

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie civil

LA GESTION DES RÉSERVOIRS DU BASSIN
VERSANT DE LA RIVIÈRE DU LIÈVRE, QUÉBEC
(CANADA), DANS UN CONTEXTE DE
CHANGEMENTS CLIMATIQUES: IMPACTS ET
STRATÉGIES D'ADAPTATION

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie civil

Uriel Francisco HUARINGA ALVAREZ

Jury : Robert LECONTE (directeur)
Richard TURCOTTE (évaluateur externe)
Jay LACEY (rapporteur)

À mon épouse Sonia, à mes enfants : Emma-Prielle et Benjamin-Matteo

RÉSUMÉ

Dans le passé, des inondations dans des municipalités du bassin de la rivière du Lièvre et de la rivière des Mille-Îles, située en aval du bassin, se sont produites. Dans ce contexte, une étude sur l'impact et l'adaptation aux changements climatiques pour le bassin versant de la rivière du Lièvre, située au Québec (Canada) et en aval de celui-ci, a été réalisée. Une méthodologie pour limiter les inondations de la rivière des Mille-Îles a été testée. Cette méthodologie vise aussi à respecter les contraintes de niveau et de débits à soutirer dans les trois réservoirs à forte contenance du bassin de la rivière du Lièvre (Kiamika, Mitchinamecus et Poisson Blanc).

La méthodologie globale repose sur le couplage « MRCC-Modèle hydrologique-Modèle de gestion ». Premièrement, les projections climatiques (températures et précipitations) utilisées sont celles du modèle régional du climat canadien (MRCC), couplé au modèle de climat global canadien (MCGC). La simulation hydrologique a été réalisée avec le modèle hydrologique Hydrotel pour fournir les débits dans différents points du bassin versant à l'étude. Finalement, le modèle de gestion fait appel à un modèle d'optimisation non linéaire avec recours, qui optimise les débits à soutirer des réservoirs.

L'étude a été réalisée en utilisant un outil de gestion de réservoirs créé spécifiquement pour ce projet. L'outil est composé de projections hydrologiques d'ensemble, d'un modèle d'optimisation, d'un réseau de neurones, et d'un modèle de bilan d'eau. Les simulations des opérations ont été réalisées au pas de temps journalier en considérant trois scénarios climatiques (historique, de référence et futur). Les critères de performance de vulnérabilité et de fiabilité ont été utilisés pour évaluer la performance des réservoirs.

La réserve de crue est le volume d'eau à emmagasiner dans les réservoirs pendant les périodes de crue. L'analyse de la réserve de crue a été réalisée en évaluant la quantité d'eau qui pourrait être retenue dans les réservoirs du système hydrique de la rivière du Lièvre, pour atténuer les risques d'inondation de la rivière des Mille-Îles.

Mots-clés : Adaptation, changement climatique, système hydrique, système de gestion de réservoirs, hydrologie, optimisation.

REMERCIEMENTS

Premièrement, je voudrais exprimer toute ma gratitude envers mon directeur de recherche, Robert Leconte, qui m'a encouragé à suivre une maîtrise dans son domaine d'expertise et qui m'a accompagné tout au long de mes études à l'Université de Sherbrooke. Le fait d'avoir eu Robert comme directeur ne m'a pas seulement permis de côtoyer un bon professionnel mais aussi, d'apprendre à connaître une personne d'une qualité humaine exceptionnelle.

Ensuite, je voudrais remercier Mélanie Trudel et Didier Haguma qui m'ont offert leur soutien ainsi que de judicieux conseils. Je leur souhaite une bonne continuité dans leur cheminement professionnel. Merci au personnel du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) pour m'avoir fourni les données nécessaires pour l'accomplissement du projet.

Mon épouse a sans aucun doute été mon grand soutien pendant ma maîtrise. Merci Sonia, toi et nos enfants êtes mes beaux trésors. Je suis convaincu que, sans ton support, je n'aurais pas pu accomplir tous mes objectifs universitaires.

Merci aux étudiants du Groupe de recherche sur l'eau de l'Université de Sherbrooke (GRE AUS).

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	i
REMERCIEMENTS	iii
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	ix
LEXIQUE.....	xi
LISTE DES ACRONYMES.....	xiii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Mise en contexte et problématique.....	1
1.1.1 Mise en contexte	1
1.1.2 Problématique	2
1.2 Le système hydrique de la rivière du Lièvre.....	6
1.3 Définition du projet de recherche	9
1.4 Objectifs du projet de recherche.....	9
1.5 Contributions originales	10
1.6 Plan du document	11
CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART.....	13
2.1 La gestion des réservoirs	13
2.1.1 Les modèles hydrologiques	14
2.1.2 Les modèles de simulation des réservoirs.....	18
2.1.3 Les modèles d'optimisation.....	20
2.1.4 Les critères de performance.....	23
2.2 La gestion des réservoirs face aux changements climatiques.....	24
2.2.1 Les modèles climatiques.....	25
2.2.2 Mise à l'échelle.....	27
2.2.3 Méthodes de correction des biais.....	29
2.2.4 Impacts et adaptation des systèmes hydriques aux changements climatiques.....	30
CHAPITRE 3 ARTICLE.....	37
CHAPITRE 4 RÉSULTATS SUPPLÉMENTAIRES.....	59
4.1 Vulnérabilité et fiabilité des réservoirs.....	59
4.2 Volume retenu dans les réservoirs et volume enlevé en aval du système du Lièvre.....	60
4.2.1 Bilan hydrique.....	62
4.2.2 Volume stocké dans le système de la rivière du Lièvre.....	63
4.2.3 Distribution de volume dans les trois réservoirs.....	64
4.3 Adaptation	66
CHAPITRE 5 CONCLUSION.....	71
ANNEXE A – FIABILITÉ ET VULNÉRABILITÉ	75
ANNEXE B – VOLUME RETENU ET ENLEVÉ.....	83
ANNEXE C – INFLUENCE DU STOCKAGE DE L'EAU DANS LES RÉSERVOIRS DE LA RIVIÈRE DU LIÈVRE ET DU BARRAGE DU GRAND MOULIN SUR LE LAC DES DEUX MONTAGNES	89

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Localisation du bassin versant de la rivière du Lièvre.....	3
Figure 1.2 Divisions administratives du bassin versant de la rivière du Lièvre.....	5
Figure 1.3 Contraintes annuelles de niveau et niveaux typiques.....	7
Figure 1.4 Bassin de la rivière du Lièvre et l’archipel de Montréal.....	8
Figure 1.5 Étapes du projet.....	10
Figure 3.1 a) Location of the Lièvre River watershed inside the Ottawa River watershed, b) location of the reservoirs, c) schematic diagram of the water resources system, d) Montreal Archipelago	42
Figure 3.2 Structure of the reservoir management tool.....	43
Figure 3.3 Minimum and maximum temperatures and monthly average precipitation for the Lièvre River Watershed.....	49
Figure 3.4 Simulation of inflows at the three reservoirs using five CRCM members. Bold lines correspond to average inflows and thin lines to minimum and maximum inflows.....	50
Figure 3.5 Simulation of average water levels in three reservoirs and in Deux Montagnes Lake. Bold lines correspond to average inflows and thin lines to minimum and maximum inflows. Upper and lower reservoir water level constraints as imposed by the CEHQ are also shown in Figure 3.5 a-c	52
Figure 3.6 Volume stored as a result of limiting floods in the Montreal Archipelago, with a 30% maximum flow reduction under the current climate (1990-1999) and future climate (2059-2068).	53
Figure 3.7 Adaptation strategies to CC. a) reference simulation; b) simulations with a three-week shift of summer water level constraints; c) same as panel b except keeping the end of the summer minimum water level constraint identical to the reference simulation; and d) same as panel c but without the flood reserve constraint.....	55
Figure 4.1 Niveau Poisson Blanc en utilisant 30%, 50 % et 100 % de la RDM et sans rétroaction. Membre 1 MRCC. Futur (2063).	63
Figure 4.2 Volume stocké dans les réservoirs de la rivière du Lièvre.....	64
Figure 4.3 Distribution de volume sur le système hydrique de la rivière du Lièvre	65
Figure 4.4 Décalage temporel des contraintes de niveau. Membre 3 MRCC. Kiamika	67
Figure 4.5 Décalage temporel des contraintes de niveau. Membre 3 MRCC. Mitchinamecus.....	68

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Modèles climatiques globaux.	26
Tableau 4.1 Résumé de la fiabilité et de la vulnérabilité annuelle des réservoirs de la rivière du Lièvre.....	59
Tableau 4.2 Volume retenu dans les réservoirs et volume enlevé en aval du système du Lièvre	61
Tableau 4.3 Vérification du bilan hydrique.....	62
Tableau 4.4 Fiabilité moyenne pendant 10 années. Kiamika et Mitchinamecus.	68
Tableau 4.5 Vulnérabilité maximale pendant 10 années. Kiamika et Mitchinamecus.....	69

LEXIQUE

Terme technique	Définition
Réduction du débit maximale (RDM)	La « RDM » est la différence entre le débit total de sortie du lac des Deux-Montagnes sous des conditions d'écoulement contrôlé et non contrôlé à l'entrée de la rivière des Mille-Îles.
Rétroaction	La « rétroaction » est l'action de réaliser une nouvelle optimisation de réservoirs de la rivière du Lièvre car le débit maximal de la rivière des Mille-Îles a été atteint. Le but est de stocker de l'eau sur les réservoirs en limitant les inondations dans l'Archipel de Montréal. Elle peut être appliquée en utilisant un pourcentage de la RDM.

LISTE DES ACRONYMES

Acronyme	Définition
CC	Changement climatique
CRRO	Commission sur la Régularisation de la Rivière des Outaouais
CEHQ	Centre d'expertise hydrique du Québec
ESP	<i>Ensemble streamflow prediction</i>
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GES	Gaz à effet de serre
HEC-HMS	<i>Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System</i>
HEC-ResSim	<i>Hydrologic Engineering Center Reservoir System Simulation</i>
INFORM DSS	<i>Integrated Forecast and Reservoir Management Decision Support System</i>
INRS-ETE	Institut national de recherche scientifique, Eau, Terre et Environnement
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IRMS	<i>Integrated Reservoir Management System</i>
masl	<i>Meters above sea level</i>
MDDEFP	Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs
MRCC	Modèle régional de climat canadien
MCG	Modèle climatique global
SAD	Système d'aide à la décision
SIG	Système d'information géographique
SDSM	<i>Statistical Downscaling Model</i>
SRES	<i>Special report on emissions scenarios</i>
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
UHRH	Unité hydrologique relativement homogène
URH	Unité de réponse hydrologique
USACE	<i>US Army Corps of Engineers</i>

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte et problématique

1.1.1 Mise en contexte

Le réchauffement de la terre, produit par les gaz à effet de serre (GES), amènera un changement du comportement hydrologique des bassins versants. Les changements climatiques peuvent altérer les conditions hydrologiques et il peut en découler une variété d'impacts possibles dans les systèmes hydriques [Simonovic et Li, 2004]. Les deux plus importantes variables qui influencent le comportement hydrologique sont la température et la précipitation. Les changements climatiques se manifestent par la modification de la tendance et de la variabilité de ces deux variables au fil des ans.

Il est d'un grand intérêt pour les gestionnaires des barrages, les producteurs d'énergie électrique, les firmes de génie-conseil et la sécurité civile, entre autres, de connaître l'évolution anticipée des changements climatiques. Par exemple, les gestionnaires de barrages devront gérer leurs installations de manière à limiter les inondations en amont et en aval des barrages, dans un contexte où le régime hydrologique sera de plus en plus variable et incertain. Les entreprises hydroélectriques voudront savoir si la gestion future des ressources hydriques sera rentable. Les firmes de génie-conseil devront dimensionner les structures en tenant compte des changements futurs du comportement hydrologique. De nombreux critères de conception devront être développés ou adaptés à la réalité des changements climatiques.

