures on annual and seasonal scales are not stationary over the period 1961-2099. The temperatures increase gradually over this period. On an annual and seasonal scale, the changes of means and variances of the minimum and maximum temperatures are statistically significant at the periods 2010-2039, 2040-2069 and 2070-2099, compared to 1961-1990.

Figure 3 illustrates the annual and seasonal evolution of mean precipitations for the period 1961-2099. The general trend is an increase in annual and seasonal mean precipitations. However, the rate of increase in winter precipitations is greater than for spring and summer-autumn.

The change in the color of the line on figure 3 shows the year of the beginning of a trend detected with the Mann-Kendall test. Annual mean precipitations respect the assumption of stationarity up to 2045. After this date, the annual mean precipitations trend is statistically significant. Seasonal mean precipitations respect the assumption of stationarity until 2043, 2094, and 2037 in spring, summer-autumn, and winter, respectively. The increase in precipitation trends after these dates are significant.

Table 3 compiles the means and the standard deviations (between brackets) of annual and seasonal mean precipitations at each period. The statistically significant changes are in bold.

Table 3 Annual and seasonal mean and standard deviation of precipitations

Bold values indicate a statistically significant change compared to the control period

	Annual	Spring (AMJ)	Summer-Autumn (JASON)	Winter (DJFM)
	Mean (standard deviation) in millimeters			
1961-1990	892 (103)	221 (45)	405 (57)	264 (49)
2010-2039	917 (109)	**235 (45)**	**391** (62)	**289 (63)**
2040-2069	**1015** (102)	**256 (52)**	414 **(72)**	**344 (65)**
2070-2099	**1107** (112)	**273 (65)**	**436 (74)**	**396 (67)**

Changes in annual mean precipitations are statistically significant at the 2040-2069 and 2070-2099 periods, compared to 1961-1990. The tests show also a change in variance at the 2010-2039, 2040-2069 and 2070-2099 periods.

HYDROLOGICAL IMPACTS

Figure 4 shows the mean annual hydrograph of the control period 1961-1990, compared to the future periods 2010-2039, 2040-2069 and 2070-2099, for each subbasin.

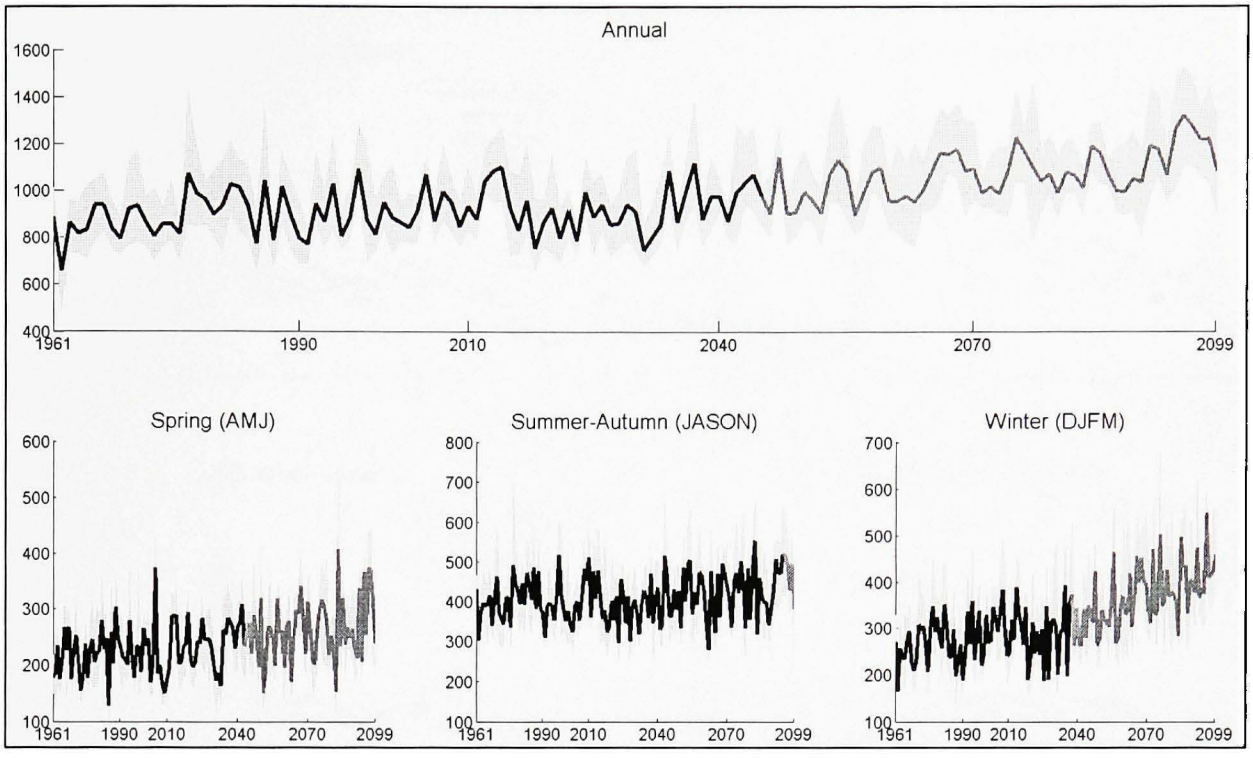


Figure 3 Annual and seasonal precipitations over the 1961-2099 period. The black line indicates a stationary regime, the light gray line a downward and the dark gray line an upward trend

The same general trends are observed at all subbasins: early spring floods, flows decrease in summer-autumn and increase in winter. The spring flood is earlier by a mean of 10 days in the period 2010-2039, 20 days in 2040-2069 and 30 days in 2070-2099. Moreover, the mean spring flood peaks for the 2010-2039 and 2040-2069 periods at each subbasin are lower compared to the control period 1961-1990. It is higher in 2070-2099 at all but the Chute-du-Diable subbasin. Differences in the trends are also noticed between the basins in the north (Passes-Dangereuses and Lake-Manouane) and the basins more to the south (Chute-du-Diable and Chute-a-la-Savane), where the spring flood is generally earlier and of less amplitude. Moreover, the winter flows increase more for the southern basins than for the northern basins.

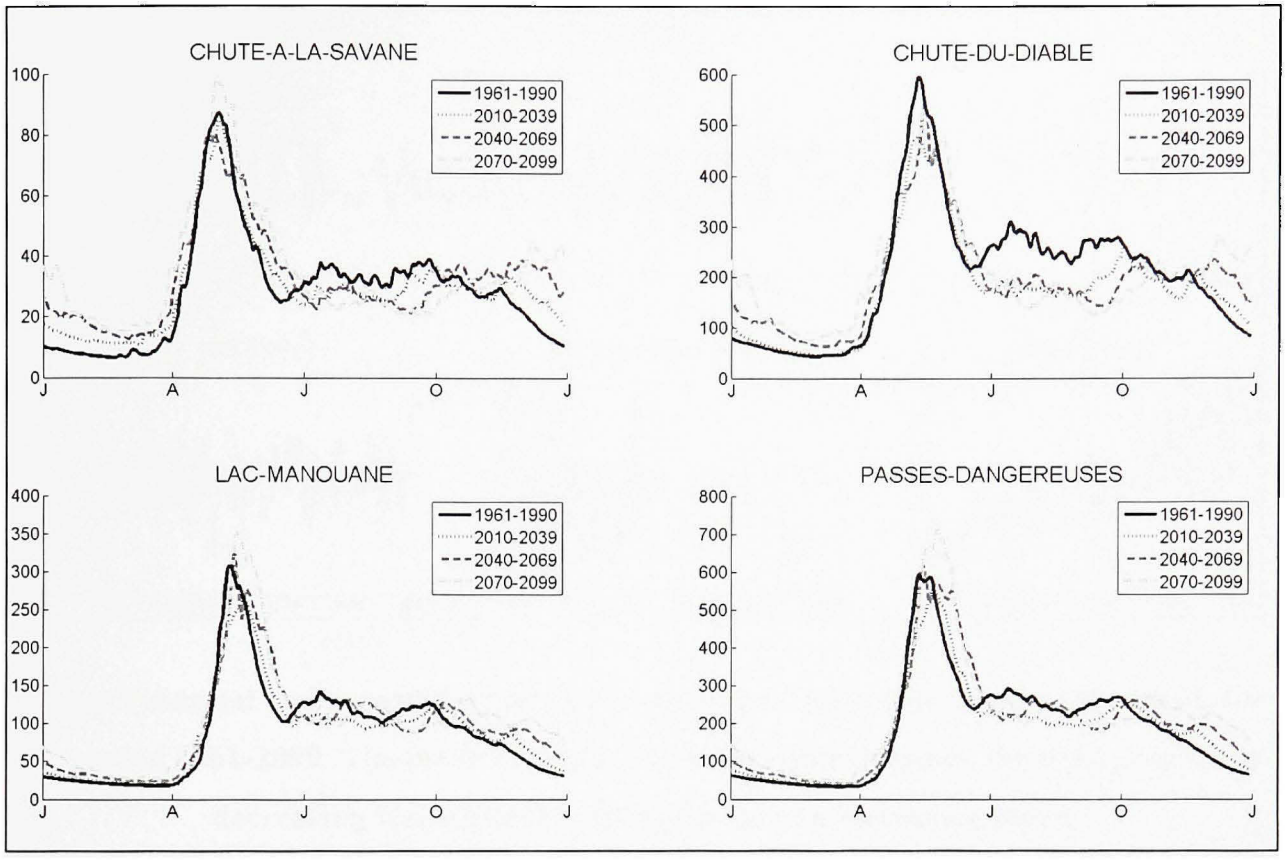


Figure 4 Mean annual hydrographs for future periods 2010-2039, 2040-2069 and 2070-2099, compared with the control period 1961-1990 in bold black line, for the four sub-basins

Figures 5 and 6 illustrate the evolution of the annual mean flows of two principal subbasins of the Peribonka River watershed between 1961 and 2099: Chute-a-la-Savane (located in the south) and Passes-Dangereuses (located in the north). These subbasins are selected in order to highlight the north-south cleavage in the hydrological impacts of climate change. The line changes colors where a trend is detected (Mann-Kendall test) in the hydrological regimes: black is for stationary, statistically significant trends are in gray (an increasing trend in light gray and a decreasing trend in dark gray).

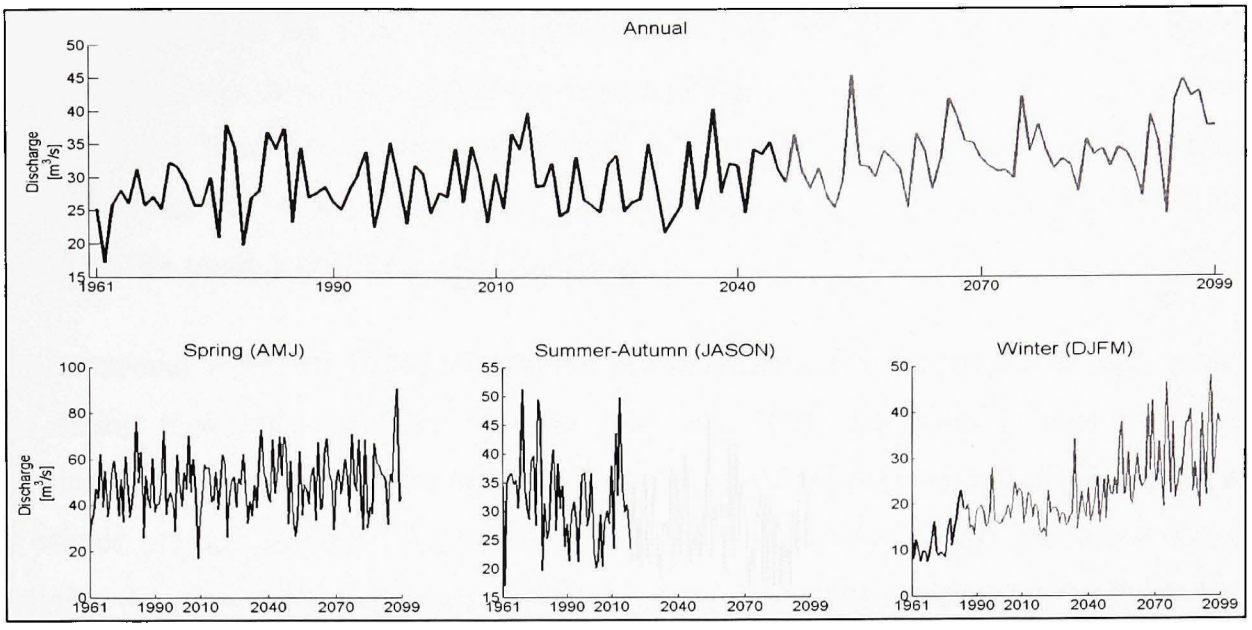


Figure 5 Annual and seasonal mean discharge at the Chute-a-la-Savane watershed, for the period 1961-2099. The black line indicates a stationary regime, the light gray line a decreasing trend and the dark gray line an increasing trend

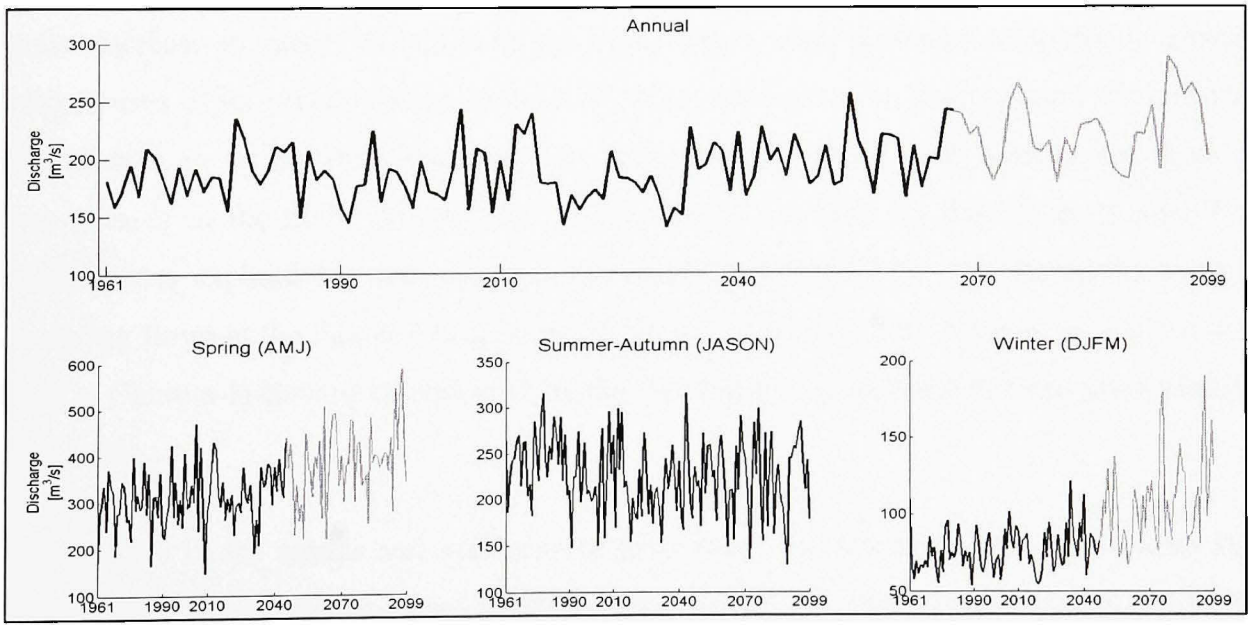


Figure 6 Annual and seasonal mean discharge at the Passes-Dangereuses watershed, for the period 1961-2099. The black line indicates a stationary regime, the light gray line a decreasing trend and the dark gray line an increasing trend

The comparison of the annual mean flows of the two subbasins makes it clear that the southern region is influenced earlier by climate change. The upward trend is significant in 2047 with the Chute-a-la-Savane subbasin and in 2067 with Passes-Dangereuses. The annual mean flow for the Passes-Dangereuses watershed also has a decreasing trend until 2030, however, this trend is not statistically significant.