Les études sur l'impact et l'adaptation aux changements climatiques sont très importantes. À titre d'exemple, la conception des infrastructures de drainage utilisant des données météorologiques passées résultera presque certainement en infrastructures qui ne performeront pas comme prévu dans un futur rapproché [Brissette et al., 2007].

Dans ce projet de recherche, l'impact et l'adaptation de la gestion du système hydrique de la rivière du Lièvre, un affluent de la rivière des Outaouais, au sud-ouest du Québec, seront analysés dans le contexte des changements climatiques.

1.1.2 Problématique

En accord avec le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) [IPCC 2007a) le changement climatique produira des modifications de la température et des précipitations partout dans le monde. En raison de ces modifications, le régime hydrologique des bassins versants sera donc altéré dans un avenir prochain. Conséquemment, la gestion des réservoirs devra s'adapter à ces conditions climatiques

Pour débiter, on sait que les réservoirs présentent plusieurs objectifs conflictuels tels que la prévention des inondations, la production d'énergie électrique, l'approvisionnement de l'eau, etc. Un autre facteur qui complexifie la gestion de l'eau est qu'un réservoir fait fréquemment partie d'un système de plusieurs réservoirs. Les réservoirs en amont déterminent grandement les débits entrant vers les réservoirs en aval, une évaluation intégrale de l'opération de ces systèmes s'avère donc nécessaire.

Présentement, il y a beaucoup d'intérêt de la part de la communauté scientifique pour optimiser la gestion des réservoirs [Labadie, 2004]. L'optimisation des réservoirs peut être très compliquée en termes de temps de calcul, surtout s'il s'agit de systèmes comportant plusieurs réservoirs. Dans l'étude réalisée par Vonk et al., [2014], celui-ci mentionne qu'une nouvelle génération de techniques de calcul très efficaces ont été développées telles que les algorithmes métaheuristiques. Ces algorithmes ont été appliqués avec succès aux systèmes de réservoirs, ce qui s'est traduit par des règles de gestion améliorées par rapport à celles qui sont utilisées présentement [Chang et Chang, 2009; Ostadrahimi et al., 2012].

La gestion des réservoirs est un sujet qui implique plusieurs intervenants qui doivent travailler en étroite collaboration pour l'accomplissement de leurs objectifs. Ainsi, plusieurs études récentes ont évalué les impacts des changements climatiques sur la gestion des réservoirs [Christensen *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2010; Raje et Mujumdar, 2010; Vicuña *et al.*, 2011; Minville *et al.* 2010a]. Cependant, peu de ces études ont évalué des stratégies d'adaptation de la gestion des réservoirs en optimisant les règles de gestion [Eum *et al.*, 2012]. L'importance d'une gestion adaptée a été clairement démontrée dans les études de Georgakakos *et al.* [2012] et Vicuña et al. [2010]. Ce travail de recherche vise à combler cette lacune en utilisant un outil de gestion des réservoirs qui aide à adapter les règles de gestion au climat futur. Cet outil

facilitera la prise de décisions par les gestionnaires des réservoirs du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), lors de leur travail pour une bonne gestion du système hydrique à l'étude.

Notons tout d'abord que le CEHQ est une unité administrative du Ministère du Développement Durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP). Il gère plusieurs barrages dans la province de Québec. Un de ses objectifs est de limiter des inondations en aval et en amont des barrages tout en respectant diverses contraintes liées, par exemple, aux activités récréotouristiques, à l'approvisionnement en eau potable et à la production hydroélectrique. Le CEHQ, de concert avec la Commission sur la Régularisation de la Rivière des Outaouais (CRRO), est intéressé par l'étude des impacts et l'adaptation au changement climatique sur le système hydrique de la rivière du Lièvre. Le bassin de cette rivière a une superficie de 9 542 km² et constitue une partie du bassin versant de la rivière des Outaouais, dont la superficie est de 144 000 km². La Figure 1.1 montre la localisation du bassin de la rivière du Lièvre. Débutant dans le lac Orthès, la rivière du Lièvre coule sur une distance de 330 km. Ses eaux se déversent dans la rivière des Outaouais, à la hauteur du secteur Masson-Angers de la ville de Gatineau. Le dénivelé total est de 350 mètres.

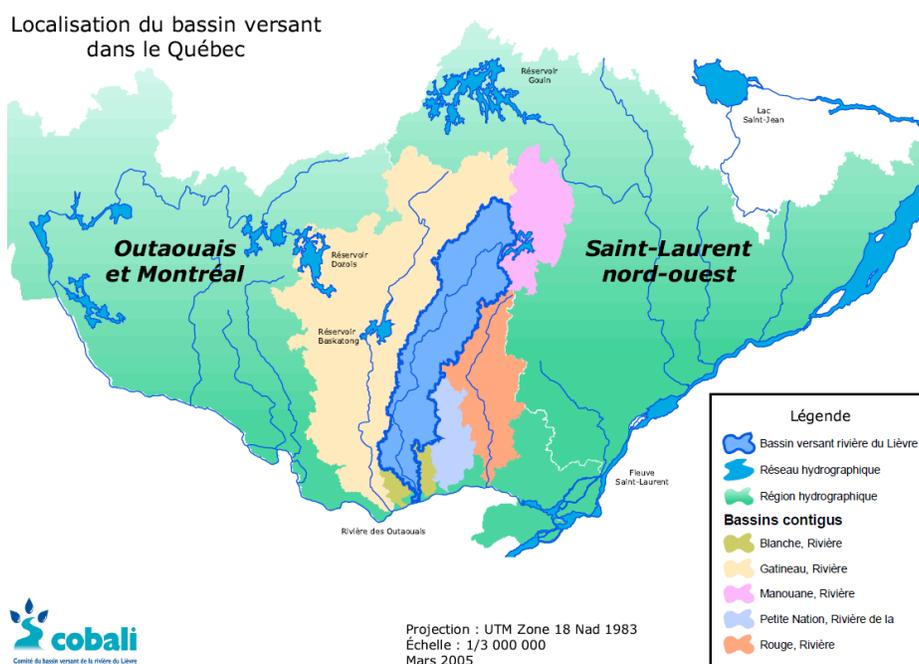


Figure 1.1 Localisation du bassin versant de la rivière du Lièvre

<http://www.cobali.org/documents.php#portraitzgiebv>

Trois réservoirs de forte contenance aident la gestion des ressources hydriques dans le bassin de la rivière du Lièvre : Kiamika, Mitchinamecus et Poisson Blanc. Présentement, ces barrages sont régis par l'expertise du gestionnaire, soit le CEHQ, en tenant compte des données historiques. La gestion de ces réservoirs n'est actuellement pas associée à un outil mathématique d'optimisation des prises de décision.

Dans le passé, des inondations ont eu lieu dans le bassin à l'étude, spécifiquement dans les municipalités de Ferme-Neuve et Chute-Saint-Philippe. Pour cette raison, pendant les périodes de crues, le but principal est de limiter les inondations, tout en assurant la production hydroélectrique et en respectant le mieux possible les activités récréotouristiques, la villégiature, la protection de la faune et la navigabilité. La Figure 1.2 montre les divisions administratives du bassin de la rivière du Lièvre.

De plus, la rivière des Mille-Îles, localisée dans l'archipel de Montréal, est principalement alimentée par la rivière des Outaouais. Or, cette rivière a subi régulièrement des inondations dans le passé. Le barrage du Grand-Moulin a été construit en 1985 pour atténuer ce problème, en limitant le débit maximum à l'entrée de la rivière des Mille-Îles à $780 \text{ m}^3/\text{s}$. Cependant, la construction de ce barrage a occasionné l'augmentation du niveau de l'eau du lac des Deux Montagnes. Du fait que l'embouchure de la rivière du Lièvre est située relativement près de la rivière des Mille-Îles, la capacité de stockage de ses réservoirs peut être utilisée pour exercer un certain contrôle, si nécessaire, sur les débits, afin de réduire l'ampleur des inondations dans l'archipel de Montréal. Des soutirages aux réservoirs du système hydrique de la rivière du Lièvre doivent être déterminés pour tenter de satisfaire les différents usagers de l'eau dans le bassin de la rivière du Lièvre, et aussi en aval. Ces enjeux justifient l'étude d'outils d'optimisation de la gestion.

Le bassin de la rivière des Outaouais compte 30 réservoirs majeurs et plus de 45 centrales hydroélectriques. Dans ce contexte, le projet de la rivière du Lièvre est considéré comme une première étape dans le développement et le test d'outils d'aide à la gestion du bassin versant de la rivière des Outaouais.

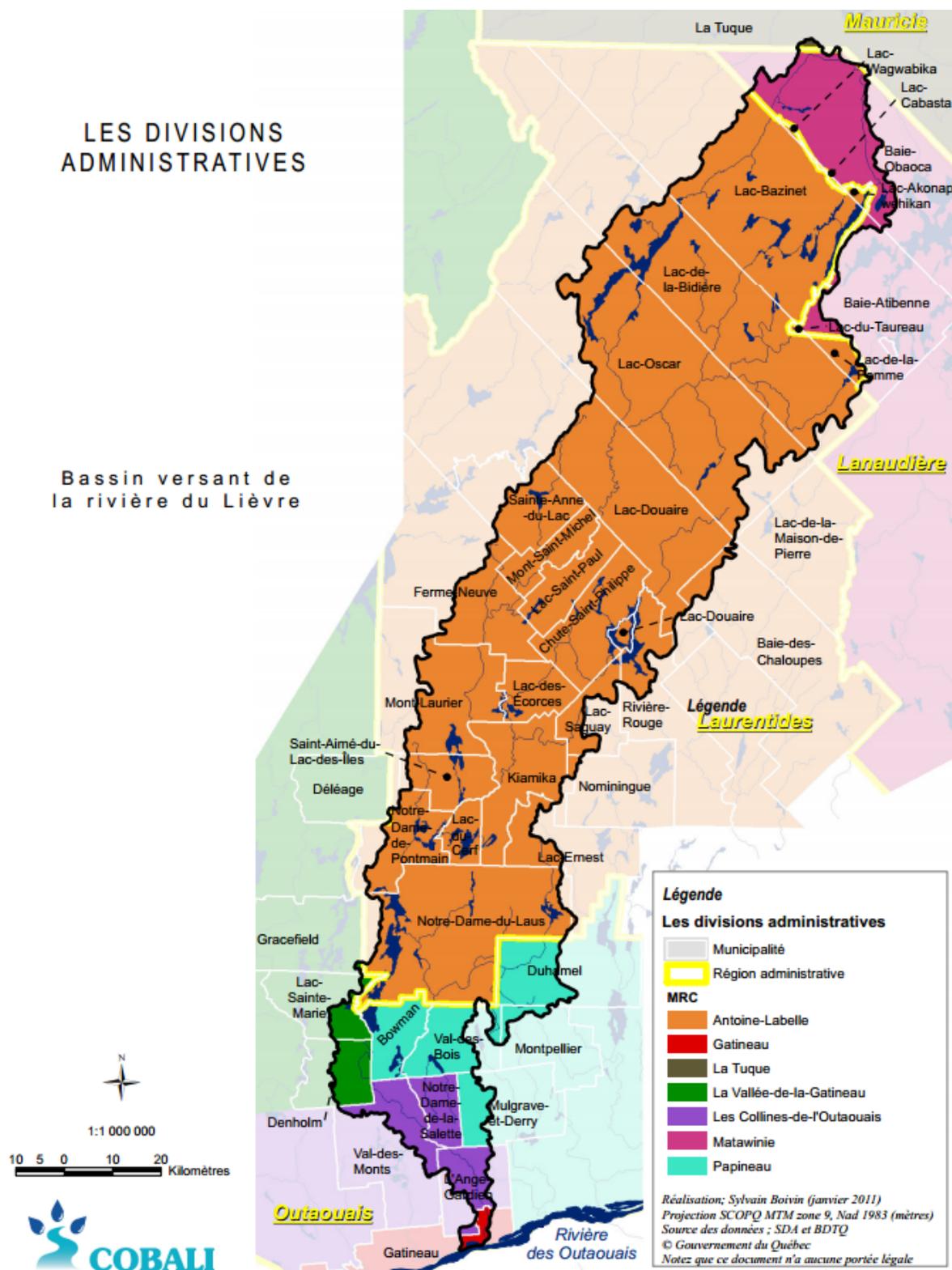


Figure 1.2 Divisions administratives du bassin versant de la rivière du Lièvre

http://www.cobali.org/repertoire_cartographique.php

1.2 Le système hydrique de la rivière du Lièvre.

Le système hydrique de la rivière du Lièvre est composé de trois réservoirs à forte contenance, soient les réservoirs du Poisson Blanc, Mitchinamecus et Kiamika. Les réservoirs de tête, soient Mitchinamecus et Kiamika, possèdent un volume de stockage de 533 et 435 hm³, respectivement. Le volume de stockage du réservoir du Poisson Blanc, dont le barrage est situé à une distance de 66 km de l'embouchure de la rivière du Lièvre, est de 910 hm³.

Le CEHQ est le propriétaire et le gestionnaire de ces trois réservoirs. Des contraintes sur les niveaux d'eau et sur les soutirages sont imposées pour aider au contrôle des inondations sur le territoire, considéré comme étant un usage prioritaire des réservoirs. D'autres contraintes sont également imposées et respectées, dans la mesure du possible, pour favoriser les activités récréotouristiques et pour la production hydroélectrique de la compagnie Brookfield, dont les barrages au fil de l'eau sont situés en aval du réservoir Poisson Blanc. Les contraintes des débits soutirés utilisées dans ce projet pour les trois réservoirs sont présentées au Tableau 1. 1. La Figure 1.3 présente les contraintes annuelles de niveau, inférieur et supérieur et le niveau typique des trois réservoirs du système hydrique de la rivière du Lièvre.

Selon la liste de barrages du CEHQ, le réservoir en aval du réservoir de Poisson Blanc qui sert, entre autres, à la production d'énergie électrique de la centrale High Falls, est le réservoir de l'Escalier. La capacité de rétention du barrage l'Escalier est de 599 hm³. La fonction principale de ce barrage est le stockage de l'eau pour la production d'énergie électrique, mais il sert aussi aux activités récréotouristiques et à la villégiature. Ce barrage appartient à la compagnie Énergie renouvelable Brookfield. Étant donné que cet ouvrage n'est pas géré par le CEHQ, on ne tient pas compte de lui dans cette étude. De plus, le modèle d'optimisation développé pour cette étude ne peut tenir compte que des trois réservoirs mentionnés précédemment. Le fait d'incorporer un quatrième réservoir dans cette étude obligerait l'utilisation d'un modèle d'optimisation différente de celui utilisé pour ce projet. Un tel modèle prendrait beaucoup plus de temps de calcul. Dans l'hypothèse d'une inclusion de ce réservoir dans le modèle de gestion de réservoirs, notons qu'il ne pourrait pas aider beaucoup au stockage de l'eau pour limiter les inondations dans l'archipel de Montréal, car sa marge de manœuvre est restreinte. Contrairement à celle des autres réservoirs en amont, la marge de manœuvre de ce réservoir est limitée à un niveau minimal d'exploitation de 189.35 m et à un

niveau d'exploitation normale de 189.8m. Le fait d'opérer le plan d'eau à des niveaux qui varient beaucoup cause des désagréments aux riverains et affecte la végétation riveraine pouvant ainsi influencer sur le taux d'érosion des berges.

Tableau 1. 1 Contraintes annuelles de débits

CONTRAINTES DE DÉBITS DANS LES RÉSERVOIRS (m ³ /s)		
Réservoirs	Débit minimum	Débit maximum
Kiamika	1	30
Mitchinamecus	5	65
Poisson Blanc	31	400

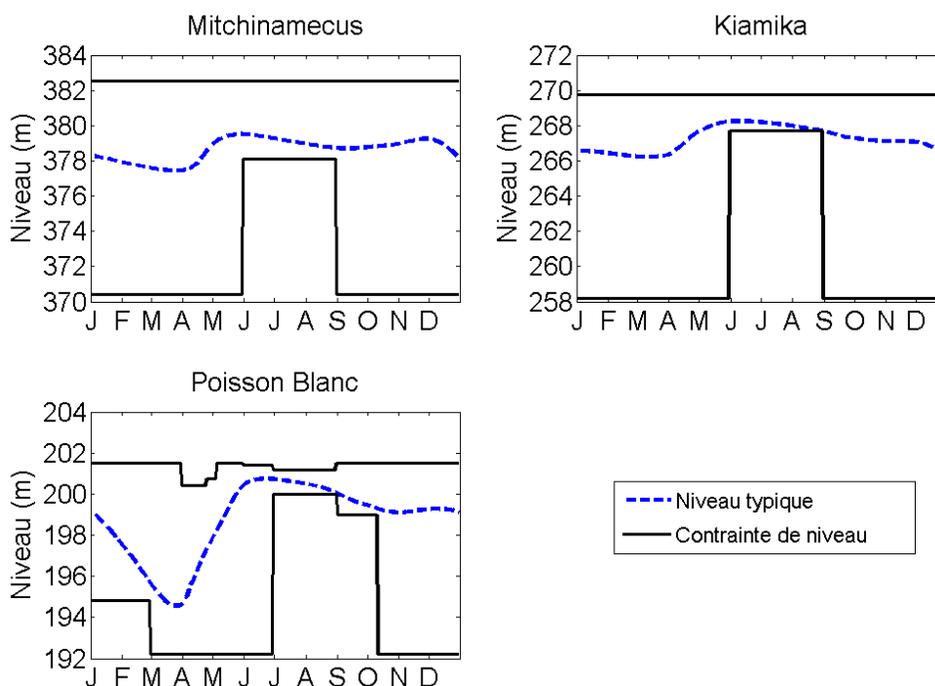


Figure 1.3 Contraintes annuelles de niveau et niveaux typiques

Le CEHQ, en lien avec la Commission de régularisation de la rivière des Outaouais alloue également une « réserve de crue » dans le réservoir du Poisson Blanc pour stocker temporairement de l'eau, si nécessaire, pour aider au contrôle des inondations dans le secteur de l'archipel de Montréal. Cette réserve de crue prend la forme d'un abaissement de la contrainte de niveau durant le mois d'avril, voir la Figure 1.3. La Figure 1.4 présente la localisation du bassin versant de la rivière du Lièvre par rapport à l'archipel de Montréal ainsi

que les trois réservoirs de la rivière du Lièvre. Comme on peut le constater à la Figure 1.4, la distance séparant l'exutoire de la rivière du Lièvre du secteur de l'archipel de Montréal est relativement courte, soit environ 125 km jusqu'à l'entrée du Lac des Deux Montagnes qui constitue la limite ouest du secteur de l'archipel. Le temps de parcours d'une onde de crue est donc faible, de l'ordre de la journée en période de crue, et les effets d'un stockage temporaire de l'eau dans les trois réservoirs du système hydrique de la rivière du Lièvre se font ressentir rapidement pour aider à contrôler les inondations dans le secteur de l'archipel de Montréal.



Figure 1.4 Bassin de la rivière du Lièvre et l'archipel de Montréal.

Le lac des Deux Montagnes est alimenté par la rivière des Outaouais. Les sorties du lac incluent la rivière des Mille-Îles, la rivière des Prairies et l'écoulement du lac des Deux Montagnes vers le lac Saint-Louis, par les chenaux de Vaudreuil et Sainte-Anne-de-Bellevue. Les eaux du fleuve Saint-Laurent ne pénètrent pas dans le lac des Deux Montagnes, sauf en de rares occasions où il y a inversion de l'écoulement du lac Saint-Louis vers le lac des Deux

Montagnes. Des quatre exutoires du lac des Deux Montagnes, celui qui alimente la rivière des Mille-Îles possède la plus petite capacité d'évacuation, avec 15 % de la capacité totale en période de crues, contre 2 à 4 % en période d'étiage sévère.

1.3 Définition du projet de recherche

Étant donné que les changements climatiques entraîneront des changements aux régimes hydrologiques dans les bassins versants de la planète, des études sur l'impact et sur l'adaptation de la gestion des eaux des bassins versants sont nécessaires pour bien gérer la ressource en eau. Les buts de la gestion des réservoirs sont, entre autres, de limiter les inondations et les étiages et de maintenir le niveau de l'eau pour les activités récréotouristiques. L'étude de l'impact et l'adaptation aux changements climatiques du bassin de la rivière du Lièvre, en utilisant un outil de gestion de réservoirs, s'avère très importante pour aider les gestionnaires de la ressource en eau à prendre des décisions éclairées dans la planification de la gestion des réservoirs.

Le projet de recherche vise à déterminer si les changements climatiques modifieront la gestion des réservoirs du bassin de la rivière du Lièvre et à établir des mesures d'adaptation appropriées, le cas échéant. L'implantation d'une stratégie de stockage d'eau dans les réservoirs pour limiter les inondations dans l'archipel de Montréal est une stratégie complémentaire à intégrer dans l'analyse.

1.4 Objectifs du projet de recherche

Le principal objectif de ce projet de recherche est l'évaluation des impacts et du potentiel d'adaptation aux changements climatiques du système hydrique de la rivière du Lièvre, tout en limitant les inondations dans l'archipel de Montréal et en utilisant un outil de gestion des réservoirs. Les critères de performance (fiabilité et vulnérabilité) aideront à évaluer la gestion des réservoirs et leur capacité à respecter différentes contraintes du système hydrique, tels que les niveaux maximums d'exploitation des réservoirs.

Pour réaliser cet objectif, il est nécessaire de franchir certaines étapes préalables telles que l'établissement des projections hydrologiques, la simulation hydrologique et la simulation des opérations du système hydrique. Ces étapes, ainsi que les outils utilisés, sont présentés à la Figure 1.5.

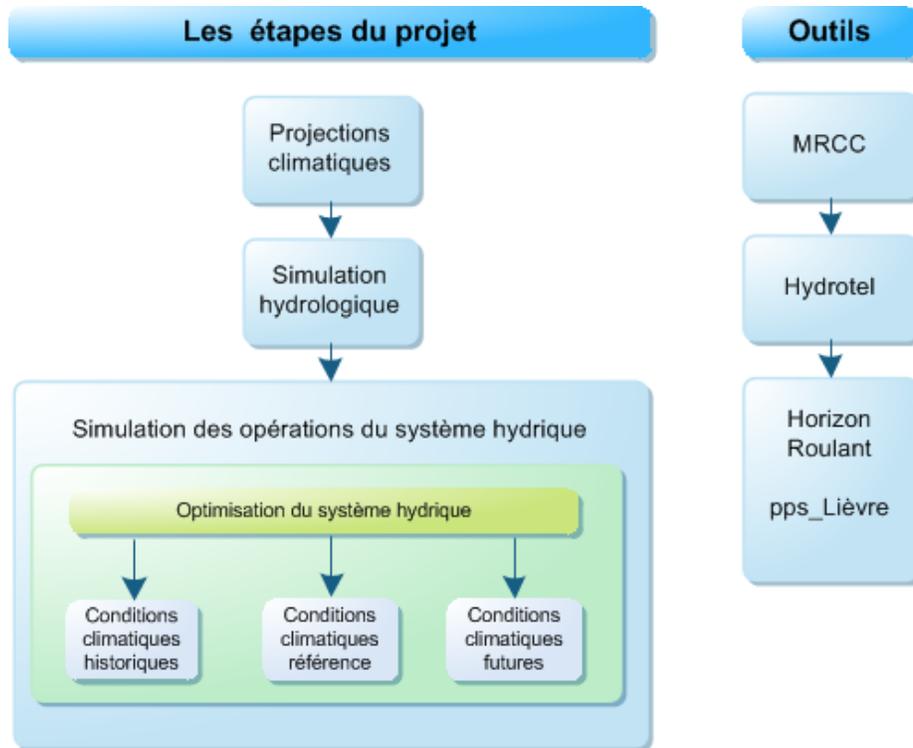


Figure 1.5 Étapes du projet

Dans un passé récent, des inondations se sont produites dans le bassin à l'étude. Il est presque certain que la fréquence et la magnitude des inondations augmenteront dans le futur en raison des changements climatiques [CEHQ, 2013]. L'étude des moyens d'adaptation aux changements climatiques des bassins versants constitue une contribution pour minimiser la probabilité de manifestation de ces événements néfastes. Cette étude aidera les recherches futures à faire face aux problèmes relatifs à la gestion de ressources hydriques causés par les changements climatiques.