On a seasonal scale, the Chute-a-la-Savane subbasin presents different trends each season: the spring flows are stationary between 1961 and 2099, the flows in summer-autumn decrease with a significant trend from 2019, and the flows' increase is statistically significant in winter, starting in 1984. For the Passes-Dangereuses subbasin, only the winter season presents the same trend as Chute-a-la-Savane, with significant increases in the flows from 2047. The spring flows increase and the trend is significant as of 2045. For summer-autumn, the trend is a decrease, but it is not statistically significant.

The differences in the regimes of the two subbasins occur for various reasons. Initially, the warmer temperatures in the south, combined with the increase in precipitations, make for an earlier increase in runoff in winter at the Chute-a-la-Savane subbasin compared to Passes-Dangereuses. Rain precipitations (instead of snow) are thus more frequent and the episodes of increases in temperature contribute to increasing the flows. The smaller increases in temperatures in the north do not create conditions favourable for the winter runoff. This situation also explains the differences in the regimes' spring flows. The increasing trend in the spring flows at the Passes-Dangereuses subbasin compared to the absence of a significant trend at Chute-a-la-Savane is explained by the fact that in winter, there is more snow pack on the ground.

The changes in the means and variances of the annual and seasonal mean flows were also investigated. They are presented in Tables 4 and 5. The bold values indicate that the differences are statistically significant compared to the control period.

Table 4 Annual and seasonal mean and standard deviation of flows for the Chute-a-la-Savane subbasin. Bold values indicate a statistically significant change compared to the control period

	Annual	Spring (AMJ)	Summer-Autumn (JASON)	Winter (DJFM)
	Mean (standard deviation) in m^3/s			
1961-1990	28 (4.9)	46 (12)	34 (7.7)	13 (4.4)
2010-2039	30 **(4.7)**	48 **(10)**	**29 (7.9)**	19 **(4.0)**
2040-2069	**32 (4.4)**	49 **(13)**	**29 (7.9)**	**25 (6.5)**
2070-2099	**34 (4.8)**	52 **(13)**	**26 (7.8)**	**31 (8.2)**

Table 5 Annual and seasonal mean and standard deviation of flows for the Passes-Dangereuses subbasin. Bold values indicate a statistically significant change compared to the control period

	Annual	Spring (AMJ)	Summer-Autumn (JASON)	Winter (DJFM)
	Mean (standard deviation) in m^3/s			
1961-1990	186 (20)	291 (61)	246 (33)	73 (13)
2010-2039	183 **(26)**	315 **(56)**	**215 (37)**	**78 (16)**
2040-2069	**204 (24)**	**364 (76)**	**224 (40)**	**92 (19)**
2070-2099	**221 (30)**	**400 (76)**	**220 (46)**	**114 (31)**

The changes of the annual mean flows at Chute-a-la-Savane and Passes-Dangereuses are statistically significant in the periods 2040-2069 and 2070-2099, compared to 1961-1990. The changes of variance are significant for each of the periods of the subbasins. On a seasonal scale, the changes of mean are not statistically significant in all the future periods at the Chute-a-la-Savane subbasin and in 2010-2039 at Passes-Dangereuses. For summer-autumn, the changes are also not significant. During winter, the changes of means are not significant for the Passes-Dangereuses subbasin in 2010-2039. However, the changes in variances are statistically significant on a seasonal scale for the two subbasins in all the future periods.

The differences in the hydrological regime changes within the Peribonka watershed show the importance of the link between the change in precipitations and temperatures. An increase in temperatures in winter, over a certain threshold, can strongly influence snow hydrology. In summer, the hydrological impact of the increase in precipitations can be cancelled by an increase in temperatures, because of the consequent increases in evaporation and evapotranspiration.

IMPACTS AND ADAPTATION OF THE WATER RESOURCE SYSTEM

Reservoir operating rules

The change in the operating rules is initially analyzed for the weekly mean levels at the periods 2010-2039, 2040-2069 and 2070-2099, compared to 1961-1990. Figure 7 shows the mean levels of the Lake-Manouane and Passes-Dangereuses reservoirs at these periods. Two modifications arise in the management of the reservoirs: the shift in the timing of the low spring levels and the change in the mean levels at each season. These changes are accentuated the further the period is away from the control period 1961-1990.

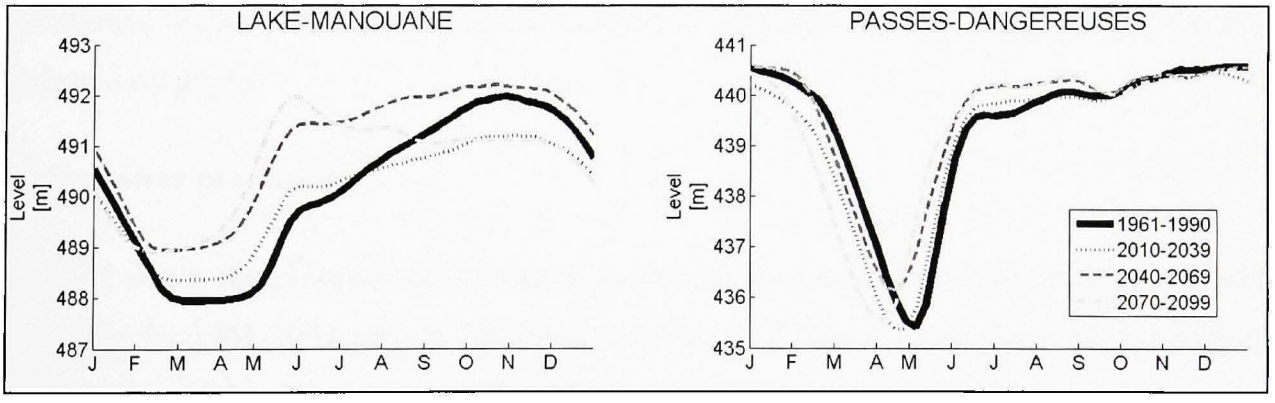


Figure 7 Reservoirs' mean levels in periods 2010-2039, 2040-2069, and 2070-2099, compared to reservoir levels at the control period 1961-1990

For Lake-Manouane at all the future periods, the levels are higher in spring. This increase is a direct consequence of the increase in the flows at this season. The levels in summer increase

between July and November in 2040-2069 and 2070-2099. In 2070-2099, the reservoir levels decrease from June to November. These weak increases or decreases of the level in summer-autumn are the consequences of the decrease of the mean flows at this season. During winter, the reservoirs' levels are lower at the 2040-2069 and 2070-2099 periods than at the control period 1961-1990 because of the runoff increase at this season. The levels are maintained lower in order to avoid the violations of constraints that could result from exceeding the maximum level of exploitation.

The Passes-Dangereuses reservoir has the same trends as Lake-Manouane, except that the shift of the period of lowering in spring is more obvious. As a consequence of the shift in the beginning of the spring flood by 10, 20 and 30 days over the period 2010-2039, 2040-2069 and 2070-2099, respectively, the levels of the reservoirs are also shifted approximately for the same durations at each period. The operating rules in spring thus take into account the change in seasonal variation of the flows in the reservoirs. In summer-autumn, the levels are maintained higher because of the decrease of flows into the reservoirs. The flows being less significant at this season, the levels are maintained higher in order to maximize the water head at the power plant with the reservoir directly downstream. In winter, the levels are maintained higher in the future periods, in order to maximize the water head during the low hydraulicity period.

Hydropower production

Figure 8 shows the evolution of the annual mean hydropower, both overall and at each power plant, for the 1961-2099 period. The y-axis values are hidden to preserve the confidentiality of the owner of the water resource system.

The trend shows a reduction in the annual mean production for the run-of-river power plants (Chute-du-Diable and Chute-a-la-Savane) before 2030. For the power plant with a reservoir (Chute-des-Passes), the trend is an increase. This trend is statistically significant in 2054.

The reduction in the hydropower for the run-of-river power plants before 2030 is attributable to the decreasing flows in the Chute-du-Diable and Chute-a-la-Savane subbasins in summer-autumn, during the strong hydraulicity period. The increase in the production for the power plant with a reservoir, supplied by the Passes-Dangereuses and Lake-Manouane subbasins' inflows, is attributable to the absence of a significant trend of a flow decrease in summer-autumn, and the increase at the other seasons.

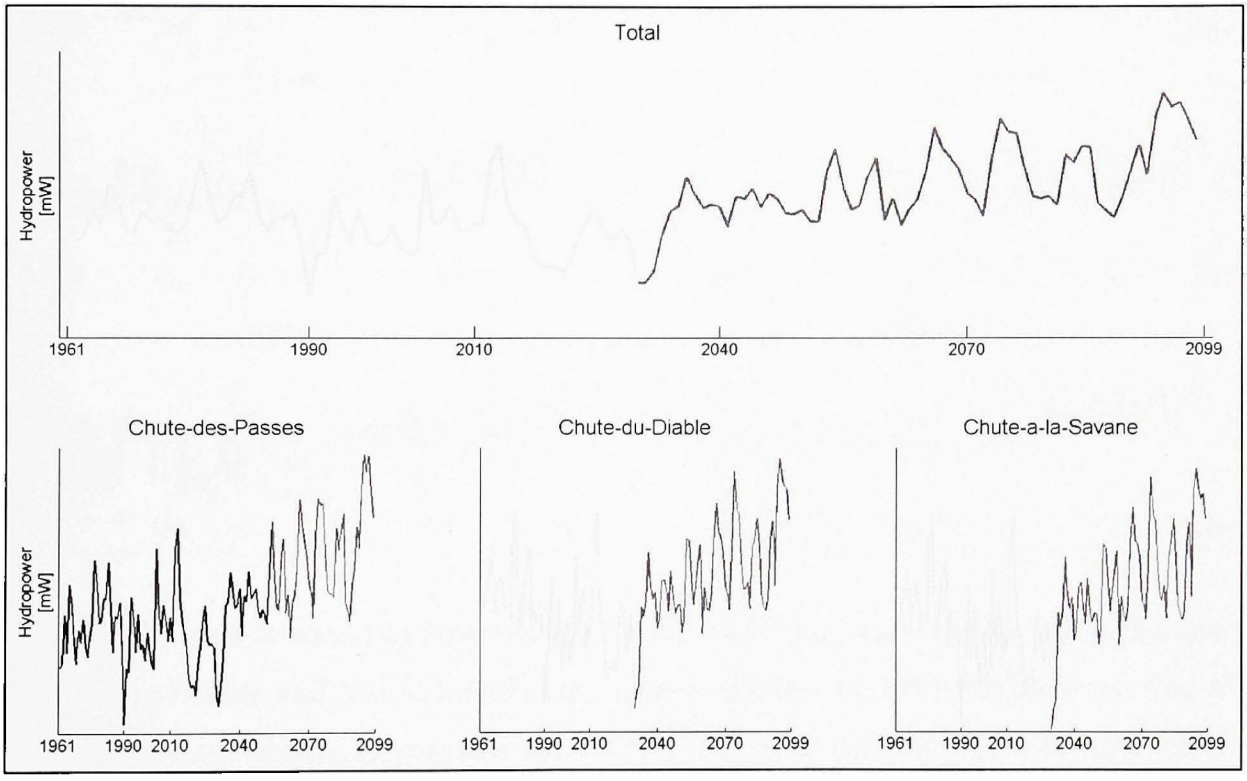


Figure 8 Mean annual hydropower, for the entire system (Total) and at each power plant (Chute-des-Passes, Chute-du-Diable and Chute-à-la-Savane), for the 1961-2099 period. (The y-axis values are hidden to preserve the confidentiality of the water resource system owner.). The black line indicates a stationary regime, the light gray line a decreasing trend and the dark gray line an increasing trend

Figure 9 shows the seasonal hydropower for the power plant with a reservoir (Chute-des-Passes) and for the run-of-river power plants (Chute-du-Diable and Chute-a-la-Savane). The production at the run-of-river power plants has been summed, because the trends are similar

given their geographical proximity. The y-axis values are hidden to preserve the confidentiality of the owner of the water resources system.

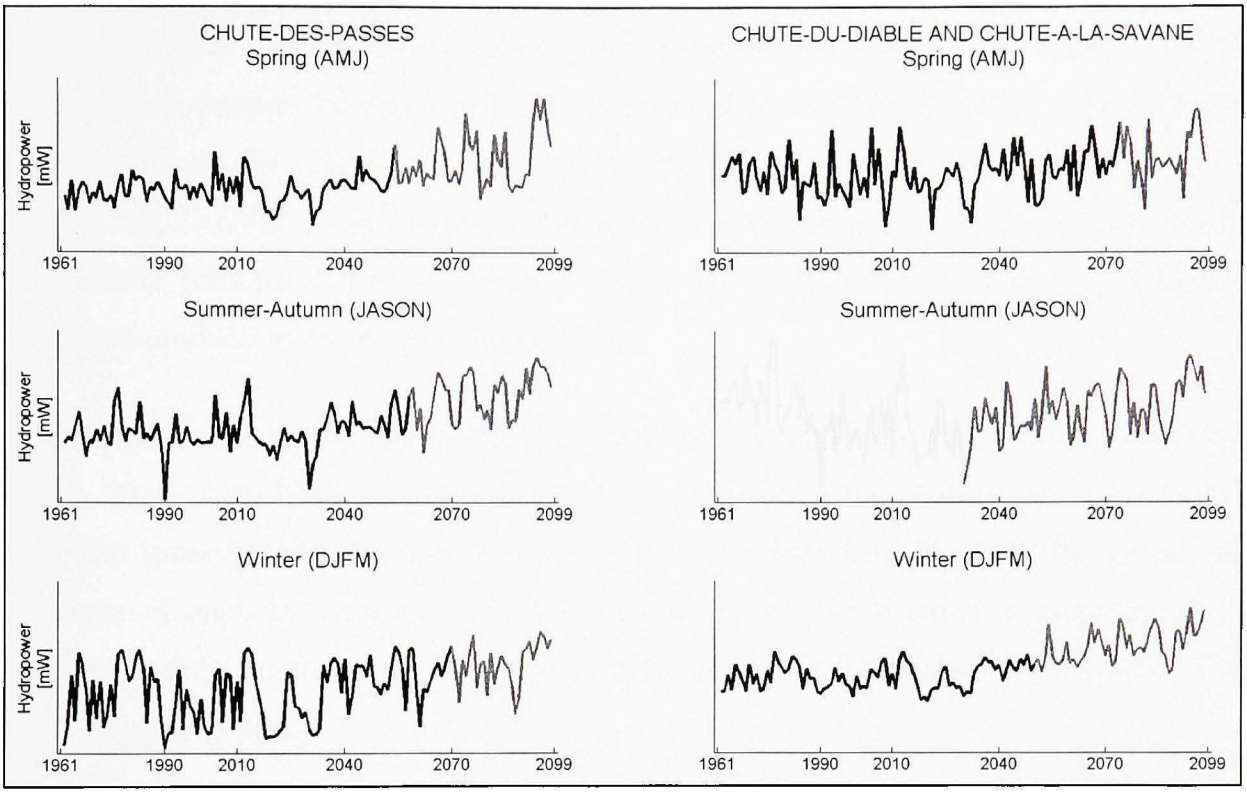


Figure 9 Mean seasonal hydropower, for the Chute-des-Passes power plant and the Chute-du-Diable and Chute-à-la-Savane (summed), for the 1961-2099 period. The y-axis values are hidden to preserve the confidentiality of the water resource system's owner. The black line indicates a stationary regime, the light gray line a decreasing trend and the dark gray line an increasing trend

The trend in the seasonal hydropower shows an increase each season for the Chute-des-Passes power plant. The increases in production are significant for this reservoir in spring, summer-autumn and winter, from 2054, 2058 and 2070 respectively. For the Chute-du-Diable and Chute-a-la-Savane power plants, the increases are significant at the same seasons, but from 2074, 2030 and 2050, respectively. However, a decreasing trend is predicted until 2030 for each season. This trend is significant in summer-autumn.

These results are in conformity with the trends of the seasonal mean flows. Indeed, figure 6 shows that the flows at the Passes-Dangereuses subbasin, representative of the northern portion of the watershed, did not present any decrease in the seasonal flows. The watersheds in the north feed the Chute-des-Passes power plant with a reservoir, which explains the increase in production for the annual and seasonal scales. On the other hand, figure 5 shows that the flows at the Chute-a-la-Savane subbasin, representative of the south of the basin, dropped significantly in the summer-autumn, a period of strong hydraulicity. The subbasins in the south feed the run-of-river power plants, and so this drop in flows explains their significant production decreases at this season.

The changes in the means and in the variance of the annual mean production for the future periods 2010-2039, 2040-2069 and 2070-2099, compared to the control period 1961-1990, were also investigated. The results are presented in Tables 6 to 9, where the statistically significant changes are emphasized in bold. The values are expressed as a percentage of the production of the control period, in order to preserve the confidentiality of the owner of the water resource system.

Table 6 Mean and standard deviation of total hydropower, both on an annual and seasonal basis. Bold values indicate a statistically significant change, compared to the control period

	Annual	Spring (AMJ)	Summer-Autumn (JASON)	Winter (DJFM)
	Mean (standard deviation) in % of the 1961-1990 period			
2010-2039	98.2 (**127.4**)	98.4 (**147.0**)	99.3 (**106.1**)	97.0 (**101.6**)
2040-2069	**109.3** (**100.3**)	115.2 (**147.9**)	109.9 (**103.3**)	**104.9** (**67.1**)
2070-2099	**118.3** (**145.6**)	**128.8** (**280.8**)	**120.6** (**121.3**)	**109.3** (**71.4**)

Table 7 Mean and standard deviation of hydropower at the Chute-des-Passes power plant, on an annual and seasonal basis. Bold values indicate a statistically significant change compared to the control period

	Annual	Spring (AMJ)	Summer-Autumn (JASON)	Winter (DJFM)
	Mean (standard deviation) in % of the 1961-1990 period			
2010-2039	94.2 (**124.9**)	97.9 (**117.4**)	89.7 (**97.1**)	98.0 (**116.0**)
2040-2069	**102.8** (**93.1**)	**104.1** (**119.6**)	**96.0** (**76.1**)	**113.1** (**114.3**)
2070-2099	**110.1** (**129.9**)	**110.8** (**143.1**)	**100.9** (**94.2**)	**125.2** (**142.8**)

Table 8 Mean and standard deviation of hydropower at the Chute-du-Diable power plant, on an annual and seasonal basis. Bold values indicate a statistically significant change compared to the control period

	Annual	Spring (AMJ)	Summer-Autumn (JASON)	Winter (DJFM)
	Mean (standard deviation) in % of the 1961-1990 period			
2010-2039	95.1 (**130.3**)	99.1 (**121.8**)	90.2 (**102.1**)	99.3 (**115.2**)
2040-2069	103.3 (**95.4**)	103.8 (**120.0**)	96.2 (**79.8**)	**115.2** (**114.6**)
2070-2099	**109.9** (**128.4**)	**109.2** (**135.7**)	100.4 (**95.5**)	**127.6** (**141.0**)

Table 9 Mean and standard deviation of hydropower at the Chute-a-la-Savane power plant, on an annual and seasonal basis. Bold values indicate a statistically significant change compared to the control period

	Annual	Spring (AMJ)	Summer-Autumn (JASON)	Winter (DJFM)
	Mean (standard deviation) in % of the 1961-1990 period			
2010-2039	96.8 (**136.3**)	98.4 (**169.0**)	95.5 (**105.2**)	97.5 (**105.6**)
2040-2069	106.9 (**103.5**)	110.2 (**164.8**)	104.3 (**87.8**)	**107.9** (**71.1**)
2070-2099	**115.2** (**150.0**)	**120.4** (**277.7**)	112.5 (**111.8**)	**114.7** (**80.6**)

The changes in total mean annual production and in the annual mean production of the power plant with a reservoir (Chute-des-Passes) are statistically significant in the periods 2040-2069 and 2070-2099. For the run-of-river power plants, the changes are significant in 2070-2099.

The changes in the variance of the annual production are statistically significant for all the periods and power plants.

On a seasonal basis, the changes in mean production are statistically significant in 2070-2099. The changes in mean for winter production are significant for all the power plants in 2040-2069 and 2070-2099. The changes of seasonal variances are significant for each power plant at all the future periods.

In general, the significant changes in hydropower are consequent with significant changes in the hydrological regimes. The increases in the annual mean flows in the north lead to increases in the annual mean hydropower for the Chute-des-Passes power plant. The same observation applies on the seasonal scale.

Power plant efficiency

The efficiency of a power plant is the ratio of the hydropower to the sum of the spilled and turbinated flows. The changes in means and variance of the annual mean efficiency at the future periods 2010-2039, 2040-2069 and 2070-2099, compared to the control period 1961-1990, were also investigated. The results are presented in Table 10, with the statistically significant changes in bold. The values are expressed as a percentage of the efficiency of the control period in order to highlight gains and losses in efficiency.

Table 10 Mean and standard deviation of the power plants' total efficiency, on an annual and seasonal basis

Bold values indicate a statistically significant change compared to the control period.

	Chute-des-Passes	Chute-du-Diable	Chute-a-la-Savane
	Mean (standard deviation) in % of the 1961-1990 period		
2010-2039	100.2 **(111.6)**	**101.1 (74.6)**	**101.4 (73.7)**
2040-2069	**99.3 (192.5)**	99.1 **(128.5)**	99.0 **(114.6)**
2070-2099	**98.7 (255.6)**	**98.1 (186.9)**	**97.3 (162.8)**

The general trend is for a reduction in the efficiency of the power plants in 2050 and 2080. For the same quantity of water used in the future, there will be less production. However, the efficiency increases in 2020. The changes in the variance of the annual mean efficiency are statistically significant for all the power plants, at each future period. The changes of variances reach 255.6% of the variance of the control period for the power plant with a reservoir. The variability of the efficiency increases as the horizon considered is further from the control period.

Unproductive spills

The totals of unproductive spills, and those at each power plant, are presented in figure 11. The general trend of unproductive spills shows an increase. However, this trend is not statistically significant.

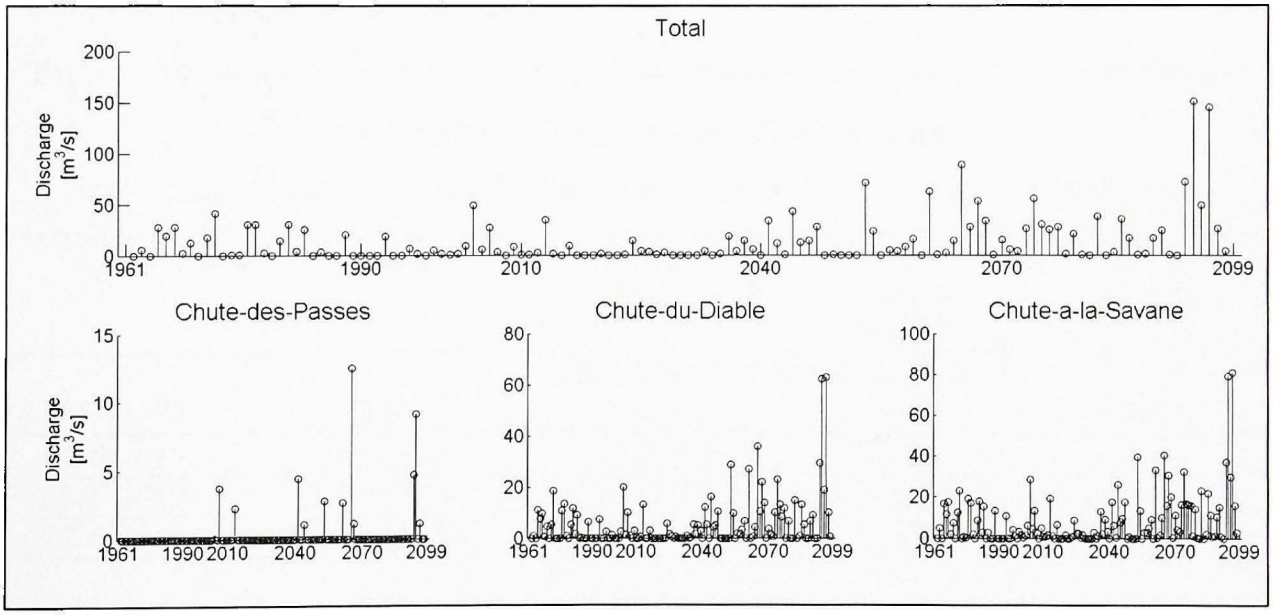


Figure 10 Mean annual unproductive spills, totals and for each power plant, for the period 1961-2099

Tables 11 to 14 compile the changes in mean and variance of the unproductive spills, in total and at each power plant. The changes of means in unproductive spills at the future periods

2010-2039, 2040-2069 and 2070-2099 are not statistically significant compared to the spills of the control period 1961-1990. However, the changes of variance in the annual and seasonal mean unproductive spills are significant for all the future periods.

Table 11 Mean and standard deviation of total unproductive spills, on annual and seasonal bases

Bold values indicate a statistically significant change compared to the control period.

	Annual	Spring (AMJ)	Summer-Autumn (JASON)	Winter (DJFM)
		Mean (standard deviation) in m^3/s		
1961-1990	0.5 (1.8)	2.0 (7.4)	0 (0)	0 (0)
2010-2039	10.4 **(16.1)**	31.1 **(51.8)**	2.2 **(6.6)**	5.2 (0)
2040-2069	15.5 **(20.4)**	45.7 **(64.7)**	3.2 **(7.9)**	8.3 (0)
2070-2099	26.4 **(37.8)**	78.8 **(120.1)**	5.4 **(14.4)**	13.5 **(28.6)**

Table 12 Mean and standard deviation of unproductive spills at the Chute-des-Passes power plant, on annual and seasonal bases

Bold values indicate a statistically significant change compared to the control period.

	Annual	Spring (AMJ)	Summer-Autumn (JASON)	Winter (DJFM)
		Mean (standard deviation) in m^3/s		
1961-1990	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
2010-2039	4.0 **(5.2)**	11.5 **(18.7)**	2.7 **(6.5)**	0 (0)
2040-2069	6.7 **(7.7)**	20.6 **(27.8)**	4.0 **(8.8)**	0 (0)
2070-2099	10.8 **(12.9)**	31.6 **(46.2)**	6.7 **(15.3)**	0 (0)

Table 13 Mean and standard deviation of unproductive spills at the Chute-du-Diable power plant, on annual and seasonal bases

Bold values indicate a statistically significant change compared to the control period.

	Annual	Spring (AMJ)	Summer-Autumn (JASON)	Winter (DJFM)
		Mean (standard deviation) in m^3/s		
1961-1990	0.1 (0.4)	0.3 (1.7)	0 (0)	0 (0)
2010-2039	1.3 **(2.8)**	4.4 **(8.9)**	0.4 **(1.7)**	0.1 **(0.6)**
2040-2069	2.6 **(4.4)**	8.2 **(14.3)**	1.0 **(3.3)**	0.3 **(1.4)**
2070-2099	4.0 **(7.5)**	12.9 **(24.0)**	1.5 **(5.0)**	0.4 **(2.0)**

Table 14 Mean and standard deviation of unproductive spills at the Chute-à-la-Savane power plant, on annual and seasonal bases

Bold values indicate a statistically significant change compared to the control period.

	Annual	Spring (AMJ)	Summer-Autumn (JASON)	Winter (DJFM)
		Mean (standard deviation) in m^3/s		
1961-1990	0.8 (2.4)	3.3 (9.8)	0 (0)	0 (0)
2010-2039	7.2 **(9.7)**	22.9 **(37.1)**	1.8 **(5.2)**	2.2 **(6.8)**
2040-2069	10.3 **(12.6)**	32.5 **(46.0)**	2.6 **(6.7)**	3.4 **(10.5)**
2070-2099	18.4 **(24.0)**	58.7 **(90.5)**	4.4 **(11.7)**	5.7 **(17.3)**

The changes in unproductive spills are generally consequent with the increase in the annual and seasonal runoff. However, spills at the summer-autumn season increase, despite a decrease in the annual mean flows, occurring much more in the south than in the north. This increase in discharges is explained by the increase in the flows' variability at this season.

Reservoir reliability

Reliability is the probability that a reservoir is in a state considered to be satisfactory (Simonovic et Li, 2004). The Lake-Manouane and Passes-Dangereuses reservoirs are in an unsatisfactory state when their level exceeds their maximum exploitation level.

The mean reliability of the Lake-Manouane reservoir, over the 139 years evaluated, is 99.99%. The maximum level of exploitation was reached once, with an exceedance of 0.09 meter. This occurred during the winter, in the 51st week of 2053. To identify the cause of this exceedance, the temperatures, precipitations and flows for this period were analyzed. The exceedance occurred during a week with a rainy event of 21 millimetres over four days, whereas the mean temperature was 1°C. These conditions caused inflows in the Lake-Manouane reservoir, whose level was maintained close to the normal level of exploitation in order to guarantee a water head during a low flow period. The operating rules under these conditions specify the allowance of spill flows to the maximum of the capacity of the spillway.

The reliability of the Passes-Dangereuses reservoir was 100%. No exceeding of the maximum level of exploitation occurred within the 139 years of simulations, while maintaining the current exploitation constraints.

CONCLUSIONS AND RECOMMANDATIONS

The aim of the work was to evaluate the impacts of and the adaptation to climate change of the water resource system management of the Peribonka River, a Nordic water resources system exploited for hydropower.

Adaptating the management of a water resource system to climate change is necessary because of the hydrological regime changes. The operating rules generated by optimization allow their adaptation to the new hydrological regimes. The use of unadapted operating rules in the impact studies of climate change on hydropower give pessimistic results (Markoff et Cullen, 2008).

This work used operating rules adapted annually to the new hydrological regimes, with a flows history of 35 years. This period was fixed according to a Mann-Kendall test of stationarity on annual mean flows, which indicated that the maximum period, for which the

assumption of stationarity was respected, is 35 years. This method allows the annual flows of the previous 35 years to be used in calculating the operating rules of a given year.

The simulation of the operations of the water resource system, with the hydrological scenarios in the context of climate change and the adapted operating rules, shows that the adaptation of the management of the reservoirs appears as a change in the seasonal mean reservoir levels. In the spring, the level of the reservoirs is lowered earlier in order to contain an early spring flood. In summer-autumn, the levels are maintained higher to maximize the water head. In winter, the levels are lower in order to limit exceeding the maximum exploitation levels, leading consequently to an increase in the flows to the reservoirs.