1.5 Contributions originales

Ainsi, la contribution originale de cette étude est d'évaluer des stratégies d'adaptation aux changements climatiques de la gestion de réservoirs optimisant les règles de gestion. La plupart des études à ce sujet évaluent les impacts des changements climatiques sur la gestion des réservoirs. Cependant, ces études sont peu nombreuses. En plus, elles se concentrent plutôt sur la gestion de l'eau à l'intérieur du bassin en étude, alors que la nôtre se concentre sur les problèmes de gestion de l'eau (par exemple: les inondations), à l'intérieur et aussi en amont, du bassin étudié. L'outil de gestion de réservoirs utilisé intègre: une prévision

hydrologique d'ensemble: un modèle d'optimisation stochastique; un modèle de réseau neuronal et un modèle de bilan hydrique. Ci-dessous, les principales caractéristiques de l'originalité de cette étude sont mentionnées:

- L'utilisation d'un réseau de neurones pour simuler la gestion du bassin de la rivière des Outaouais.
- L'adaptation de notre modèle d'optimisation pour modifier récursivement les débits soutirés, afin de limiter les inondations en aval du bassin en étude.
- La simplification d'un modèle du bilan d'eau de l'archipel de Montréal, à partir du modèle original fourni par le CEHQ.
- Une évaluation de la capacité théorique du système hydrique de la rivière du Lièvre à gérer les inondations dans le bassin versant et en aval de celui-ci, sous des conditions actuelles et projetées de climat.
- La détermination de stratégies prometteuses d'atténuation des impacts des changements climatiques sur la gestion du système hydrique de la rivière du Lièvre.

1.6 Plan du document

Le chapitre 2 présente l'état de l'art pour cette étude. Il est divisé en deux parties principales, l'une portant sur la gestion des réservoirs et l'autre, sur la gestion de réservoirs dans le cadre des changements climatiques. Le chapitre 3 présente l'article scientifique qui découle de cette étude. Le chapitre 4 présente des résultats supplémentaires. Finalement, le chapitre 5 présente les conclusions de cette étude.

CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART

2.1 La gestion des réservoirs

Depuis plusieurs années, les rivières ont été des sources de production d'hydroélectricité, de transport, de divertissement, d'eau pour la vie animale et humaine et son habitat. Il existe plusieurs usages de l'eau douce dans tous les réseaux hydriques de la planète. En plus, les humains disposent de sources de dilution pour des produits rejetés tels que les eaux rejetées par les usines des traitements d'eaux usées. Les terres à proximité des rivières ont été utilisées pour l'agriculture, l'établissement d'industries, la construction de chemins, de résidences ou le développement de centres de récréation [Loucks et Van Beek, 2005].

Les gestionnaires de barrages sont responsables de la gestion des ressources en eau. Ils doivent, dans la mesure du possible, atteindre des objectifs spécifiques pour chacun des utilisateurs. Par exemple, il faut que les gestionnaires soutirent la quantité d'eau nécessaire des réservoirs pour maintenir un niveau d'eau spécifique en amont et en aval du réservoir, ainsi que pour la production d'hydroélectricité. Réaliser cette tâche peut devenir complexe en raison des objectifs souvent conflictuels des différents usages. Ainsi, la gestion des réservoirs est une activité qui vise à prendre des décisions de compromis entre les différents objectifs de gestion.

Hydro-Québec définit un système hydrique comme étant « un ensemble constitué par un cours d'eau, ou plusieurs cours d'eau reliés entre eux, et les ouvrages de génie civil qui y sont mis en place en vue d'agir sur les apports naturels en eau pour des fins d'utilisation ou de régulation d'eau » [Hydro-Québec, 1991]. La principale façon de prédire le comportement d'un système hydrique est de modéliser son comportement. Les modèles mathématiques sont les plus importants outils pour prédire ce comportement. Depuis les trente dernières années, beaucoup de progrès ont été réalisés pour réaliser des modélisations économiques, écologiques, hydrologiques et aussi d'impacts politiques et institutionnels des systèmes hydriques complexes [Loucks et Van Beek, 2005].

Pour ce qui est de ce projet de recherche, trois modèles mathématiques ont été utilisés: un modèle hydrologique, un modèle de simulation d'opérations des réservoirs et un modèle d'optimisation. Le modèle hydrologique sert à estimer les débits dans le bassin versant à

l'étude. Le modèle de simulation sert à estimer les niveaux d'eau dans les réservoirs. Le modèle d'optimisation permet de connaître des débits à soutirer aux barrages de régulation pour optimiser l'atteinte des objectifs préétablis.

2.1.1 Les modèles hydrologiques

L'origine de la modélisation hydrologique date du développement du génie civil au 19^e siècle pour réaliser le design de routes, de canaux, d'égouts de la ville, de systèmes de drainage, de barrages, de ponceaux, de ponts et de systèmes d'approvisionnement d'eau [Singh et Woolhiser, 2002]. L'objet d'étude des modèles hydrologiques est le bassin versant. Le but des modèles, qui sont une représentation simplifiée du bassin versant, est de simuler les débits qui se produisent dans le bassin. Il convient de noter qu'il existe presque autant de classifications de modèles hydrologiques que d'hydrologues [Perrin, 2000] et conséquemment, de nombreux modèles existent actuellement.

La plupart des modèles hydrologiques actuels possèdent la capacité de simuler raisonnablement l'hydrologie des bassins versants et peuvent être appliqués pour traiter un large éventail de problèmes environnementaux et de ressources hydriques. Le champ d'application des modèles mathématiques est en croissance, et ceux-ci sont capables, non seulement de simuler la quantité d'eau, mais aussi sa qualité. Pour ce qui est de la gestion des systèmes hydriques, les modèles hydrologiques deviennent intégrés dans des systèmes de gestion dont la mission est plus étendue. En effet, elle englobe plusieurs domaines disciplinaires. La technologie de collecte de données, le stockage, l'extraction, le traitement et la gestion se sont améliorés considérablement ces dernières années. Conjointement avec les prouesses de calcul, cette technologie a considérablement contribué au développement des modèles des bassins versants distribués [Singh et Woolhiser, 2002]. Les modèles hydrologiques HEC-HMS, SWAT et Hydrotel sont décrits succinctement dans les paragraphes suivants.

- HEC-HMS

Le modèle hydrologique distribué HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) a été développé par l'*Hydrologic Engineering Center* (HEC) du « *US Army Corps of Engineers* » (USACE) [HEC-HMS, 2000]. HEC-HMS simule les processus de précipitation-ruissellement des bassins versants et permet de subdiviser un bassin versant en plusieurs parties, appelées sous-bassins, qui sont considérés comme ayant chacune des caractéristiques homogènes. Il est conçu pour résoudre des problèmes tels que l'approvisionnement en eau dans les grands bassins, l'hydrologie des crues et le ruissellement sur de petits bassins naturels ou plus rarement, sur de petits bassins urbains [Scharffenberg et Fleming, 2010]. Les hydrogrammes produits par le modèle sont utilisés directement ou avec d'autres programmes pour réaliser des études, entre autres, de disponibilité d'eau, de drainage urbain, de prévision des débits, d'impact du développement urbain futur et de conception de déversoir des réservoirs. Le modèle est capable de représenter de nombreux bassins versants différents. Une représentation du bassin est construite en séparant le cycle hydrologique en éléments hydrologiques (sous-bassins, rivières, réservoirs, etc.). Le programme dispose d'un environnement de travail entièrement intégré, y compris une base de données, les outils de saisie de données, le moteur de calcul, et les outils de présentation des résultats [Scharffenberg et Fleming, 2010].

- SWAT

Soil and Water Assessment Tool (SWAT) est un modèle du domaine public développé par des chercheurs de l'*USDA-Agricultural Research Service*, de l'*USDA-Natural Resources Conservation Service* et de l'Université du *Texas A&M*. Le modèle SWAT prédit les impacts des conditions météorologiques, des sols, de l'utilisation de terres, de la gestion d'eau, de la pollution et de l'érosion des sols, entre autres [ArcGIS Ressources, 2012], sur la quantité et la qualité de l'eau.

Le modèle hydrologique SWAT permet de simuler différents processus physiques d'un bassin versant. Pour réaliser la modélisation, le bassin peut être divisé en sous-bassins. L'utilisation des sous-bassins est bénéfique lorsque le sol possède des propriétés différentes. Les intrants pour les sous-bassins sont les données météorologiques et physiographiques. Les principaux éléments qui composent les sous-bassins sont : les unités de réponse hydrologique (URH) et le

cours d'eau principal qui draine des sous-bassins. Les URH sont les zones terrestres regroupées à l'intérieur des sous-bassins qui sont composées d'une couverture terrestre unique. La simulation de l'hydrologie d'un bassin peut être séparée en deux phases. La première est la ***phase de production*** du cycle hydrologique. Cette phase contrôle la quantité d'eau, de sédiments, de nutriments et de pesticides vers le cours d'eau principal, dans chaque sous-bassin. La deuxième est la ***phase de transfert*** du cycle hydrologique; elle peut être définie comme le mouvement de l'eau, de sédiments, etc. à partir du réseau hydrographique du bassin vers l'exutoire [Neitsch *et al.*, 2011].

- HYDROTEL

Le modèle Hydrotel [Fortin *et al.*, 2001] a été créé par l'Institut national de recherche scientifique, Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE) de Québec. Il est divisé en deux logiciels programmés en C++, le logiciel Hydrotel et le logiciel Physitel. Il est compatible avec les données de télédétection et avec les systèmes d'information géographique (SIG). Le logiciel Hydrotel est un modèle hydrologique distribué. Il peut simuler plusieurs variables hydrologiques telles que la couverture de neige, l'humidité du sol, etc. Ce modèle peut simuler des débits aux bassins s'échelonnant de petits jusqu'à très grands. Le bilan hydrologique se réalise dans les unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH). Le drainage de ces UHRH est dérivé d'un modèle numérique d'altitude (MNA). Le logiciel Physitel est un logiciel qui sert à préparer la base de données des caractéristiques des bassins versants, requise par Hydrotel, telles que l'altitude, l'occupation des sols, les pentes et les types de sols, entre autres [INRS, 2000].

Les simulations peuvent se réaliser avec un pas de temps de 1 à 24 heures. Hydrotel offre l'avantage de pouvoir être utilisé même avec un minimum de données météorologiques. Il s'adapte à la quantité de données disponibles. Donc, il est possible de choisir les équations à utiliser en fonction de la disponibilité des données.

Hydrotel réalise la simulation des variables hydrologiques à travers 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 par le réseau hydrographique [Manuel d'Hydrotel, 2011]

L'interpolation des données météorologiques est le processus par lequel les données mesurées aux stations sont interpolées sur chacune des unités de calcul. Les données sont : la précipitation, la température, l'humidité relative, etc. Pour réaliser l'interpolation, les algorithmes du polygone de Thiessen et la moyenne pondérée aux trois stations météorologiques les plus rapprochées sont disponibles.

L'évolution du couvert nival est le sous-modèle qui simule l'accumulation et la fonte des précipitations solides. La simulation est réalisée avec un algorithme basé sur une méthode mixte degré-jours et bilan énergétique.

L'évapotranspiration potentielle se réalise avec une des cinq méthodes de calcul intégrée dans Hydrotel. Les méthodes sont : Thornthwaite (1948), Hydro-Québec, Linacre (1977), Penman-Monteith (Monteith, 1965) et Priestley-Taylor (1972). La méthode qui requiert le plus d'informations est la méthode de Penman, les méthodes d'Hydro-Québec et Thornthwaite en exigeant moins.