The conclusion of the study is that the hydropower for the Peribonka River water resource system would increase over the long-term for the climate projection used. The study reveals a decreasing (statistically significant) trend until 2030, and an increase (statistically significant) thereafter, until the temporal limit of the study, i.e. 2099. The production decrease is the consequence of the reduction in the runoff in the south of the watershed, where the run-of-river power plants are. The annual and seasonal (summer-autumn and winter) hydropower presents an increasing trend. In addition to this trend, the changes of means in annual and seasonal hydropower are generally statistically significant in the future periods 2040-2069 and 2070-2099. The changes in the variance are statistically significant throughout (it generally increases), which indicates to the managers that there would be more variability in the interannual production in the future. The changes of variability in the hydropower are greater in spring.

The (non significant) trend in unproductive spills also shows an increase. The reservoir levels are higher because of the increases in the runoff, starting from the year 2030. These higher levels compromise the reliability of the reservoir in winter because of the increasingly favourable climatic conditions for runoff (rain and rise in temperature). The level of a reservoir exceeds the maximum level of exploitation and changes the reservoir's reliability to 99.99%, whereas it was 100% for the control period 1961-1990. Because the reservoir's

maximum level of exploitation was exceeded, for future studies it is recommended to modify the constraints of exploitation of the reservoirs' levels in order to keep the reliability of the reservoir at 100%.

The management indicators, such as levels, hydropower, efficiency and unproductive spills, are used to quantify the performance and the behaviour of the water resource system with a management adapted to climate change. Using a climatic projection resulting from dynamic downscaling would allow the evolution of these indicators to be followed, since climatic projection is transitory. The RCMs climate projections are not as easily obtainable as the GCMs. The work presented did not compare the hydrological regimes and the management indicators under several climate projections in order to determine the uncertainty. For future work, it is recommended to use more than one RCM and GHGES, according to the accessibility of the data.

AKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank Mr Bruno Larouche of the Rio Tinto Alcan company for generously providing all the data necessary for simulation of the water resource system. They also thank Mrs Diane Chaumont at the Ouranos Consortium for providing the CRCM data.

REFERENCES

Caya, D. and Laprise, R. (1999). Semi-implicit semi-Lagrangian regional climate model: the Canadian RCM. Monthly weather review, 127(3), 341-362.

Christensen, N. S., Wood, A. W., Voisin, N., Lettenmaier, D. P. and Palmer, R. N. (2004). The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado river basin. Climatic change, 62, 337-363.

Diaz-Nieto, J. and Wilby, R. L. (2005). A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: Impacts on low-flows in the river Thames, United Kingdom. Climatic Change, 69, 245-268.

Fortin, J.-P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J. and Villeneuve, J.-P. (2001). Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. 1: Description of the model. Journal of hydrologic engineering, 6(2), 91-99.

Kalra, A., Piechota, T. C., Davies, R. and Tootle, G. A. (2007). Changes in U.S. streamflow and western U.S. snowpack. Journal of hydrologic engineering, 13(3), 156-163.

Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Arnell, N. W., Döll, P., Kabat, P., Jiménez, B., Miler, K. A., Oki, T., Sen, Z. and Shiklomanov, I. A. (2007). Freshwater resources and their management. In O. F. C. M.L. Parry, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (Ed.), Climate change 2007: Impacts, Adaptation and Vunerability. Contribution of Working Group II to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Changepp. 173-210. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Labadie, J. W. (2004). Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review. Journal of water resources planning and management, 130(2), 93-111.

Markoff, M. S. and Cullen, A. C. (2008). Impact of climate change on Pacific Northwest hydropower. Climatic Change, 87, 451-469.

McFarlane, N. A., Boer, G. G., Blanchet, J.-P. and Lazare, M. (1992). The Canadian Climate Centre second-generation general circulation model and its equilibrum climate. Journal od climate, 5, 1013-1044.

Minville, M., Brissette, F. and Leconte, R. (2008). Uncertainty of the Impact of Climate Change on the Hydrology of a Nordic Watershed. Journal of hydrology, Sous presse.

Nakicenovic, N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T. Y. Jung, T. Kram, E. L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Raihi, A. Roehrl, H-H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor and Dadi, Z. (2000). IPCC Special Report on Emissions Scenarios. United Kingdom and New York, NY, USA. 599 p.

Plummer, D. A., Caya, D., Frigon, A., Cote, H., Giguere, M., Paquin, D., Biner, S., Harvey, R. and De elia, R. (2006). Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM. Journal of climate, 19(13), 3112-3132.

Prudhomme, C., Jakob, D. and Svensson, C. (2003). Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments. Journal of hydrology, 277, 1-23.

Regonda, S. K., Rajagopalan, B., Clark, M. and Pitlick, J. (2005). Seasonal cycle shifts in hydroclimatology over the western United States. Journal of climate, 18(2), 372-384.

Salathé, E. P. j., Mote, P. w. and Wiley, M. W. (2007). Review of scenario selection and downscaling methods for the assessment of climate change impacts on hydrology in the United States pacific northwest. International journal of climatology, 27, 1611-1621.

Schmildli, J., Frei, C. and Vidale, P. L. (2006). Downscaling from GCM precipitation: A benchmark for dynamical and statistical downscaling methods. International journal of climatology, 26, 679-689.

Simonovic, S. P. and Li, L. (2004). Sensitivity of the Red river basin flood protection system to climate variability and change. Water resources management, 18, 89-110.

Turcotte, R., Fortin, L.-G., Fortin, V. and Villeneuve, J.-P. (2007). Operational analysis of the spatial distribution and the temporal evolution of the snowpack water equivalent in southern Quebec, Canada Nordic hydrology, 38(3), 211-234.

Turgeon, A. (2005). Solving a stochastic reservoir management problem with multilag autocorrelated inflows. Water resources research, 41, W12414.

Whitfield, P. H. and Cannon, A. J. (2000). Recent variation in climate and hydrology in Canada. Canadian water resources journal, 25(1), 19-65.

APPENDICE A : Données climatiques

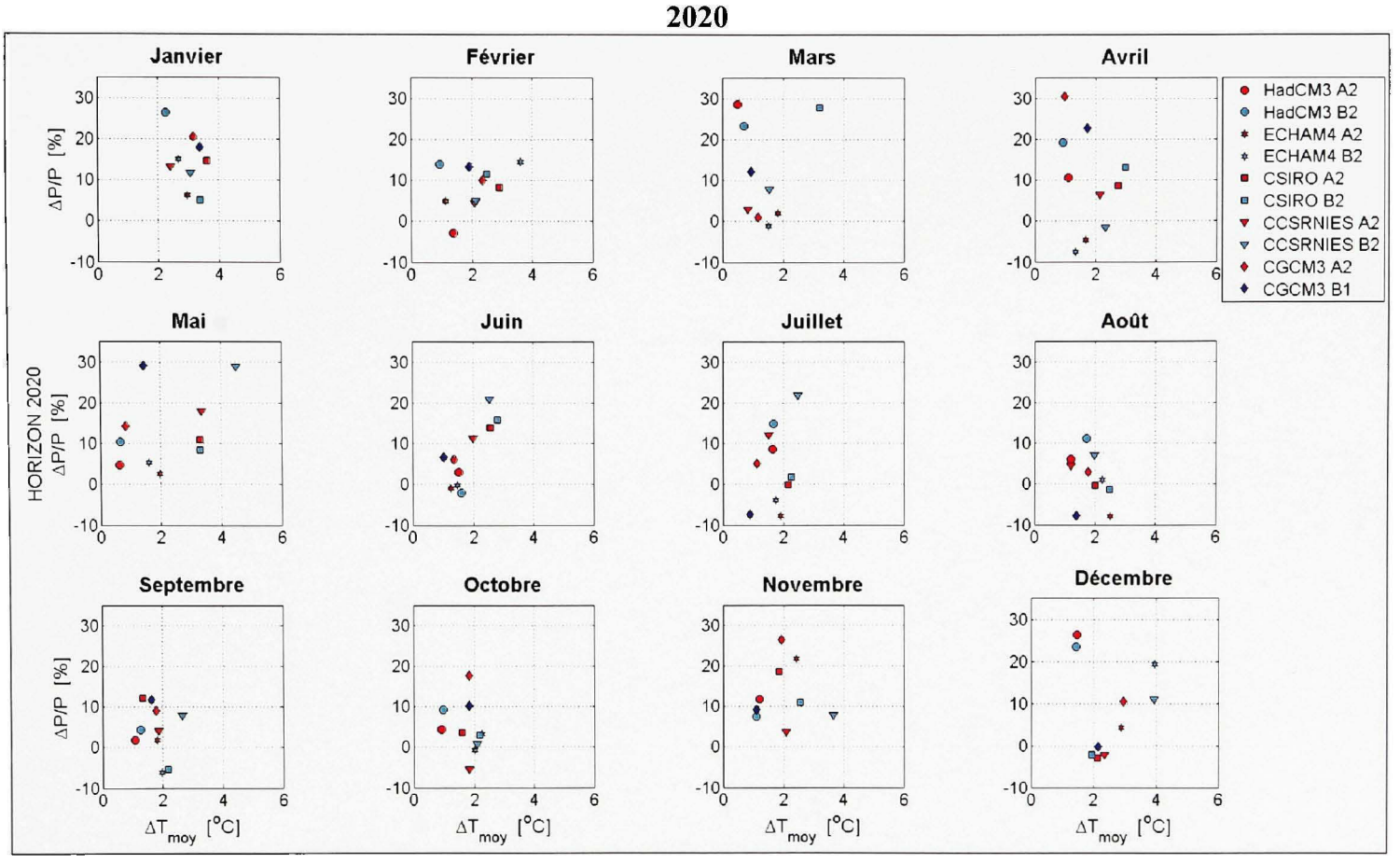


Figure A.1 ***Deltas mensuels à l'horizon 2080, par rapport à la période de contrôle 1961-1990 (Deltas)***

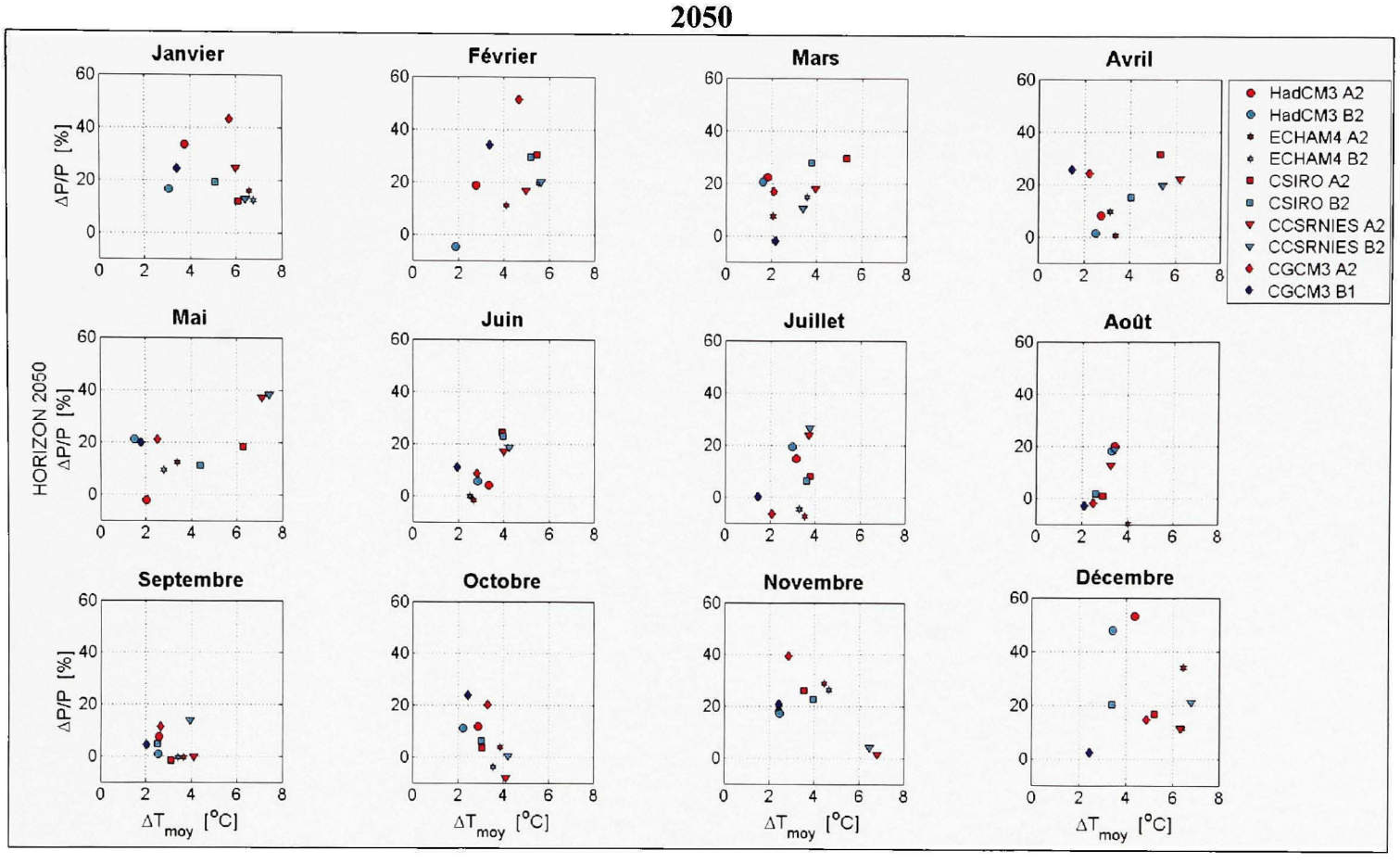


Figure A.2 ***Deltas mensuels à l'horizon 2050, par rapport à la période de contrôle 1961-1990 (Deltas).***

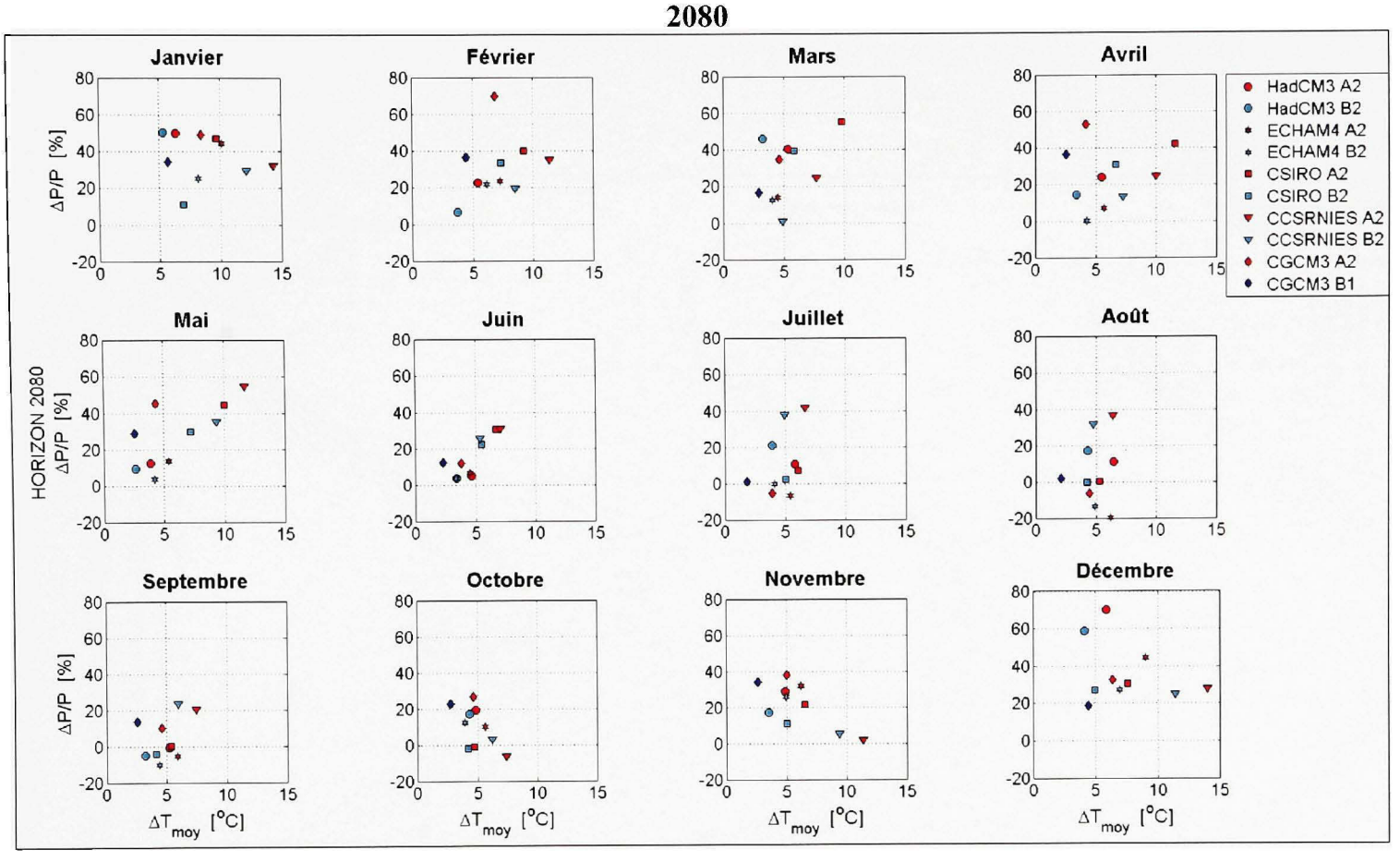
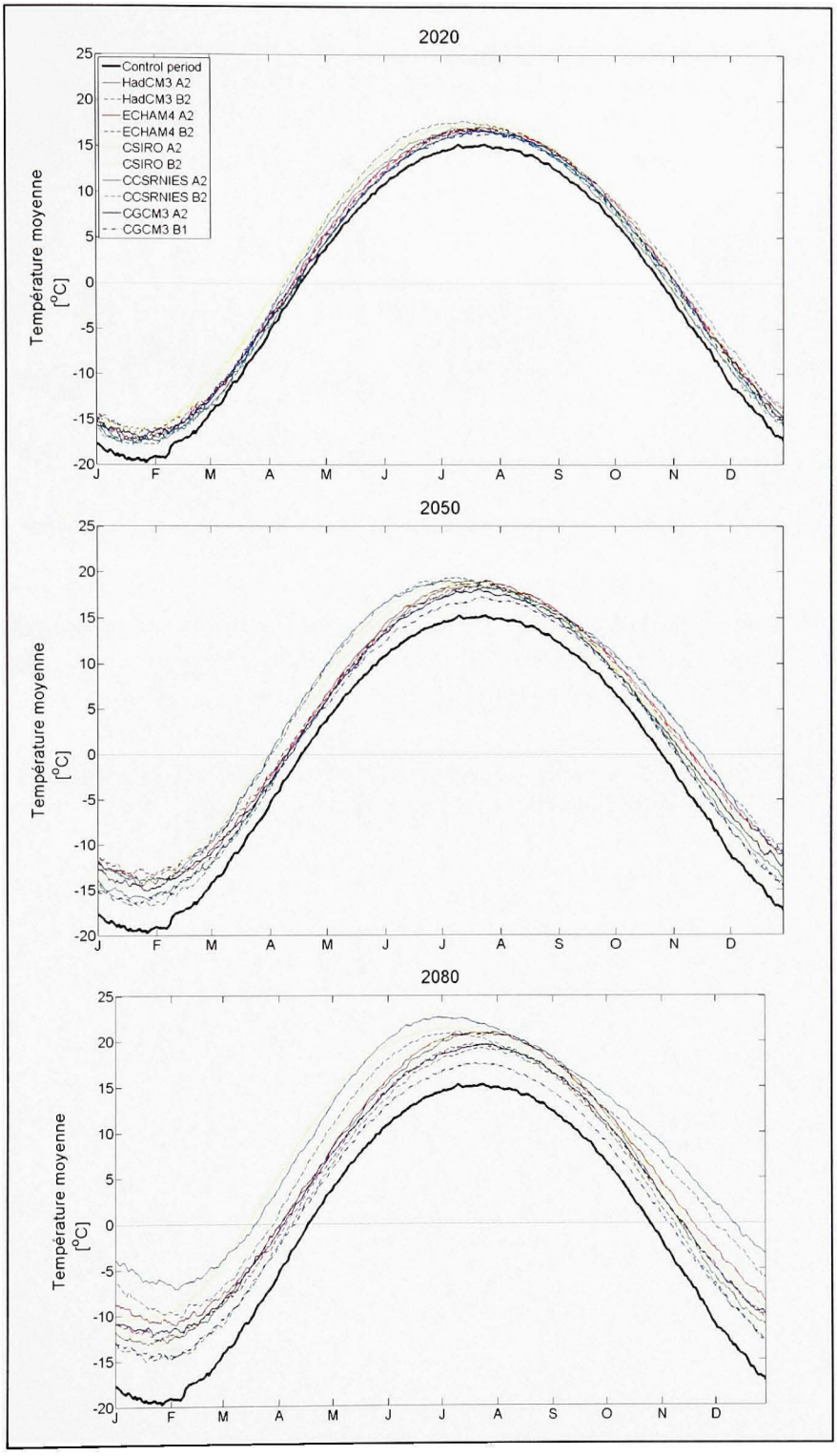
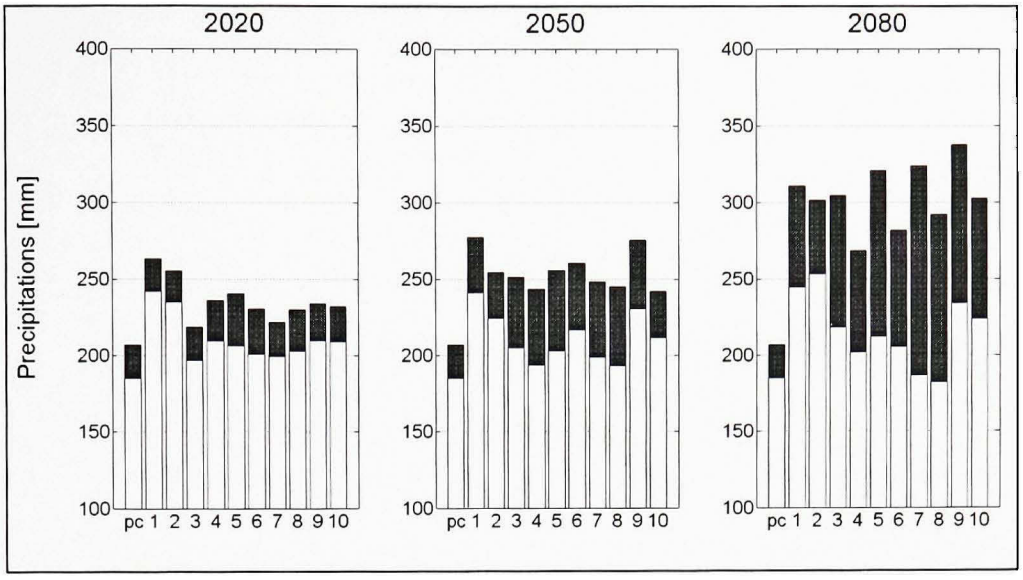


Figure A.3 ***Deltas mensuels à l'horizon 2080, par rapport à la période de contrôle 1961-1990 (Deltas).***



Exemple pour le sous bassin Chute-du-Diable.

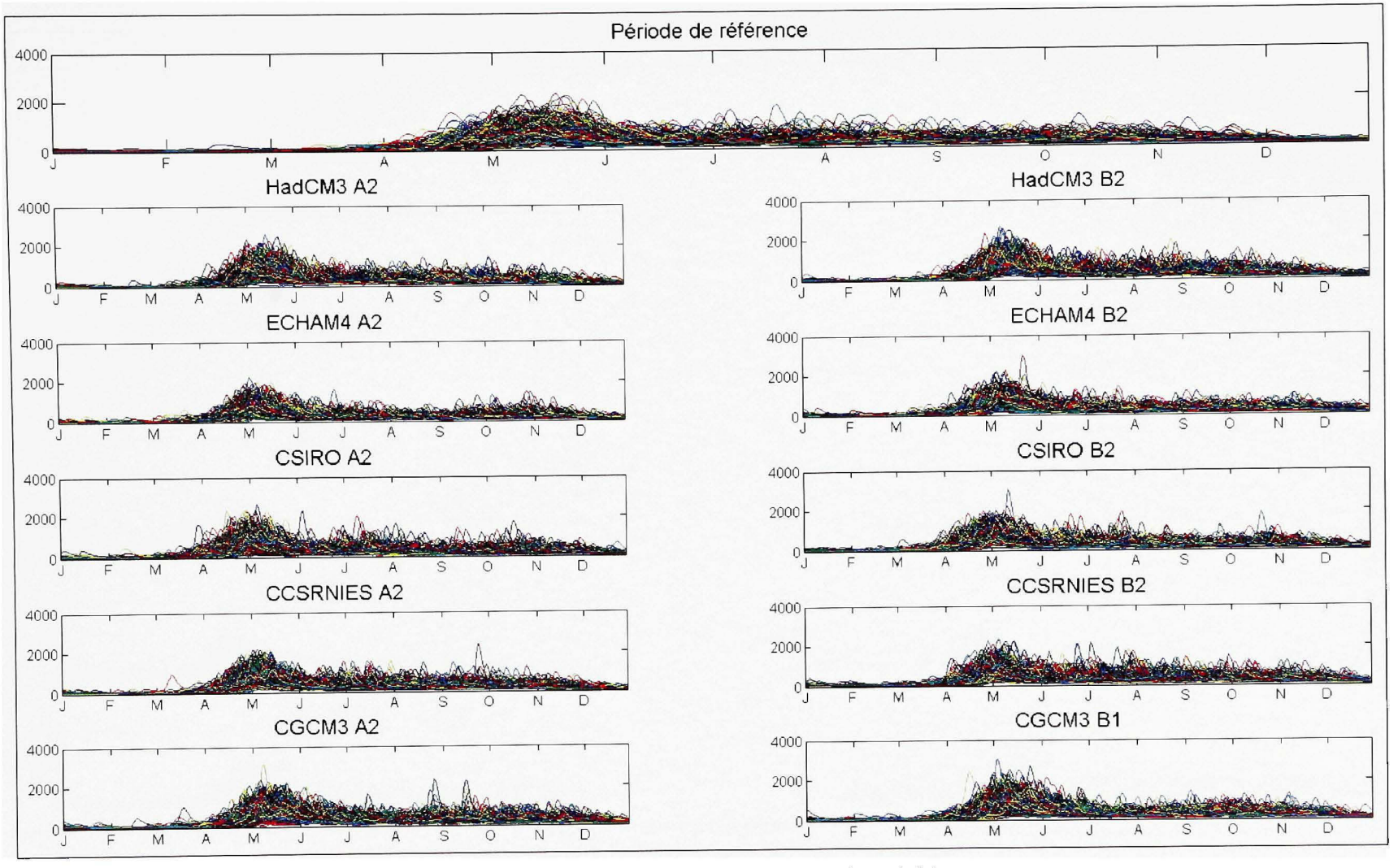
Figure A.4 ***Cycles annuels des températures aux horizons 2020, 2050 et 2080, par rapport à la période de contrôle 1961-1990 (Deltas).***



La portion blanche de la barre représente la quantité de précipitation sous forme de neige et la portion grisée, sous forme de pluie. Les mois considérés sont décembre, janvier, février et mars. Exemple pour le sous bassin Chute-du-Diable.

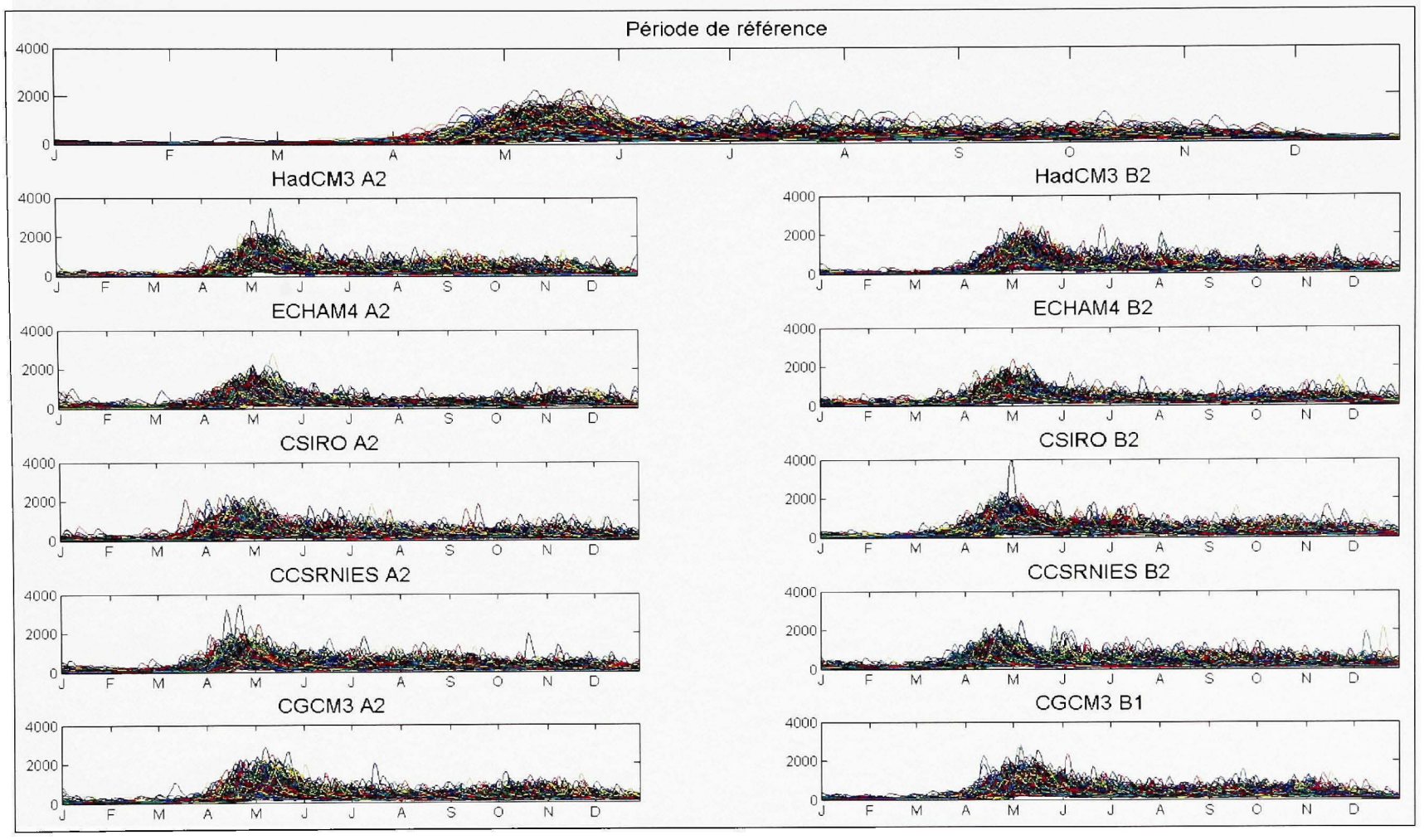
Figure A.5 ***Précipitations hivernales aux horizons 2020, 2050 et 2080, par rapport à la période de contrôle 1961-1990 (Deltas).***