Le bilan d'eau vertical est le processus qui sépare les eaux en deux composantes principales. Il s'agit du ruissellement sur la surface et les eaux qui s'infiltrent. Hydrotel compte sur le bilan vertical dans une colonne de sol subdivisés en trois couches (BV3C). Dans le sous-modèle BV3C, les variables et flux représentent approximativement les macroprocessus reliés à l'infiltration et à la redistribution verticale de l'eau dans la colonne de sol correspondant à l'UHRH. En effet, les équations retenues ne peuvent pas décrire très précisément le comportement complexe de l'écoulement d'eau dans la colonne de sol, cependant, elles représentent moyennement ce qui se passe à l'échelle de l'UHRH. La couche de surface mesure de 10 à 20 cm, elle représente la couche du sol influencée par l'évapotranspiration, elle contrôle le ruissellement de surface. Le but de la deuxième couche est de produire des écoulements retardés dans la couche de surface du sol. Le débit de base est contrôlé par la troisième couche.

L'écoulement sur la partie terrestre du bassin est le processus qui simule le déplacement de l'eau vers un réseau hydrographique. Il s'agit du mouvement d'eau à travers i) la végétation; ii) les petits canaux et iii) le sol. Le modèle BV3C effectue le transport d'eau jusqu'au cours d'eau le plus près.

L'écoulement par le réseau hydrographique est le processus par lequel l'eau est acheminée par le biais des rivières, des lacs et des réservoirs vers l'exutoire du bassin versant. La simulation dans les tronçons de rivières est réalisée par une forme simplifiée des équations de Saint-Venant. Deux algorithmes sont disponibles: l'onde cinématique et l'onde diffusante. L'écoulement par les lacs est simulé par une relation entre la hauteur d'eau à l'exutoire du lac et le débit correspondant. L'écoulement à travers un barrage utilise une méthode basée sur le respect de certaines contraintes d'exploitation et sur divers types de gestion.

2.1.2 Les modèles de simulation des réservoirs

Les modèles de simulation des réservoirs peuvent calculer le stockage, le soutirage, la production d'énergie hydroélectrique et les déversements dans un système de réservoirs et de rivières. Ces modèles sont basés sur les processus de calcul du bilan hydrique pour suivre le mouvement de l'eau dans un système de réservoirs. Le pas de temps de calcul dépend de l'application réalisée. Le stockage et les hydrogrammes peuvent être analysés en utilisant un pas de temps horaire, ou plus petit, pour les cas d'inondations qui se produisent pendant quelques jours. L'approvisionnement d'eau peut être analysé avec un pas de temps mensuel échelonné sur plusieurs décennies, ce qui permet de montrer les périodes de pluie et de sécheresse. Quelques modèles incluent un modèle de simulation hydrologique qui permet de simuler les débits à partir des précipitations et de les utiliser comme intrants pour le modèle de simulation. D'autres incluent un modèle de simulation de qualité de l'eau avec lequel il est possible de calculer les concentrations des contaminants dans différents lieux dans le système de réservoirs. Quelques-uns peuvent réaliser des études économiques basées sur une analyse coûts-bénéfices exprimée en fonction du débit et du stockage [Wurbs, 2005].

La modélisation de systèmes de réservoirs fournit des soutirages et le niveau de stockage qui peuvent servir à la planification de l'avant-projet et du design de nouveaux projets, de la gestion à moyen et à long terme et des opérations en temps réel lors d'inondations, de périodes de sécheresse et de conditions hydrologiques normales. Enfin, la simulation peut aider à réévaluer l'allocation du stockage et de plans opérationnels de systèmes de réservoirs à usages multiples [Wurbs, 2005].

- HEC-ResSim

Le HEC *Reservoir System Simulation* (HEC-ResSim) a été développé par l'*Hydrologic Engineering Center* du « US Army Corps of Engineers » (USACE). Ce modèle remplace HEC-5 qui a été utilisé pendant plus de 20 ans. Son interface graphique fait de lui un modèle très convivial et facile à utiliser. Le modèle peut simuler l'opération de systèmes de réservoirs qui comptent plusieurs réservoirs interconnectés. ResSim a trois ensembles de fonctions appelées « Modules ». Ces modules sont: Configuration de bassin, Réseau de réservoirs et Simulation. Le module Configuration de bassin fournit un cadre commun pour la création des bassins et la définition parmi les applications de modélisation différentes. Le but du module de Réseau de réservoirs est de construire un schéma de la rivière, de décrire les éléments physiques et opérationnels du système de réservoirs et de développer les solutions de recharge à analyser. Le but du module de Simulation est de configurer et réaliser les simulations du système hydrique. Les calculs sont réalisés et les résultats sont vus dans le module de Simulation [Klipsch et Hurst, 2007].

- MODSIM

MODSIM est un Système d'aide à la décision (SAD) développé par l'Université du Colorado [Labadie, 2006]. Il a été conçu pour réaliser l'analyse de la planification à long terme, de la gestion à moyen terme et de l'opération à court terme des systèmes de gestion hydriques. Il inclut une interface graphique interactive très puissante, pour créer, mettre en place et connecter les parties du système hydrique. Des outils d'exportation et d'importation des données sont inclus pour une interaction avec des systèmes de gestion des bases des données externes. En particulier, les versions les plus récentes de MODSIM sont développées dans le système du MS.NET. Un des plus grands avantages de MS.NET est la possibilité de personnaliser MODSIM pour toutes les règles d'opération, les données d'entrée, les rapports de sortie, et l'accès à des modules externes tels que des modèles de qualité de l'eau, le tout sans avoir à modifier le code source original [Labadie, 2006].

- AQUATOOL

AQUATOOL est un SAD développé pour la planification et la gestion des bassins versants. Il a été conçu par l'Université polytechnique de Valence. Il fournit aux utilisateurs des interfaces

différentes qui facilitent la conception de modèles ou de systèmes graphiques et mathématiques. Les schémas développés peuvent être appelés '*Decision Support Systems*', car ils facilitent l'analyse de nombreux problèmes liés à la planification hydrologique. [Water Resources Engineering Area, 2010]. AQUATOOL a été initialement conçu pour l'étape de la planification du processus décisionnel associé à des bassins hydrographiques complexes. Par la suite, il a été élargi pour intégrer les modules relatifs à la phase opérationnelle du processus décisionnel. Les modules de conception assistée par ordinateur permettent à tout système hydrique complexe d'être représenté sous forme graphique, donnant accès aux bases de données géographiquement référencées. La capacité de modélisation inclut le module de simulation du bassin, le module d'optimisation, le module de simulation de l'écoulement de l'aquifère et deux modules d'évaluation des risques [Andreu *et al.*, 1996].

2.1.3 Les modèles d'optimisation

Les modèles d'optimisation ont été créés pour fournir les « meilleures » valeurs d'une variable à optimiser. Ces valeurs permettront, par exemple, d'atteindre la plus haute performance du système hydrique. Étant donnée l'existence de plusieurs utilisateurs de l'eau dans un système hydrique, la satisfaction de chacun d'eux s'avère difficile. Cependant, l'utilisation des modèles d'optimisation aide à établir une gestion optimale du système hydrique, ce qui aide à mieux satisfaire tous les utilisateurs.

Les modèles d'optimisation ont pour but de dégager des règles de gestion optimale. Ces règles de gestion consistent en des débits à soutirer aux réservoirs. Deux termes très importants à retenir par rapport aux modèles d'optimisation sont : la **fonction objective** et les **contraintes**. La fonction objective est utilisée pour désigner une fonction qui sert de critère pour déterminer la meilleure solution à un problème d'optimisation. Les contraintes sont des limites imposées au système hydrique qui doivent être respectées en tout temps. Si l'on permet une violation des contraintes, c'est qu'elles ont été incorporées comme pénalités dans la fonction objective.

Un exemple de fonction objective est la maximisation de la génération d'hydroélectricité; d'autres fonctions relatives aux critères de vulnérabilité cherchent la minimisation des écarts de niveau de stockage ciblés, l'approvisionnement en eau, etc. D'autres fonctions servent à

maximiser les bénéfices nets attendus [Labadie, 2004]. Une fonction objective généralisée pour l'optimisation d'un système de réservoirs déterministe peut-être représentée par :

$$\max (or \min) \sum_{t=1}^T \alpha_t f(\mathbf{s}_t, \mathbf{r}_t) + \alpha_{T+1} \varphi_{T+1}(\mathbf{s}_{T+1}) \quad (2.1)$$

Où

\mathbf{r}_t = variable de décision de dimension n (tel que le débit déversé pour n réservoirs)

T = longueur de l'horizon de temps opérationnel

\mathbf{s}_t = vecteur d'état de stockage de dimension n dans chaque réservoir au commencement de la période t

$f(\mathbf{s}_t, \mathbf{r}_t)$ = objectif à être maximisé ou minimisé

$\varphi_{T+1}(\mathbf{s}_{T+1})$ = estimation des bénéfices futurs au delà de l'horizon de temps T

α_t = facteur d'actualisation pour déterminer les valeurs présentes des bénéfices futurs.

Les contraintes peuvent être représentées par les limites inférieures et supérieures de stockage assignées à des fins de récréation, pour fournir un volume pour le contrôle des inondations et pour assurer un niveau minimum de stockage mort et pour l'opération des centrales hydroélectriques. Un autre exemple de contraintes est la limite de soutirage des réservoirs qui assure le contrôle de la qualité d'eau en aval du barrage et de l'habitat des poissons et de la faune [Labadie, 2004].

Les limites inférieures et supérieures du stockage et du débit déversé peuvent être représentées comme suit :

$$\mathbf{s}_{t+1,min} \leq \mathbf{s}_{t+1} \leq \mathbf{s}_{t+1,max} \quad (pour \ t = 1, \dots, T) \quad (2.2)$$

$$\mathbf{r}_{t+1,min} \leq \mathbf{r}_{t+1} \leq \mathbf{r}_{t+1,max} \quad (pour \ t = 1, \dots, T) \quad (2.3)$$

Les méthodes d'optimisation stochastiques sont classifiées en méthodes implicites et explicites. Les méthodes implicites, ou simulation Monte-Carlo, utilisent les techniques d'optimisation déterministes qui optimisent un grand nombre des scénarios de débits non régulés, historiques ou synthétiques. Les méthodes explicites sont des techniques d'optimisation stochastique conçues pour représenter explicitement l'aléa des apports

[Labadie, 2004]. Quelques descriptions de techniques d'optimisation sont présentées dans les paragraphes suivants.

Programmation linéaire.

Une technique d'optimisation utilisée pour les modèles de systèmes de réservoirs est la méthode (méthode implicite) de programmation linéaire (PL) et ses variantes [Yeh, 1985]. Quelques avantages de ce modèle sont : l'habileté à résoudre des problèmes à grande échelle efficacement et la convergence vers la solution optimale globale, entre autres. La technologie de programmation linéaire est utilisée dans la majorité des outils commerciaux. Fréquemment, les fonctions linéaires par morceaux représentent les éléments de modélisation non linéaires. Un solveur commercial, tel que CPLEX ou MINOS [Murtagh et Saunders, 1995], est appelé à résoudre le problème d'optimisation linéaire.

Programmation linéaire stochastique.

La formulation déterministe (PL) des problèmes d'optimisation de systèmes de réservoirs prend en compte que tous les apports futurs sont connus avec exactitude. Une hypothèse plus réaliste est que la première période de décision peut être faite avec certitude, mais les décisions futures tiennent compte de l'aléa des apports. Les problèmes « à deux stades » sont formulés pour minimiser le coût total (ou maximiser les bénéfices nets) à partir des décisions du premier stade, plus les coûts totaux attendus (ou bénéfices nets) des décisions futures. Le modèle de programmation linéaire avec recours a été utilisé par Seifi et Hipel [2001] pour le système de réservoirs des Grands Lacs (États-Unis et Canada).

Programmation dynamique stochastique.