APPENDICE B : Données hydrologiques



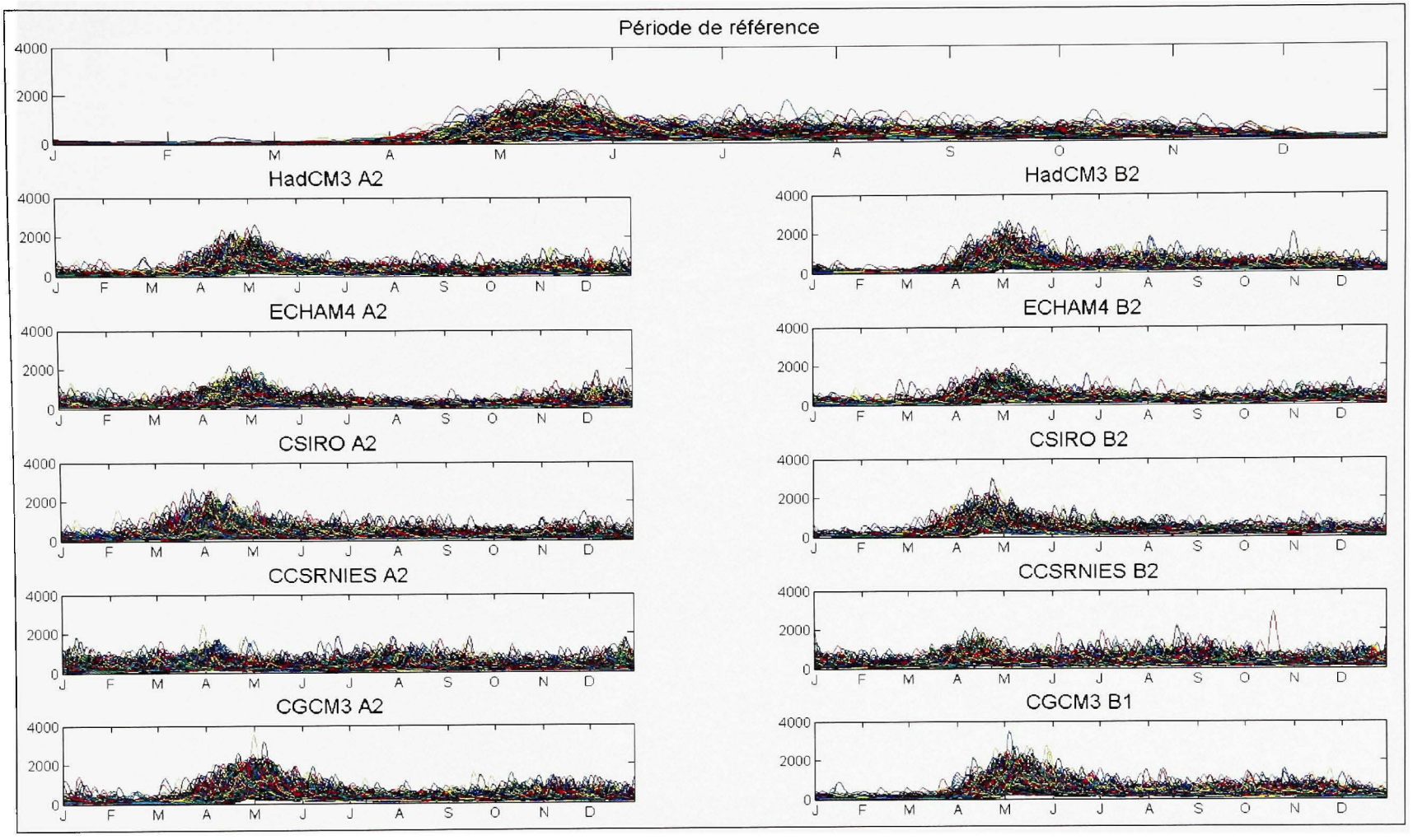
Exemple pour le sous bassin Chute-du-Diable.

Figure B.1 ***Hydrogrammes découlant des 30 séries climatiques de 30 ans (900 hydrogrammes par graphique) à la période de référence 1961-1990 et à l'horizon 2020 (HSAMI-Deltas).***



Exemple pour le sous bassin Chute-du-Diable.

Figure B.2 ***Hydrogrammes découlant des 30 séries climatiques de 30 ans (900 hydrogrammes par graphique) à la période de référence 1961-1990 et à l'horizon 2050 (HSAMI-Deltas).***



Exemple pour le sous bassin Chute-du-Diable.

Figure B.3 ***Hydrogrammes découlant des 30 séries climatiques de 30 ans (900 hydrogrammes par graphique) à la période de référence 1961-1990 et à l'horizon 2080 (HSAMI-Deltas).***

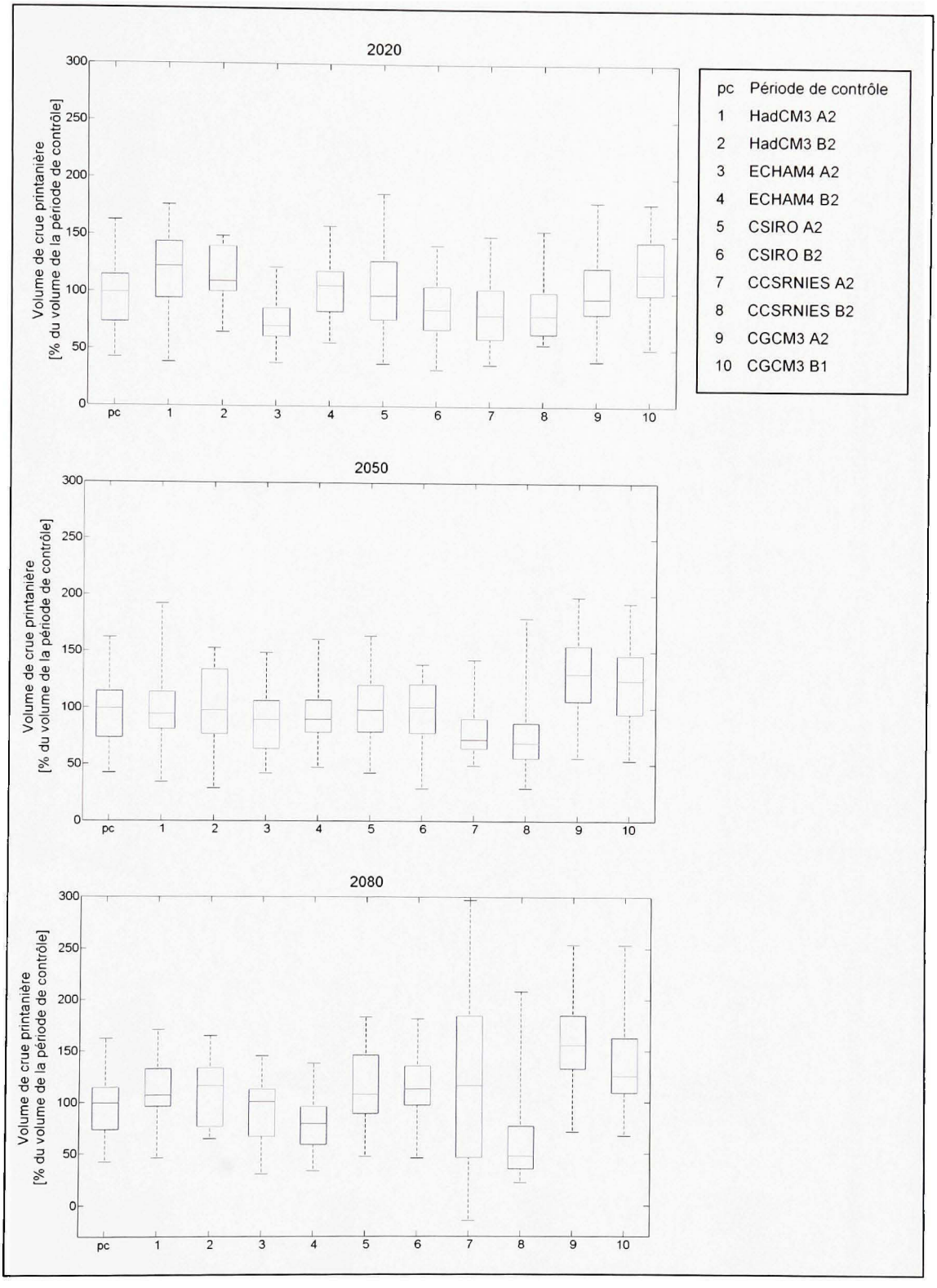
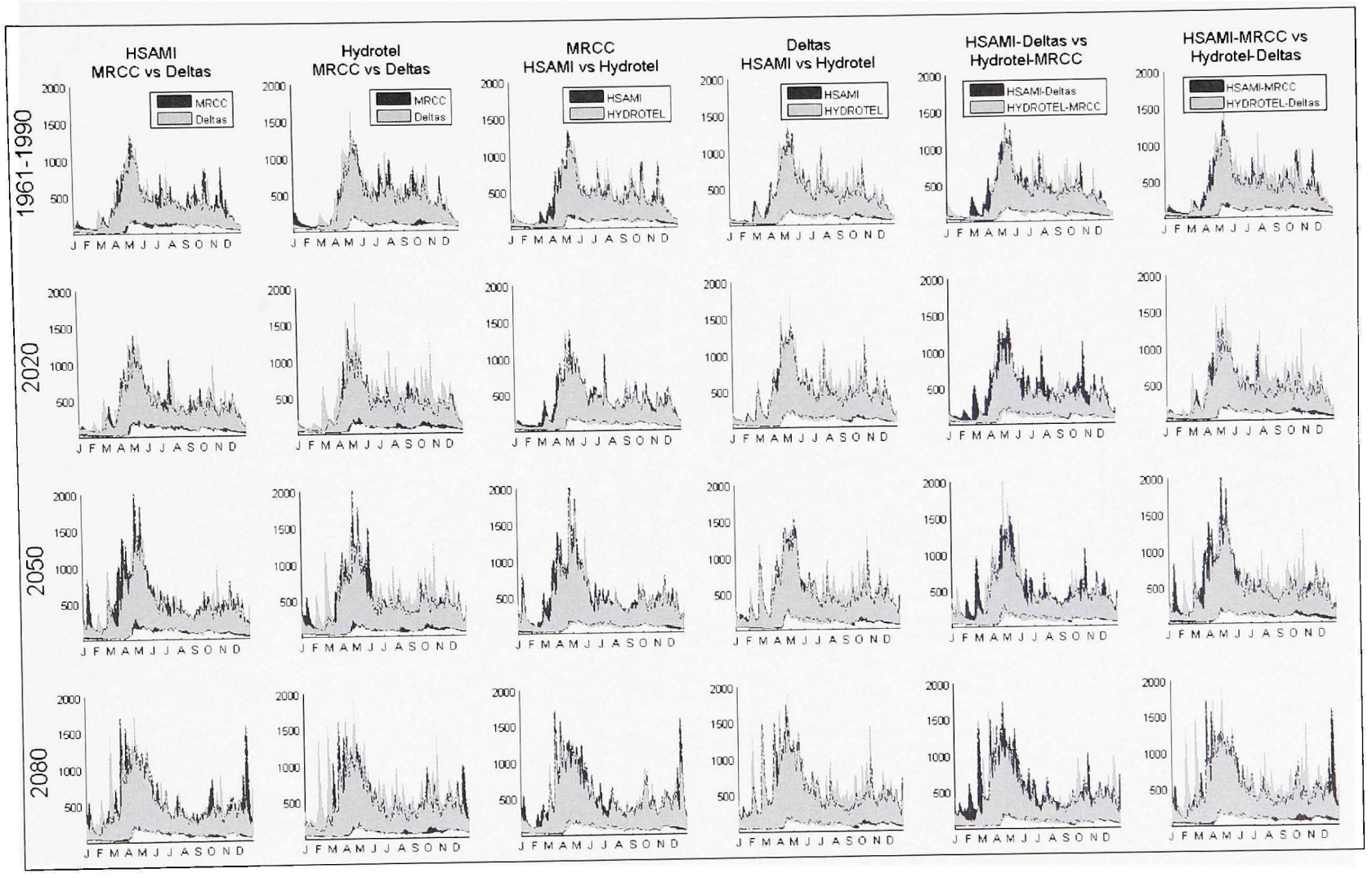
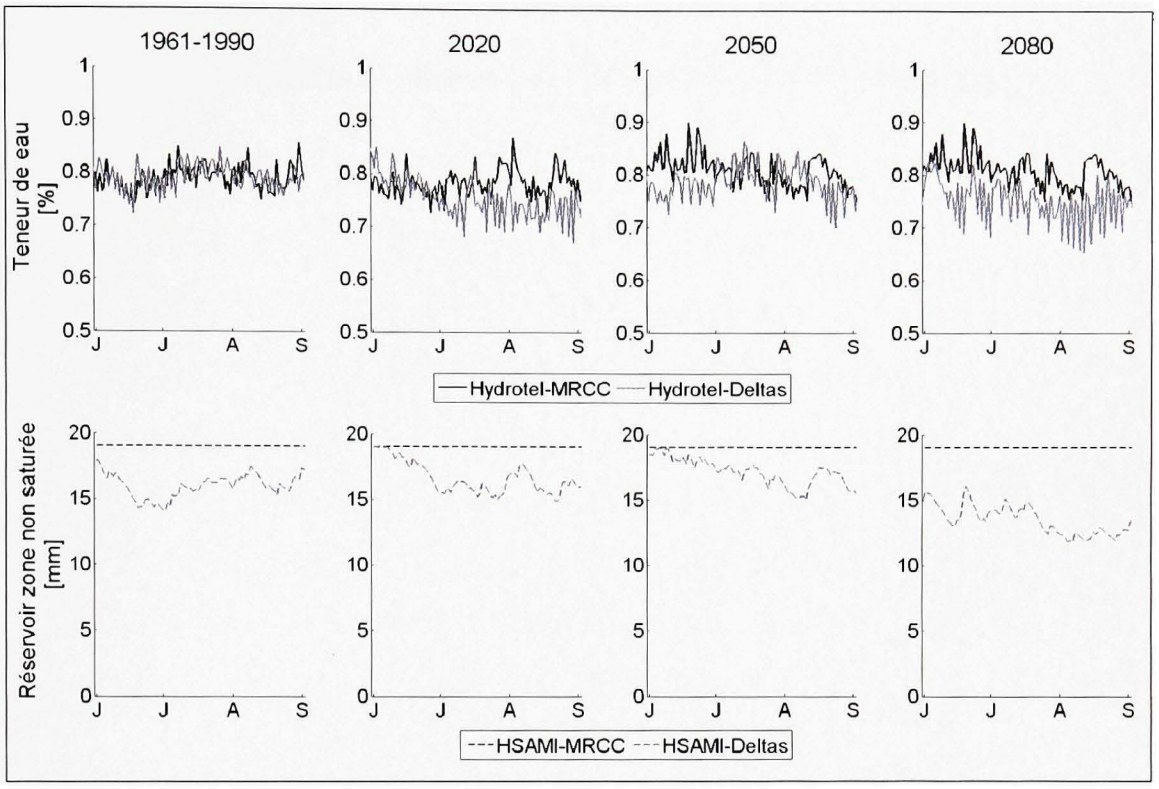


Figure B.4 ***Volumes de crue printanières aux horizons 2020, 2050 et 2080, en pourcentage des volumes de la période de contrôle 1961-1990 (HSAMI-Deltas).***



Note : Les données proviennent du MRCC pilotées par CGCM3 A2 et les deltas sont également pour CGCM3 A2.

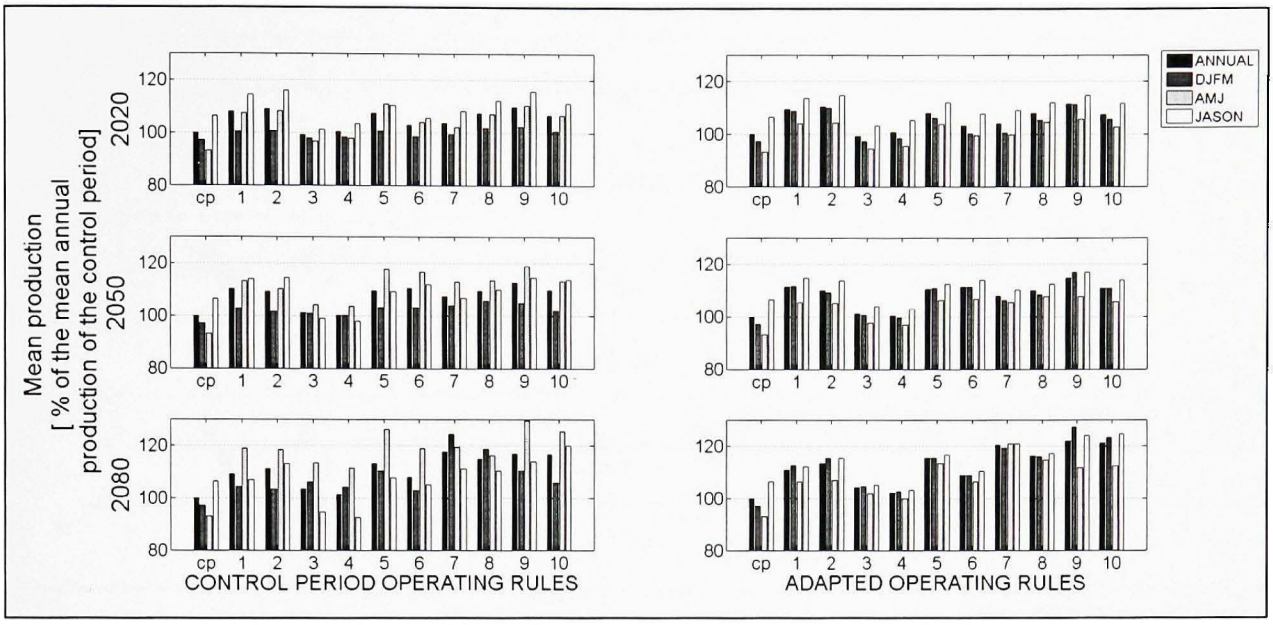
Figure B.5 ***Enveloppes des débits des combinaisons Hydrotel-MRCC, Hydrotel-Deltas, HSAMI-MRCC et HSAMI-Deltas, à la période de contrôle 1961-1990 et aux horizons 2020, 2050 et 2080.***



Les teneurs en eau avec Hydrotel sont pour la deuxième couche. La capacité du réservoir de la zone non saturée de HSAMI est un paramètre de calibration.

Figure B.6 ***Teneur en eau pour les combinaisons Hydrotel-MRCC et Hydrotel-Deltas et état du réservoir de la zone non-saturée pour les combinaisons HSAMI-MRCC et HSAMI-Deltas, à la période de contrôle 1961-1990 et aux horizons 2020, 2050 et 2080.***

APPENDICE C : Indicateurs de gestion du système hydrique



Les diagrammes à barre à gauche présente la production hydroélectrique avec les régimes hydrologiques futurs et les règles de gestion de la période de contrôle. Les diagrammes à barre à droite présente la production hydroélectrique avec les régimes hydrologiques futurs et les règles de gestion adaptées à chaque régime hydrologique.

Figure C.1 ***Production moyenne annuelle et saisonnière totale aux horizons 2020, 2050 et 2080, en pourcentage des volumes de la période de contrôle 1961-1990 (HSAMI-Deltas).***

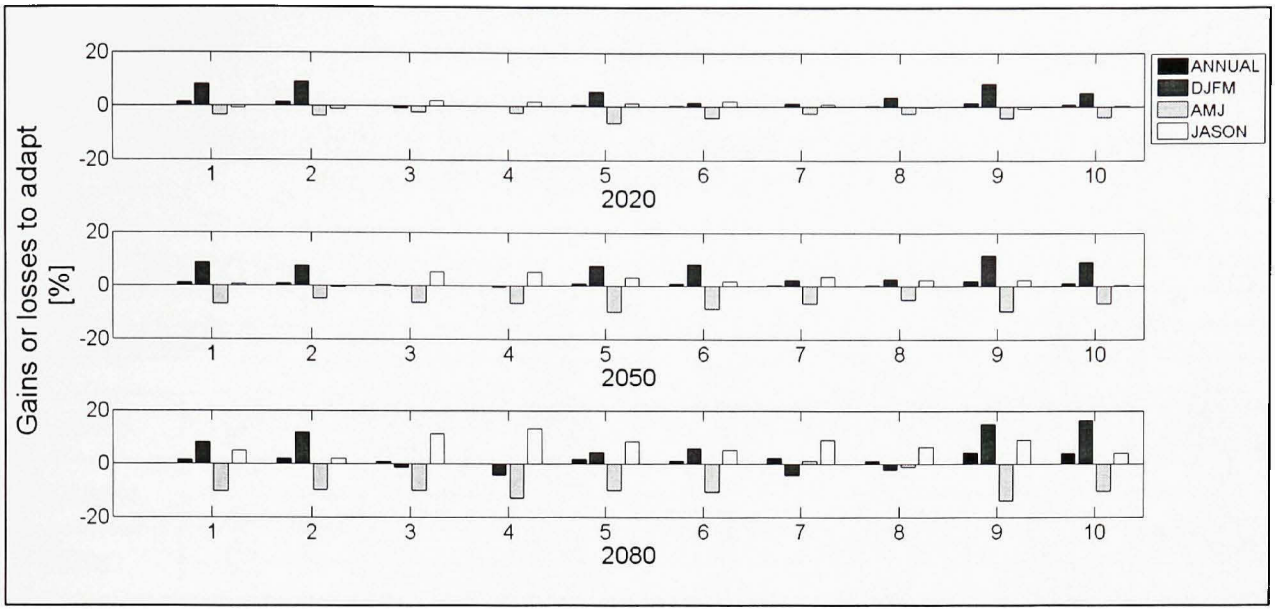


Figure C.2 ***Gain ou perte (règles de gestion adaptées par rapport à non adaptées) en production moyenne annuelle et saisonnière totale aux horizons 2020, 2050 et 2080, en pourcentage des volumes de la période de contrôle 1961-1990 (HSAMI-Deltas).***

Tableau C.1.

Fiabilité et vulnérabilité des réservoirs (HSAMI-Deltas)
Le premier nombre indique la probabilité de dépassement en pourcentage et celui entre parenthèses le dépassement maximal en mètres.

SITUATION 1 – RÈGLES OPTIMISÉES AVEC LA PÉRIODE DE CONTRÔLE							
		Lake-Manouane			Passes-Dangereuses		
Control period		0 (0)			0 (0)		
		2020	2050	2080	2020	2050	2080
HadCM3	A2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0,2 (0,18)	0,1 (0,71)	0,4 (0,57)
	B2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0,4 (1,87)	0,1 (0,21)	0,6 (0,50)
ECHAM4	A2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	B2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
CSIRO	A2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0,1 (0,02)	0 (0)	0,3 (0,95)
	B2	0 (0)	0,1 (0,15)	0 (0)	0 (0)	0,1 (0,06)	0 (0)
CCSRNIES	A2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	B2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0,1 (0,17)	0 (0)
CGCM3	A2	0 (0)	0 (0)	0,1 (0,35)	0,1 (0,67)	0,3 (0,71)	4,0 (1,70)
	B1	0 (0)	0 (0)	0,1 (0,14)	0,3 (0,68)	0,2 (0,53)	3,0 (1,84)
SITUATION 2 – RÈGLES OPTIMISÉES AVEC LE SCÉNARIO D'APPORT FUTUR CORRESPONDANT							
		Lake-Manouane			Passes-Dangereuses		
Control period		0 (0)			0 (0)		
		2020	2050	2080	2020	2050	2080
HadCM3	A2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0,1 (0,34)	0,1 (0,68)
	B2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0,2 (0,20)	0,1 (0,21)	0 (0)
ECHAM4	A2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	B2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
CSIRO	A2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	B2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
CCSRNIES	A2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)
	B2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0,1 (0,15)	0 (0)
CGCM3	A2	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0,1 (0,67)	0,1 (0,26)	0,2 (1,76)
	B1	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0,3 (0,60)

LISTE DE RÉFÉRENCES

Alcan métal primaire. (2004). Plan de gestion des eaux de retenue: Rivières Péribonka et Saguenay. Saguenay: Alcan. 92 p.

Arnell, Nigel and Hulme, Mike. (2000). Implications of climate change for large dams and their management. Vlaeberg: Universities of Southampton and East Anglia. 88 p.

Bathurst, J.C., Ewen, J., Parkin, G., O'Connel, P.E. and Cooper, J.D. (2004). Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. 3. Blind validation for internal and outlet responses. Journal of hydrology, 287, 74-94.

Bergström, Sten, Lindström, Göran and Pettersson, Anna. (2002). Multi-variable parameter estimation to increase confidence in hydrological modelling. Hydrological processes, 16, 413-421.

Beven, Keith. (2006). A manifesto for the equifinality thesis. Journal of hydrology, 320(1-2), 18-36.

Beven, Keith and Freer, Jim. (2001). Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems using the GLUE methodology. Journal of hydrology, 249, 11-29.

Bisson, J.L. and Roberge, F. (1983). Prévisions des apports naturels: Expérience d'Hydro-Québec. Paper presented at the Workshop on flow predictions, Toronto.

Boer, George G. (2004). Long time-scale potential predictability in an ensemble of coupled climate models. Climate dynamics, 23, 29-44.

Booij, Martijn J. (2003). Determination and integration of appropriate spatial scales for river basin modelling. Hydrological processes, 17, 2581-2598.

Brass, Carsten and Schumann, Andreas H. (2003). An optimization model for reservoir systems to assist in coping with changes in demand and supply conditions. Paper presented at the Water resources systems - Hydrological risk, management and development, Sapporo.

Brekke, Levi. D., Miller, Norman L., Bashford, Kathy E., Quinn, Nigel W.T. and Dracup, John A. (2004). Climate change impacts uncertainty for water resources in the San Joaquin River Basin, California. Journal of the american water resources association, 40(1), 149-164.

Butts, Michael B., Payne, Jeffrey T., Kristensen, Michael and Madsen, Henrik. (2004). An evaluation of the impact of model structure on hydrological modelling uncertainty for streamflow simulation. Journal of hydrology, 298, 242-266.

Caron, Annie. (2005). "Étalonnage et validation d'un générateur de climat dans le contexte des changements climatiques". MS Thesis, École de technologie supérieure, Montréal.

Carpenter, Theresa M. and Georgakakos, Konstantine P. (2001). Assessement of Folsom lake response to historical and potential future climate scenarios: 1. Forecasting. Journal of hydrology, 249, 148-175.

Carpenter, Theresa M. and Georgakakos, Konstantine P. (2006). Intercomparison of lumped versus distributed hydrologic model ensemble simulations on operational forecast scales. Journal of hydrology, 329, 174-185.

Caya, Daniel and Laprise, René. (1999). Semi-implicit semi-Lagrangian regional climate model: the Canadian RCM. Monthly weather review, 127(3), 341-362.

Chartier, Isabelle. (2006). Influence du modèle hydrologique sur la modélisation des apports dans une perspective de changements climatiques: une application sur le bassin versant Baskatong. Paper presented at the Barrages: Passé, présent et futur, Québec (Québec).

Christensen, Niklas S., Wood, Andrew W., Voisin, Nathalie, Lettenmaier, Dennis P. and Palmer, Richard N. (2004). The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado river basin. Climatic change, 62, 337-363.

Croley, Thomas E. (2003). Great Lakes climate change hydrologic impact assessment I.J.C. Lake ontario-St-Lawrence river regulation study. Ann Arbor, Michigan: NOAA, Great Lakes Environmental Research Labatory. 77 p.

Diaz-Nieto, Jacqueline and Wilby, Robert L. (2005). A comparison of statistical downscaling and climate change factor methods: Impacts on low-flows in the river Thames, United Kingdom. Climatic Change, 69, 245-268.

Dibike, Y.B. and Coulibaly, P. (2005). Hydrologic impact of climate change in the Saguenay watershed: comparison of downscaling methods and hydrologic models. Journal of hydrology, 307, 145-163.

Dietterick, Brian C., Lynch, James A. and Corbett, Edward S. (1999). A calibration procedure using topmodel to determine suitability for evaluating potential climate change effects on water yield. Journal of the American water resources association, 35(2), 457-468.

Duan, Q. (2003). Calibration of watershed models. In Q Duan ,Hoshin Gupta andA.N. Sorooshian (Eds.), Water science and applicationVol. 6, pp. 89-104. Washington D.C.

Engeland, Kolbjorn, Xu, Chong-yu and Gottschalk, Lars. (2005). Assessing uncertainties in a conceptual water balance model using Bayesian methodology. Hydrological sciences - Jounal des sciences hydrologiques, 50(1), 45-63.

Environnement Canada. (2004). Menaces pour la disponibilité de l'eau au Canada. Burlington (Ontario): Institut national de recherche scientifique. 148 p.

Fortin, Jean-Pierre, Turcotte, Richard, Massicotte, Serge, Moussa, Roger, Fitzback, Josée and Villeneuve, Jean-Pierre. (2001a). Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. 1: Description of the model. Journal of hydrologic engineering, 6(2), 91-99.

Fortin, Jean-Pierre, Turcotte, Richard, Massicotte, Serge, Moussa, Roger, Fitzback, Josée and Villeneuve, Jean-Pierre. (2001b). Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. II: Application to Chaudiere watershed. Journal of hydrologic engineering, 6(2), 100-108.

Fortin, Vincent. (2000). Le modèle météo-apport HSAMI: historique, théorie et application. Varennes: Institut de recherche d'Hydro-Québec. 68 p.

Fowler, H.J., Blenkinsop, S. and Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. International journal of climatology, 27, 1547-1578.

Fowler, H.J., Kilsby, C.G., O'Connel, P.E. and Burton, A. (2005). A weather-type conditioned multi-site stochastic rainfall model for the generation of climatic variability and change. Journal of hydrology, 38, 50-66.

Fronzek, Stefan and Carter, Timothy R. (2007). Assessing uncertainties in climate change impacts on resource potential for Europe based projections from RCMs and GCMs. Climatic change, 81, 357-371.

Georgakakos, Konstantine P., Graham, N.E., Carpenter, Theresa M. and Georgakakos, Aris P. (2005). Integrating climate-hydrology forecasts and multi-objective reservoir management for Northern California. EOS, 86(12), 122 et 127.

Georgakakos, Konstantine P., Seo, Dong-Jun, Gupta, Hoshin, Schaake, John and Butts, Michael B. (2004). Towards the characterization of streamflow simulation uncertainty throught multimodel ensembles. Journal of hydrology, 298, 222-241.

GIEC, Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques. (2000). Special report on emissions scenarios : Summary for policymakers. 27 p.

GIEC, Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques. (2001a). Climate change 2001: The scientific basis. Wembley, Royaume-Unis. 882 p.

GIEC, Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques. (2001b). Impacts, adaptation and vulnerability. 967 p.

GIEC, Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques. (2007a). Climate change 2007: Synthetisis report, Contribution of working groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernemental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC. 104 p.

GIEC, Groupe d'experts intergouvernemental sur les changements climatiques. (2007b). Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group 1 to the Fourth assessment report of the IPCC (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller). Cambridge, United Kingdom and New-York: Intergovernmental Panel on Climate Change. 996 p.