La programmation dynamique stochastique (PDS) est la méthode (méthode explicite) la plus utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation stochastique sur de petits systèmes hydriques [Bertsekas, 2007]. Cette approche est difficilement applicable quand le nombre de réservoirs à capacité variable dépasse trois. Cela est dû au fait que le temps de calcul augmente exponentiellement avec le nombre de variables d'état et en pratique, on ne peut considérer au maximum que trois ou quatre variables d'état. BC Hydro, Électricité de France

et Hydro-Québec sont des exemples d'entreprises qui utilisent la technique de programmation dynamique stochastique.

2.1.4 Les critères de performance

Des critères de performance de vulnérabilité, de résilience et de fiabilité sont utilisés pour évaluer le comportement des réservoirs. Les niveaux de stockage peuvent dépasser leur cible opérationnelle et, dans ces circonstances, les trois critères donnent un aperçu du comportement du barrage par rapport à cet événement. Ces critères ont été utilisés par Simonovic et Li [2003] dans le cadre de leur étude de l'évaluation des changements climatiques sur les performances d'un système de protection contre les inondations, développé pour la ville de Winnipeg, dans le bassin de la rivière Rouge, au Manitoba. Aussi, Minville *et al.* [2010a] utilisent les critères de fiabilité et de vulnérabilité en tant qu'indicateurs d'impact dans leur étude d'impact et d'incertitude du changement climatique dans la gestion du système hydrique de Péribonka, au Québec. Li *et al.* [2010] utilisent le critère de vulnérabilité pour leur étude de la performance de l'opération des réservoirs dans un bassin nord-américain dans un contexte de changements climatiques. Les définitions des trois critères de performance sont maintenant présentées.

Fiabilité

Il s'agit de la probabilité qu'un réservoir soit dans un état jugé satisfaisant. Un état satisfaisant est défini, par exemple, quand les niveaux des réservoirs se situent entre les niveaux minimal et maximal d'exploitation. Un état est insatisfaisant quand les niveaux se situent en dehors de ces limites. La fiabilité est définie comme la relation entre la quantité de jours où l'état est jugé satisfaisant et le nombre de totaux des jours considérés.

$$\alpha = \frac{1}{NS} \sum_{t=1}^{NS} Z_t \mid \begin{matrix} Z_t=1 & \forall x_t \in S \\ Z_t=0 & \forall x_t \in F \end{matrix} \quad (2.4)$$

Où

α = fiabilité

Z_t = état du système au jour t

S = état satisfaisant

F = état insatisfaisant

NS = nombre de jours considérés

Vulnérabilité

La vulnérabilité est un indicateur de la sévérité d'un état jugé non satisfaisant. C'est la différence maximale entre une valeur de référence et une valeur excédant cette valeur. Par exemple, le niveau maximal d'exploitation d'un réservoir peut être défini à 250 m et, à un moment donné, ce niveau est dépassé en arrivant à 251 m. Donc, la vulnérabilité est de 1 m.

$$\beta_y = \begin{cases} 0 & \text{si } V_t \leq V_f \\ \text{Max}(V_t - V_f) & \text{autre} \end{cases} \quad (2.5)$$

Où

β_y = vulnérabilité

V_t = valeur de référence

V_t = valeur observée

Résilience

La résilience mesure la capacité du système à retourner à un état jugé satisfaisant. Elle est calculée sur une base annuelle.

$$\gamma = \frac{1}{\left(\frac{MD}{MS}\right)^{FN}} \quad (2.6)$$

Où

γ = résilience

MD = nombre maximal de jours consécutifs pour lequel l'état est jugé insatisfaisant dans une année

MS = nombre de jours dans une année.

FN = nombre de jours où l'état est jugé insatisfaisant dans une année.

2.2 La gestion des réservoirs face aux changements climatiques

Dans plusieurs lieux de la planète, le changement du climat occasionnera des répercussions négatives telles que des inondations, des sécheresses, etc. Le rapport synthèse réalisé par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) [IPCC, 2007b]

mentionne l'existence du réchauffement du système climatique. Il se manifeste, à l'échelle du globe, par une hausse des températures moyennes de l'atmosphère et des océans, une fonte massive de la neige et de la glace et une élévation du niveau moyen de la mer. Des débits très grands continueront à se produire et possiblement avec une augmentation de leur fréquence dans un avenir rapproché. Le manque d'adaptation à ces conditions extrêmes pourrait produire des dommages matériels ou économiques importants. Le déluge de Saguenay en 1996 et les inondations de la Montérégie en 2011 sont des exemples d'événements extrêmes dont la fréquence d'occurrence pourrait augmenter en raison des changements climatiques. Pour cette raison, les méthodes traditionnelles de gestion des systèmes hydriques qui se basent sur les données historiques ne seront plus fiables. Des méthodologies nouvelles sont nécessaires pour gérer les systèmes hydriques et s'adapter aux changements du climat.

Pour faire face à cette problématique, plusieurs outils tels que des modèles climatiques (globaux et régionaux) ainsi que des techniques de mise à l'échelle sont nécessaires. De plus, des études scientifiques concernant des impacts et des adaptations des systèmes de gestion de ressources hydriques sont pertinentes. Dans cette section, une description des outils et des techniques ainsi que des résumés des dernières études réalisées dans ce champ d'expertise seront présentés.

2.2.1 Les modèles climatiques

Les modèles climatiques sont des représentations mathématiques du système climatique, exprimés par des codes informatiques et exécutés par des ordinateurs puissants. Ces modèles sont basés sur des lois de la physique telles que la conservation de la masse, de l'énergie et du momentum. La confiance des modèles vient de leur base physique, de leur habilité en représenter le climat observé et les changements climatiques passés [IPCC, 2007d]. En effet, les modèles climatiques sont utilisés pour simuler des épisodes de climat passé (par exemple, le dernier maximum glaciaire, la dernière période interglaciaire ou d'événements climatiques abrupts) pour aider à comprendre les mécanismes des changements climatiques passés.

Les **modèles climatiques globaux (MCG)** sont les outils principaux des chercheurs pour comprendre et attribuer les variations climatiques du passé et pour réaliser des projections

futures [IPCC, 2007c]. Ces dernières années, on a augmenté leurs habiletés à représenter plusieurs caractéristiques climatiques telles que la distribution à grande échelle des températures atmosphériques, les précipitations, la radiation, le vent, les températures de l'océan, les courants et le couvert de glace dans la mer. Cette habileté à simuler les caractéristiques climatiques augmente l'assurance qu'ils représentent bien les processus physiques pour la simulation des climats futurs [IPCC, 2007d]. Le Tableau 2.1 montre neuf exemples de modèles climatiques globaux, d'un total de vingt-trois, utilisés dans le 4^{ième} rapport du GIEC [IPCC, 2007d].

Tableau 2.1 Modèles climatiques globaux.

	MODÈLES	CENTRES DE RECHERCHE	PAYS
1	BCC-CM1, 2005	Beijing Climate Center	China
2	BCCR-BCM2.0, 2005	Bjerknes Centre for Climate Research	Norvège
3	CCSM3, 2005	National Center for Atmospheric Research	É.U.
4	CGCM3.1(T47), 2005	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	Canada
5	CGCM3.1(T63), 2005		
6	CNRM-CM3, 2004	Météo-France/Centre National de Recherches Météorologiques	France
7	CSIRO-MK3.0, 2001	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) Atmospheric Research	Australie
8	ECHAM5/MPI-OM, 2005	Max Planck Institute for Meteorology	Allemagne
9	ECHO-G, 1999	Meteorological Institute of the University of Bonn, Meteorological Research Institute of the Korea Meteorological Administration (KMA), and Model and Data Group	Allemagne/Corée

Les MCG sont les outils les plus performants pour simuler la réponse du système climatique global relativement à l'augmentation du gaz à effet de serre. Cependant, ils ont une résolution horizontale variant entre 250 et 600 km. Cette basse résolution est une contrainte à franchir pour la modélisation des régimes hydrologiques. Le temps pour simuler le système climatique à de hautes résolutions avec un MCG est très long [Caya et al., 1995], donc, pour cette raison, d'autres solutions pour simuler le climat à fine échelle sont utilisées.

Les **modèles de climat régional (MRC)** sont des modèles numériques analogues aux MCG, cependant, leur résolution est plus fine. L'utilisation des MRC utilisant des conditions limites latérales fournies par les simulations de MCG offre une méthode alternative pour produire des échelles spatiales plus fines. Étant donné que les MRC contiennent une description numérique des procédés physiques dans le système climatique, ils sont capables de produire un ensemble cohérent de variables physiques. Aussi, les MRC peuvent utiliser des réanalyses comme conditions à la frontière. Plummer *et al.* [2006] ont utilisé les sorties du modèle régional de climat canadien (MRCC) version 3, piloté par des réanalyses provenant de la seconde version du modèle de climat global canadien (MCGC), pour étudier l'impact des conditions limites dans un modèle climatique pour la plus grande partie de l'Amérique du Nord. Le MRCC est basé sur des techniques modernes de simulation numérique et réalise des simulations climatiques à fine échelle de l'ordre de 45 km, avec un pas de temps de 15 minutes entre chaque intégration [ESCER, s.d]. Les résultats de l'étude de Plummer *et al.* [2006] montrent que les simulations du MRCC ont un biais chaud pour les températures d'hiver dans les régions du nord. Le biais est plus petit lors de l'utilisation des réanalyses comme conditions à la frontière. En plus, les précipitations d'été simulées sont plus grandes que celles observées. Les réanalyses ont été fournies par le Centre National de Prédiction Environnementale – Centre National de la Recherche Atmosphérique (NCEP-NCAR).

2.2.2 Mise à l'échelle

Les projections climatiques qui sortent des MCG ne sont pas directement utilisables par les modèles hydrologiques. Effectivement, la résolution de ces modèles est très basse. Pour cette raison, il faut qu'elles soient traitées par un processus de mise à l'échelle.

Les deux approches de mise à l'échelle les plus courantes sont la mise à l'échelle dynamique (avec des MRC) et la mise à l'échelle statistique [Brissette *et al.*, 2007]. Dans les sections suivantes, sont présentées les descriptions des deux approches.

Mise à l'échelle dynamique

La mise à l'échelle dynamique est possible avec les MRC. Le principal avantage des MRC est qu'ils peuvent résoudre les caractéristiques atmosphériques à plus fine échelle, telles que les

précipitations orographiques, beaucoup mieux que les MCG [Wilby *et al.*, 2002]. Le principal problème de cette approche est le coût de calcul. De plus, malgré les améliorations, les sorties des MRC ont encore une résolution trop grossière pour quelques applications pratiques, telles que des études de l'impact sur les petits bassins versants et les champs agricoles [Chen, Brissette et Leconte, 2011]. Les projections climatiques du MRCC sont disponibles pour l'ensemble du Canada, mais des projections climatiques de plusieurs MRC ne sont disponibles que pour certaines régions, limitant les études d'incertitude associées à la structure de ces modèles.

Mise à l'échelle statistique

Les techniques de mise à l'échelle statistique aident à résoudre les désavantages des techniques de mise à l'échelle dynamique. Elles sont plus faciles à mettre en œuvre et le coût de calcul est faible [Chen et al. 2011]. Les techniques de mise à l'échelle statistique visent à établir des relations statistiques entre les variables à l'échelle locale et à l'échelle globale (MGC). Le désavantage de ces techniques est qu'elles supposent que la relation statique restera la même pour le climat futur, ce qui ne peut pas être démontré. Il y a eu un certain succès pour réaliser la mise à l'échelle des températures, mais la mise à l'échelle des précipitations reste médiocre [Brissette *et al.*, 2007]. Deux catégories qui appartiennent à cette technique sont: la fonction de transfert et le générateur de climat (méthode WG).

La **méthode de fonction de transfert** établit des relations statistiques linéaires ou non linéaires entre les variables climatiques locales (prédicteurs) et les sorties à grande échelle des MCG (prédicteurs). Un exemple de modèle de mise à l'échelle statistique qui utilise cette approche est le Statistical Downscaling Model (SDSM) développé par Wilby *et al.* [2002].