Gouvernement du Québec. (2004). L'énergie au Québec. Québec: Ministère des ressources naturelles et de la faune. 128 p.

Hay, L.E., Wilby, Robert L. and Leavesly, H.H. (2000). Comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. Journal of the American water resources association, 36(2), 387-397.

Hu, Zhenglin and Islam, Shafiqul. (1997). Evaluation of sensitivity of land surface hydrology representations with and without land-atmosphere feedback. Hydrological processes, 11, 1557-1572.

Hulme, Mike and Carter, T. (1999). Representing uncertainty in climate change scenarios and impacts studies. Paper presented at the Éclat-2 Helsinki workshop, Norwich, UK.

Huth, Radan, Kysely, Jan and Dubrovsky, Martin. (2001). Time structure of observed, GCM-Simulated, downscaled, and stochastically generator daily temperature series. Journal of climate, 14(20), 4047-4061.

IPCC. (2001a). Climate Change 2001: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Mc Carthy, J.J, Canziani, O., Leary, N.A., Dokken, D.J. and White, K.S.). Cambridge: Intergovernmental Panel on Climate Change. 967 p.

IPCC. (2001b). Climate Change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson). Wembley, U.K.: Intergovernmental Panel on Climate Change. 882 p.

IPCC. (2007a). Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change (Parry, M.L., Canziani, J.P., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. and Hanson, C.E.). Cambridge, UK: Intergovernmental Panel on Climate Change. 1000 p.

IPCC. (2007b). Climate change 2007: The physical science basis. Contribution of working group 1 to the Fourth assessment report of the IPCC (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller). Cambridge, United Kingdom and New-York: Intergovernmental Panel on Climate Change. 996 p.

IPCC Data distribution centre. (2005). "Criteria for selecting general circulation models". <http://www.ipcc-data.org/>, Page consultée le 9 juin 2005

Jiang, Tao, Chen, Yongqin David, Xu, Chong-yu, Chen, Xiaohong, Chen, Xi and Singh, Vijay P. (2007). Comparison of hydrological impacts of climate change simulated by six hydrological models in the Dongjiang Basin, South China. Journal of hydrology, 336, 316-333.

Jones, Roger N., Chiew, Francis H. S., Boughton, Walter C. and Zhang, Lu. (2006). Estimating the sensitivity of mean annual runoff to climate change using selected hydrological models. Advances in water resources, 29(10), 1419-1429.

Kalra, Ajay, Piechota, Thomas C., Davies, Rob and Tootle, Glenn A. (2007). Changes in U.S. streamflow and western U.S. snowpack. Journal of hydrologic engineering, 13(3), 156-163.

Karamouz, Mohammad, Szidarovszky, Ferenc and Zahraie, Banafsheh. (2003). Water resources systems analysis. Boca Raton: Lewis. 589 p.

Karamouz, Mohammad, Zahraie, Banafsheh and Araghinejad, Shahab. (2005). Decision support system for monthly operation of hydropower reservoirs: A case study. Journal of computing in civil engineering, 19(2), 194-207.

Klipsch, Joan D. (2003). HEC-ResSim, Reservoir System Simulation, User's Manual. Davis: US Army Corps of Engineers. 426 p.

Kuczera, Georges and Parent, Éric. (1998). Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithme. Journal of hydrology, 211, 69-85.

Kundzewicz, Z.W., Mata, L.J., Arnell, N.W., Döll, P., Kabat, P., Jiménez, B., Miler, K.A., Oki, T., Sen, Z. and Shiklomanov, I.A. (2007). Freshwater resources and their management. In O.F. Canziani M.L. Parry, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (Ed.), Climate change 2007: Impacts, Adaptation and Vunerability. Contribution of Working Group II to the fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Changepp. 173-210. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Labadie, John W. (2004). Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review. Journal of water resources planning and management, 130(2), 93-111.

Lambert, S.J. and Boer, George G. (2001). CMIP1 evaluation and intercomparison of coupled climate models. Climate dynamics, 17, 83-106.

Lemmen, D.S., Warren, F.J., Lacroix, J. and Bush, E. (éditeurs). (2008). Vivre avec les changements climatiques au Canada: édition 2007. Ottawa (Ontario). 448 p. p.

Loucks, Daniel P., Stedinger, Jery R. and Haith, Douglas A. (1981). Water resource systems planning and analysis. Englewood Cliffs: Prentice-Hall. 559 p.

Lund, Jay R. and Guzman, Joel. (1999). Derived operating rules for reservoirs in series or in parallel. Journal of water resources planning and management, 125(3), 143-153.

Mareuil, Arnaud, Leconte, Robert, Brissette, François and Minville, Marie. (2007). Impacts of climate change on the frequency and severity of floods in the Châteauguay River basin, Canada. Canadian journal of civil engineering, 34, 1048-1060.

Markoff, Matthew S. and Cullen, Alison C. (2008). Impact of climate change on Pacific Northwest hydropower. Climatic Change, 87, 451-469.

Maurer, Edwin P. (2007). Uncertainty in hydrologic impacts of climate change in the Sierra Nevada, California, under two emissions scenarios. Climatic change, 82, 309-325.

McFarlane, N.A., Boer, George G., Blanchet, J.-P. and Lazare, M. (1992). The Canadian Climate Centre second-generation general circulation model and its equilibrum climate. Journal od climate, 5, 1013-1044.

Merritt, Wendy S., Alila, Younes, Barton, Mark, Taylor, Bill, Cohen, Stewart and Neilsen, Denise. (2006). Hydrologic response to scenarios change in sub watersheds of the Okanagan basin, British Columbia. Journal of hydrology, 326, 79-108.

Mimikou, Maria and Fotopoulos, Fotis. (2005). Regional effects of climate change on hydrology and water resources in Aliakmon River Basin, Foz do Iguaçu, Brazil.

Ministère des Ressources naturelles et de la faune du Québec. (2003). "Cartes de dépôts de surface". <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/forets/connaissances/connaissances-inventaire-cartes-liste-depots.jsp>, Page consultée le 25 août 2005

Ministère des Ressources naturelles et de la faune du Québec. (2006). "Base de données topographiques du Québec ". <http://www.mrnf.gouv.qc.ca/publications/territoire/expertise/08_BDTQ_Avril2006.pdf>, Page consultée le 3 septembre 2006

Minville, Marie. (2007). Changements climatiques: Les atténuer ou s'y adapter? Points de vue économique, environnemental et équitable. Vecteur environnement, 40(2), 60-68.

Minville, Marie, Brissette, François and Leconte, Robert. (2008). Uncertainty of the Impact of Climate Change on the Hydrology of a Nordic Watershed. Journal of hydrology, 358 (1-2), 70-83.

Mousavi, Seyed Jamshid, Karamouz, Mohammad and Menhadj, Mohammad Bagher. (2004). Fuzzy-state stochastic dynamic programming for reservoir operation. Journal of water resources planning and management, 130(6), 460-470.

Muzik, Ivan. (2001). Sensitivity of hydrologic systems to climate change. Canadian water resources journal, 26(2), 233-253.

Nakicenovic, N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T. Y. Jung, T. Kram, E. L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Raihi, A. Roehrl, H-H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor and Dadi, Z. (2000). IPCC Special Report on Emissions Scenarios. United Kingdom and New York, NY, USA. 599 p.

Ogden, Fred L. and Julien, Pierre Y. (2002). CASC2D: A two-dimensional, physically-bsed, hortonian hydrologic model. In Vijay P. SinghDonald K. Frevert (Eds.), Mathematical models of small watershed hydrology and applicationspp. 950. Chelsea: Water resources publications.

Oliveira, Rodrigo and Loucks, Daniel P. (1997). Operating rules for multireservoirs policies. Water resources research, 33(4), 839-852.

Ouranos. (2004). S'adapter aux changements climatiques. Montréal: Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques. 83 p.

Palutikof, J.P., Winkler, J.A., Goodess, C.M. and Andresen, J.A. (1997). The simulation of daily temperature time series from GCM Output. Part 1: Comparison of model data with observations. Journal of climate, 10, 2497-2513.

Payne, Jeffrey T., Wood, Andrew W., Hamlet, Alan F., Palmer, Richard N. and Lettenmaier, Dennis P. (2004). Mitigating the effects of climate change on the water resources of the Columbia river basin. Climatic Change, 62, 233-256.

Pietroniro, Alain. (2001). A framework for coupling atmospheric and hydrological models. Paper presented at the Soil-Vegetation-Atmosphere transfer schemes and large-scale hydrological models (Sixth IAHS scientific assembly), Maastricht, Netherlands.

Plummer, David A., Caya, Daniel, Frigon, Anne, Cote, Helene, Giguere, M, Paquin, Dominique, Biner, Sebastien, Harvey, Richard and De elia, R. (2006). Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM. Journal of climate, 19(13), 3112-3132.

Prudhomme, Christel, Jakob, Dörte and Svensson, Cecilia. (2002). Impact of climate change on flooding in the UK: a methodology for estimating uncertainty. Paper presented at the FRIEND 2002 - Regional hydrology: Bridging the gap between research and pratice, Cape town, South-Africa.

Prudhomme, Christel, Jakob, Dörte and Svensson, Cecilia. (2003). Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments. Journal of hydrology, 277, 1-23.

Rao, Z., Moore, I. N., O'Connel, P.E. and Jamieson, D.G. (2001). An interactive management system for operational control of Kirazdere reservoir (Turkey). Water resources management, 15, 223-234.

Regonda, Satish Kumar, Rajagopalan, Balaji, Clark, Martyn and Pitlick, John. (2005). Seasonal cycle shifts in hydroclimatology over the western United States. Journal of climate, 18(2), 372-384.

Regonda, Satish Kumar, Rajagopalan, Balaji, Clark, Martyn and Zagona, Edith. (2006). A multimodel ensemble forecast framework: Application to spring seasonal flows in the Gunnison River Basin. Water resources research, 42, WR004653.

Richardson, Clarence W. (1981). Stochastic simulation of daily precipitation, temperature, and solar radiation. Water resources research, 17(1), 182-190.

Risbey, James S. and Entekhabi, Dara. (1996). Observed Sacremento Basin streamflow response to precipitation and temperature changes and its relevance to climate impact studies. Journal of hydrology, 184, 209-223.

Roy, Luc, Brissette, François, Leconte, Robert and Marche, Claude. (2001). The impact of climate change on seasonal floods of a southern Quebec River Basin. Hydrological processes, 15, 3167-3179.

Salathé, Eric P. jr., Mote, Philip w. and Wiley, Matthew W. (2007). Review of scenario selection and downscaling methods for the assessment of climate change impacts on hydrology in the United States pacific northwest. International journal of climatology, 27, 1611-1621.

Schäfli, Bettina. (2005). "Quantification of modelling uncertainties in climate change impact studies on water resources : Application to a glacier-fed hydropower production system in the swiss Alps". École polytechnique fédérale de Lausanne, Lausanne.

Schmildli, Jürg, Frei, Christoph and Vidale, Pier Luigi. (2006). Downscaling from GCM precipitation: A benchmark for dynamical and statistical downscaling methods. International journal of climatology, 26, 679-689.

Semenov, Mikhail A., Brooks, Roger J., Barrow, Elaine M. and Richardson, Clarence W. (1998). Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. Climate research, 10, 95-107.

Shabalova, M.V., Van Deursen, W.P.A. and Buishand, T.A. (2003). Assessing future discharge of the river Rhine using regional climate model integrations and a hydrological model. Climate research, 23(223-246).

Sharma, Raj Hari and Shakya, Nanrenda Man. (2006). Hydrological changes and its impact on water resources of Bagmati watershed, Nepal. Journal of hydrology, 327, 315-322.

Simonovic, Sloboban P. and Li, Lanhai. (2003). Methodology for assessment of climate change impacts on large-scale flood protection system. Journal of water resources planning and management, 129(5), 361-371.

Simonovic, Sloboban P. and Li, Lanhai. (2004). Sensitivity of the Red river basin flood protection system to climate variability and change. Water resources management, 18, 89-110.

Singh, Pratap, Arora, Manohar and Goel, N.K. (2006). Effect of climate change on runoff of a glacierized himalayan basin. Hydrological processes, 20, 1979-1992.

Snover, Amy K., Hamlet, Alan F. and Lettenmaier, Dennis P. (2003). Climate change scenarios for water planning studies. Bulletin of the American Meteorological Society, 84(11), 1513-1518.

Soulis, Eric D., Kouwen, Nick, Pietroniro, A., Seglenieks, F.R., Snelgrove, K. R., Pellerin, Pierre, Shaw, D. W. and Martz, L. W. (2005). A framework for hydrological modelling in MAGS.: Canadian water resources association. 119-138 p.

Srikanthan, R. and McMahon, T.A. (2001). Stochastic generation of annual, monthly and daily climate data: A review. Hydrology & earth systems sciences, 5(4), 653-670.

St-Hilaire, André, Ouarda, T.B.M.J., Lachance, Marius, Bernard, Bobee, Gaudet, Jocelyn and Gignac, Claude. (2003). Assessment of the impact of meteorological network density on the estimation of basin precipitation and runoff: A case study. Hydrological processes, 17(18), 3561-3580.

Stewart, Iris T., Cayan, Daniel R. and Dettinger, Michael D. (2005). Changes toward earlier streamflow timing across western north america. Journal of climate, 18, 1136-1155.

Tapsoba, Dominique, Fortin, Vincent, Anctil, François and Haché, Mario. (2005). Apport de la technique du krigeage avec dérive externe pour une cartographie raisonnée de l'équivalent en eau de la neige: Application aux bassins de la rivière Gatineau. Canadian journal of civil engineering, 32, 289-297.

Turcotte, Richard, Fortin, Louis-Guillaume, Fortin, Vincent and Villeneuve, Jean-Pierre. (2007). Operational analysis of the spatial distribution and the temporal evolution of the snowpack water equivalent in southern Quebec, Canada Nordic hydrology, 38(3), 211-234.

Turgeon, André. (2005). Solving a stochastic reservoir management problem with multilag autocorrelated inflows. Water resources research, 41, W12414.

US Army corps of engineers. (2003). "HEC-ResSim". <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ressim/hecressim-hecressim.htm>, Page consultée le 2 février 2006

VanRheenen, Nathan T., Wood, Andrew W., Palmer, Richard N. and Lettenmaier, Dennis P. (2004). Potential implications of PCM climate change scenarios for Sacremento-San Joaquin river basin hydrology and water resources. Climatic Change, 62, 257-281.

Vicuna, Sebastian, Maurer, Edwin P., Joyce, Brian, Dracup, John A. and Purkey, David. (2007). The sensitivity of California water resources to climate change scenarios. Journal of the American water resources association, 43(2), 482-498.

Whitfield, Paul H. and Cannon, Alex J. (2000). Recent variation in climate and hydrology in Canada. Canadian water resources journal, 25(1), 19-65.

Wigmosta, Mark S., Nijssen, Bart and Storck, Pascal. (2002). The distributed hydrology soil vegetation model. In Vijay P. SinghDonald K. Frevert (Eds.), Mathematical models of small watershed hydrology and applicationspp. 950. Chelsea: Water resources publications.

Wurbs, Ralph A. (1993). Reservoir-system simulations and optimization models. Journal of water resources planning and management, 119(4), 455-472.

Xu, Chong-Yu and Singh, V. P. (2004). Review on regional water resources assessment models under stationary and changing climate. Water resources management, 18, 591-612.

Yao, H. and Georgakakos, Aris P. (2001). Assessement of Folsom lake response to historical and potential future climate scenarios: 2. Reservoir management. Journal of hydrology, 249, 176-196.

Yeh, William W-G. (1985). Reservoir management and operation models: a State-of-the-art review. Water resources research, 21(12), 1797-1818.