La **méthode de générateur du climat** (méthode WG) se base sur la modélisation statistique des chroniques de température, précipitation et autres variables météorologiques typiquement à partir d'observations aux stations météorologiques. Plusieurs générateurs utilisent une chaîne de Markov à deux stades de premier ordre pour générer l'occurrence des journées humides et sèches. La probabilité de précipitations d'une journée est basée sur le statut humide ou sec de la journée antérieure. Les quantités de précipitation journalières sont habituellement calculées à partir d'une distribution de probabilités préalablement ajustée aux observations. Une

propriété intéressante du générateur de climat est son habileté à produire des scénarios comportant des valeurs climatiques extrêmes. Chen et al. [2011] ont utilisé un générateur climatique dans l'étude des incertitudes de méthodes de mise à l'échelle quantifiant l'impact des changements climatiques sur les régimes hydriques de bassins versants.

Une autre approche de mise à l'échelle est la méthode de **changement de facteur**, aussi appelée la méthode des **Deltas** [Minville *et al.*, 2008]. Cette méthode est employée pour faire la mise à l'échelle de scénarios climatiques futurs. Typiquement, elle fait un ajustement de la température journalière en additionnant la différence des températures mensuelles prédites par le MCG, entre la période future et la période de référence, pour obtenir les températures journalières en période future (équation 2.7). La précipitation journalière ajustée de la période future s'obtient en multipliant le ratio de précipitations par la précipitation journalière observée (équation 2.8). Le ratio est la relation des précipitations mensuelles en période future et les précipitations mensuelles en période de référence, obtenue avec le MCG. L'inconvénient est que la séquence temporelle des journées humides et sèches et la variance des températures ne changent pas.

$$T_{aj,fut,j} = T_{obs,j} + (T_{MC,fut,m} - T_{MC,réf,m}) \quad (2.7)$$

$$P_{aj,fut,j} = P_{obs,j} * (P_{MC,fut,m}/P_{MC,réf,m}) \quad (2.8)$$

2.2.3 Méthodes de correction des biais

Malgré l'utilisation croissante des modèles climatiques régionaux dans les études d'impact hydrologique résultant des changements climatiques, leur application s'avère difficile, en raison du risque de biais considérables. Les causes de ces biais sont: les erreurs systématiques des modèles causés par la conceptualisation imparfaite, la discrétisation et la moyenne spatiale à l'intérieur des grilles. Cela rend l'utilisation de simulations de modèles climatiques régionaux, en tant que données d'entrées directes pour les études d'impacts hydrologiques, plus complexes. Plusieurs méthodes de correction ont été développées récemment comme celles de Teutschbein et Seibert [2012].

L'approche de la **mise à l'échelle linéaire** [Lenderink et al., 2007] **de la précipitation et de la température** fonctionne avec la correction des valeurs mensuelles basées sur les différences entre les valeurs observées et les valeurs actuelles simulées. Par définition, les valeurs moyennes mensuelles des simulations corrigées du MRC correspondent parfaitement aux observations. La précipitation est corrigée par un facteur basé sur la relation des moyennes mensuelles observées à long terme et les données de référence simulées. La température est corrigée, en additionnant un terme basé sur la différence de la moyenne mensuelle observée à long terme et des données de référence simulées.

Bien que la mise à l'échelle linéaire corrige un biais dans la moyenne, elle n'est pas en mesure de corriger les biais dans la fréquence et l'intensité des journées pluvieuses. La **mise à l'échelle d'intensité locale (LOCI) de précipitation** présentée par Schmidli et al. (2006) va un peu plus loin que la mise à l'échelle linéaire, et ajuste la moyenne ainsi que la fréquence et l'intensité des journées pluvieuses aux séries temporelles de précipitation.

La **transformation exponentielle de la précipitation** est une autre méthode de correction des biais. Même si la mise à l'échelle linéaire entre en ligne de compte pour régler le biais dans la moyenne, elle ne permet pas de corriger les différences dans la variance. Par conséquent, une correction non linéaire sous une forme exponentielle $a \cdot P^b$ [Leander et Buishand, 2007; Leander et al., 2008], peut être utilisée pour ajuster spécifiquement la variance d'une série temporelle de précipitation.

La transformation à la puissance décrite ci-dessus est une méthode efficace pour corriger la moyenne et la variance, mais elle est limitée à la série temporelle de précipitation, en raison de l'utilisation d'une fonction de puissance. Une approche de la **mise à l'échelle de la variance de température** aide à corriger à la fois la moyenne et la variance des séries temporelles de température. Elle a été présentée par Chen et al. [2011] et est désignée: «*variance scaling*».

2.2.4 Impacts et adaptation des systèmes hydriques aux changements climatiques

Cette section présente des résumés d'études réalisées concernant l'impact et l'adaptation de systèmes hydriques face aux changements climatiques.

Fortin *et al.* [2007] ont réalisé une étude sur l'impact et l'adaptation aux changements climatiques pour les plans de gestion des lacs Saint-François et Aylmer, au sud du Québec. Les auteurs ont utilisé six réalisations faites par trois MCG (HadCM3, ECHAM4 et CSIRO-mk2) et par deux scénarios de gaz à effet de serre (A2-B2). La méthode de mise à l'échelle appliquée pour les projections climatiques futures est la méthode des Deltas. La principale conclusion qui en découle est, qu'en raison de la variabilité des réalisations climatiques faites par les MGC, il n'y a pas une solution d'adaptation unique qui soit applicable à l'ensemble des réalisations.

Georgakakos *et al.* [2012] ont montré la valeur de l'adaptation de la gestion des ressources hydriques aux changements climatiques appliquée au système de réservoirs de la Californie du Nord. Ce système hydrique approvisionne les deux tiers de l'eau potable de l'État, irrigue sept millions d'acres de terres agricoles parmi les plus productives de la planète et héberge des centaines d'espèces de poissons, d'oiseaux et de plantes [HRC et GWRI, 2007]. Cette étude évalue quatre scénarios de simulation, deux scénarios hydrologiques (climat présent, climat futur) et deux outils de gestion (actuel et adapté). L'outil de gestion adapté est le système d'aide à la décision INFORM DSS (*Integred Forecast and Reservoir Management Decision Support System*). Le système d'aide à la décision inclut trois modèles qui tiennent compte de plusieurs échelles temporelles et objectifs : un modèle d'optimisation de la production hydroélectrique (modélise le débit turbiné et le débit déversé); un modèle de contrôle de réservoirs à court et moyen terme; et un modèle de contrôle de réservoirs à long terme. Les caractéristiques plus notables de INFORM DSS sont : i) les soutirages qui sont déterminés par des règles dynamiques qui considèrent la disponibilité d'eau actuelle et anticipée et les demandes du système hydrique, ii) l'optimisation explicite du stockage du système et du soutirage qui considère les incertitudes des apports à travers la prévision d'ensemble, iii) l'impact des décisions mensuelles par rapport aux protections des inondations, à la production hydroélectrique et à l'approvisionnement d'eau et d'autres utilisations de l'eau qui sont déterminées par des modèles de haute résolution qui optimisent les soutirages journaliers et horaires. Les résultats montrent que le système actuel de gestion d'eau n'est pas efficace en climat futur. La gestion adaptée constitue une mitigation effective aux changements climatiques. Les items évalués sont : le niveau de réservoir et de déversement,

l'approvisionnement d'eau, la génération d'énergie et la décharge dans le delta San Joaquin-Sacramento.

Grillakis *et al.* [2011] ont utilisé le scénario A2 d'émissions de gaz à effet de serre pour réaliser leur étude de l'impact des changements climatiques sur le bassin de la rivière Spencer Creek, située dans le sud de l'Ontario. Ils se sont aperçus que, malgré les quatre différents modèles de climat régional et les trois modèles hydrologiques utilisés, toutes les simulations du régime hydrologique en climat futur montrent une augmentation moyenne des débits annuels. Des trois modèles hydrologiques utilisés, le modèle IHMS HBV [Lindström *et al.*, 1997] présente la meilleure performance en accord avec le critère de Nash-Sutcliffe, en calage et validation, les deux autres ne représentent pas aussi bien les pics. Pour cette raison, les trois modèles hydrologiques ont été utilisés pour l'analyse de changement de débit annuel moyen, mais seulement l'IHMS HBV pour l'analyse de l'intervalle de récurrence. Des analyses sur la probabilité de dépassement annuel de 2 % (50 années de récurrence) des précipitations, de la température maximale et minimale et du débit ont été réalisées pour les projections. Toutes les variables auront une augmentation pour les projections. Le débit maximal journalier sera plus grand par une plage de 37 % à 91.6 %, alors que la précipitation maximale journalière annuelle sera plus grande par une plage de 8.8 % à 97.4 %, la température maximale sera plus grande par une plage de 2 °C à 5.9 °C, la température minimale sera plus grande par une plage de 0.3 °C à 4.9 °C.

Compte tenu de l'ampleur de l'incertitude des projections du climat futur, Minville *et al.* [2008] ont conclu que toutes les analyses de changements climatiques qui se sont déroulées avec un seul GCM doivent être interrogées. La méthode de mise à l'échelle des Deltas est utilisée dans leur étude. Cette méthode est recommandée par Diaz-Nieto et Wilby [2005] pour les études de bassins où les caractéristiques hydrologiques plus importantes sont liées à l'accumulation et à la fonte de neige.

Minville *et al.* [2009] ont évalué l'impact des changements climatiques sur les règles d'opération des réservoirs, la production hydroélectrique, le rendement des centrales hydroélectriques, les déversements non productifs et la fiabilité des réservoirs du système hydrique du bassin versant de la rivière Péribonka, au Québec. Le système hydrique est composé de deux réservoirs et de trois centrales hydroélectriques. Le résultat principal est que

la production diminuera pour la période 2010-2039 (1.8 %), mais elle augmentera pour les périodes 2040 -2069 (9.3 %) et 2070-2099 (18.3 %). Les auteurs se sont aperçus que l'adaptation à la gestion des réservoirs se traduit par un changement du niveau moyen saisonnier. Au printemps, les niveaux de réservoirs sont baissés plus tôt, dans le but de contenir la crue printanière plus avancée. En été et à l'automne, les niveaux sont maintenus plus haut pour maximiser la hauteur de chute. En hiver, les niveaux sont plus bas pour limiter le dépassement des niveaux maximum d'exploitation, conséquence d'une augmentation dans les débits des réservoirs. Ils ont utilisé seulement le MRCC couplé au CGCM3 forcé avec le scénario d'émissions de GES A2. Cette étude adapte les règles de gestion annuellement en tenant compte des débits « historiques » des 35 dernières années.

Minville *et al.* [2010a] ont étudié l'impact des changements climatiques sans modifier les règles de gestion (avec les règles de gestion actuellement utilisées) sur le système hydrique du bassin versant de la rivière Péribonka, au Québec. La principale conclusion est que la production hydroélectrique diminuera et le déversement augmentera, malgré une augmentation des apports dans le réservoir. D'un point de vue du contrôle des inondations, quelques projections suggèrent que les réservoirs pourraient être moins fiables et plus vulnérables dans un contexte de changement climatique. Des projections climatiques, composées par une combinaison des cinq MCG avec deux scénarios de gaz à effet de serre, ont été utilisées. La méthode de mise à l'échelle a été la méthode des Deltas. Pour représenter la variabilité naturelle, un générateur de climat stochastique a été utilisé. Cette étude a analysé seulement l'horizon 2050 (2040–2069). Les projections indiquent une augmentation dans les débits annuels, des pics de crues avancés et de plus grands volumes d'eau au printemps.

Minville *et al.* [2010b] ont fait une évaluation de l'impact et de l'adaptation aux changements climatiques pour le système hydrique du bassin versant de la rivière Péribonka. Cette étude a été réalisée en analysant 30 projections climatiques de 30 années chacune (horizon 2020, 2050 et 2080) et comparée avec la période de contrôle (1961-1990). Les règles de gestion hebdomadaires ont été calculées avec la programmation dynamique stochastique. La principale observation révèle qu'une augmentation de la production hydroélectrique et du déversement non productif est produite par la plupart des projections. Cette augmentation varie de 22 % à 300 % respectivement, par rapport à la période de contrôle. La fiabilité des

réservoirs est touchée par la moitié des projections. Le changement dans le rendement des centrales peut fluctuer entre -5 % à 8 %.

Eum et Simonovic [2010] ont fait une étude sur l'adaptation aux changements climatiques pour le système hydrique du bassin de la rivière Nakdong, en Corée. Ce bassin est particulièrement vulnérable aux changements climatiques, à cause de sa topographie et de son historique d'évènements extrêmes (inondations et sécheresses). Un outil de gestion a été développé pour faire face aux changements climatiques, appelé IRMS (*Integrated Reservoir Management System*). L'IRMS est composé d'un modèle générateur de climat (WG), d'un modèle hydrologique (SSARR) et d'un modèle d'optimisation d'évolution différentielle (DEOM). Trois conditions climatiques différentes (historiques, humides et sèches) ont été analysées utilisant six scénarios, chacun comportant 60 années. Des règles de stockage optimales ont été développées pour chaque scénario sur trois réservoirs. Les règles de stockage optimales sont composées par une limite supérieure et une limite inférieure de stockage pour la période annuelle, de telle façon que pour chaque journée de l'année, il y a une plage de niveau de stockage qui doit être respectée. Les auteurs ont conclu que les règles de stockage optimales pour le réservoir de forte contenance sont moins sensibles aux changements climatiques. Les réservoirs de moyenne et petite contenance sont plus sensibles à ces changements. De plus, quand une sécheresse se produit, le réservoir à forte contenance laisse sortir plus d'eau et les réservoirs de moyenne et petite contenance ont besoin d'accroître leurs niveaux de stockage.

Le système de gestion du bassin versant de la rivière Upper Thames en Ontario a été analysé par Eum *et al.* [2012]. Des règles de stockage optimales ont été créées pour les trois réservoirs de ce bassin considérant trois conditions climatiques (historiques, humides et sèches). Chaque scénario généré pour 100 années est divisé en deux parties : i) la période d'apprentissage (50 années) pour développer les règles optimales et ii) la période de test (50 années). L'outil qui a produit ces règles a été le même que celui utilisé par Eum et Simonovic [2010], cependant le modèle hydrologique utilisé a été HEC-HMS [Scharffenberg et Fleming, 2010]. Les résultats démontrent que l'outil fournit des règles de stockage optimales qui reflètent les caractéristiques hydrologiques des scénarios futurs. Plus spécifiquement, la période de crue

printanière peut être devancée entre les mois de février et d'avril, si un scénario humide se produit dans le futur.

Vicuña *et al.*[2011] ont fait une étude sur les impacts des changements climatiques dans deux systèmes hydroélectriques en Californie : l'*Upper American River Project (UARP)* et le *Big Creek System*. Le système UARP est situé dans le *Northern Sierra Nevada* et le système *Big Creek* est situé dans le bassin de la rivière San Joaquin, dans le *Southern Sierra Nevada*. Les scénarios de changements climatiques ont été fournis par le *Second California Assessment* [Franco *et al.*, 2011]. Ces scénarios montrent une réduction des précipitations et des débits pour les deux systèmes et un devancement de la crue printanière. La réduction des débits diminue la génération d'énergie et les revenus des deux systèmes. Sous les projections climatiques, les deux systèmes continuent à répondre à la plupart des demandes des pics historiques de puissance en été. Toutefois, si la quantité de vagues de chaleur augmente à la fin de l'été (septembre), les stratégies d'exploitation des réservoirs pourraient devoir être modifiées.

Une étude sur l'adaptation à l'augmentation des apports dans un système hydrique situé dans le centre du Québec [Arsenault *et al.*, 2013] et géré par une entreprise privée de gestion hydroélectrique, a été réalisée. Un modèle de PDS a été utilisé pour générer des règles d'opérations optimisées. Ces règles optimisées ont été utilisées dans un simulateur de génération d'énergie pour prédire la quantité d'hydroélectricité en deux projections futures (2036-2065 et 2071-2100). Les principales conclusions sont que les deux mesures d'adaptation (optimisation des règles de gestion du réservoir et ajout de turbines) permettent un accroissement de la production électrique, mais l'adaptation des règles d'opération est suffisante pour récolter la plupart des bénéfices de l'augmentation de la disponibilité en eau.

Dans le cadre du Plan d'action 2006-2012 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec (PACC), le CEHQ, a préparé l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional [CEHQ, 2013] qui est divisé en deux sections. La première section traite de l'impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050. Les principales conclusions de cette section révèlent qu'il est difficile de se prononcer sur les changements de la pointe des crues printanières, celles-ci seront vraisemblablement moins volumineuses au sud du territoire et seront fort probablement plus hâtives sur l'ensemble du

Québec méridional. En plus, les débits d'étiage d'été et d'automne seront fort probablement plus faibles pour le Québec méridional et les étiages d'été et d'automne seront fort probablement plus longs. Finalement, l'hydraulicité annuelle sera vraisemblablement plus forte au nord du Québec méridional. La deuxième section, l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional comme tel, présente un ensemble de projections hydroclimatiques à l'horizon 2050 pour le Québec méridional, classées selon différents indicateurs hydrologiques. Pour chaque indicateur, quatre cartes présentent les trois composantes du signal de changement, ainsi qu'une estimation de l'état actuel de l'indicateur, basée sur les observations hydrométriques à la station.

En conclusion, dans les dernières années, les études qui évaluent l'impact des changements climatiques sur la gestion des réservoirs utilisent une méthodologie à multi-scénarios pour réaliser ses analyses. Il est évident que se baser sur plusieurs projections climatiques est plus avantageux que de fonder ses résultats sur une seule projection climatique qui néglige l'incertitude des résultats obtenus. Par rapport aux changements des caractéristiques hydrologiques, plusieurs études ont montré qu'un devancement de la crue printanière se produira dans le futur, pour les différents systèmes hydriques analysés.

Moins d'études ont été réalisées sur l'adaptation de la gestion des réservoirs aux changements climatiques par rapport aux études réalisées sur leur impact. Il y a donc encore beaucoup des recherches à réaliser à ce sujet. Les modèles d'optimisation ont une fonction importante dans les études d'adaptation, puisque plusieurs de ces études font appel à l'utilisation de ces modèles.

CHAPITRE 3 ARTICLE

Avant-propos

Auteurs et affiliation :

Uriel Francisco Huaranga Alvarez, étudiant à la maîtrise, Université de Sherbrooke,
Faculté de Génie, Département de génie civil

Mélanie Trudel, stagiaire postdoctorale, Université de Sherbrooke, Faculté de Génie,
Département de génie civil

Robert Leconte, professeur, Université de Sherbrooke, Faculté de Génie, Département
de génie civil

Date de soumission : 26 décembre 2013

État de l'acceptation : Accepté pour publication le 22 mai 2014

Revue : Water Resources Management

Référence : Huaranga et al. 2014

Titre français: Impacts et adaptation aux changements climatiques utilisant un outil de gestion de réservoirs dans un bassin nordique: application au bassin versant de la rivière du Lièvre, Québec, Canada.

Contribution au document

Cet article constitue le cœur du sujet de recherche. L'introduction donne un aperçu général du projet ainsi que des études antérieures reliées à ce domaine de recherche. La méthodologie expose les principales étapes franchies pour accomplir les objectifs de ce projet. Les résultats sont ensuite présentés. La discussion et la conclusion constituent la dernière partie de l'article. L'article porte entièrement sur le sujet de recherche et remplace les chapitres classiques d'un mémoire, soient: Réalisation, Tests et Analyse.

Résumé français :

Le but de cette étude est d'évaluer l'impact des changements climatiques (CC) sur la gestion des réservoirs dans le bassin versant de la rivière du Lièvre (Québec, Canada) et d'étudier les stratégies d'adaptation aux CC, afin de limiter les inondations dans le bassin versant et également dans l'archipel de Montréal, situé en aval du bassin versant. Pour atteindre cet objectif, un outil de gestion du réservoir a été développé. L'outil intègre: une prévision hydrologique d'ensemble; un modèle d'optimisation stochastique; un modèle de réseau neuronal et un modèle de bilan hydrique. Cinq projections climatiques à partir d'un modèle climatique régional en climat présent (1961-2000) et en climat futur (2041-2070) ont été utilisées. Des ajustements aux règles de gestion des réservoirs ont été utilisés comme une stratégie d'adaptation pour limiter les inondations dans le bassin versant et aussi dans l'archipel de Montréal, situé en aval du bassin versant. Un certain nombre de contraintes dans les réservoirs du bassin de la Lièvre sont liées à des activités de loisirs d'été, lesquelles pourraient commencer plus tôt dans le climat futur. Des modifications de ces contraintes ont été simulées pour tenir compte des impacts socio-économiques des changements climatiques sur le fonctionnement des réservoirs. Les résultats montrent qu'en climat futur, l'eau pourrait être stockée dans les réservoirs du bassin versant de la rivière du Lièvre en plus grande quantité, par rapport au climat actuel, diminuant ainsi le risque d'inondations dans l'archipel de Montréal. Le réservoir situé en aval du bassin versant est plus vulnérable et sa fiabilité pourrait décroître dans les conditions climatiques futures. Les mesures d'adaptation réduisent la variabilité interannuelle du niveau de réservoir pour le climat futur. L'outil de gestion de réservoir est un exemple de stratégie sans regret, car il contribuera à améliorer les outils actuellement disponibles pour gérer les réservoirs du bassin de la rivière du Lièvre.

Impacts and adaptation to climate change using a reservoir management tool to a northern watershed: application to Lièvre River watershed, Quebec, Canada

Uriel Francisco Huaranga Alvarez, Mélanie Trudel, Robert Leconte,
Department of Civil Engineering, Université de Sherbrooke
2500 boul. Université, Sherbrooke (Québec), J1K 2R1, CANADA

Abstract.

The purpose of this study is to evaluate the impact of climate change (CC) on the management of the three reservoirs in the Lièvre River watershed and to investigate adaptation strategies to CC. To accomplish this objective, a reservoir management tool was developed. The tool integrates: hydrological ensemble streamflow predictions; a stochastic optimization model; a neural network model; and a water balance model. Five climate projections from a regional climate model, under current (1961-2000) and future (2041-2070) climate scenarios, were used. Adjustments to the reservoirs operating rules were used as an adaptation strategy to limit flooding in the watershed and also in the Montreal Archipelago located downstream of the watershed. A number of constraints in the reservoirs of the Lièvre watershed are related to summer recreational activities, which would start earlier in future climate. Modifications of these constraints were simulated to take into account socio-economic impacts of climate change on reservoirs operation. Results show that greater quantities of water would have to be stored in the Lièvre River watershed in the future, to decrease the risk of flooding in the Montreal Archipelago. The reservoir located at the downstream end of the watershed would be more vulnerable and its reliability may decrease in the future. Adaptation measures reduced the inter-annual variability of the reservoir level under future climate conditions. The reservoir management tool is an example of a no-regrets strategy, as it will contribute to improve the tools currently available to manage the reservoirs of the Lièvre River watershed.

Keywords: Climate change · Adaptation · Reservoir management · Flooding · Regional climate model ·

1. Introduction

Climate change (CC) will induce modifications in temperature and precipitation patterns worldwide (IPCC 2007a) and these changes could impact on reservoirs management (Vicuna et al. 2011; Minville et al. 2010). Reservoirs often have multi-purpose objectives, such as flood control, recreational activities, hydroelectric power generation and water supply, which may be conflicting. In systems with competitive uses of water, reservoirs management allows to optimize the use of water while respecting environmental or security-related infrastructure constraints. Climate change will impact both river flows and socio-economic activities. The usual methods for managing water systems based on historical hydrology may not be reliable in the future (Veijalainen et al. 2010; Eum et al. 2012).

Several studies have been published on the impacts of climate change on reservoirs vulnerability (Christensen et al. 2004; Li et al. 2010; Rajee and Mujumdar, 2010). However, only few studies have been conducted on adapting reservoir management to CC (e.g. Payne et al., 2004; Minville et al., 2010) and concluded that reservoir operating rules should be re-examined in order to take into account of a changing hydrology due to climate change. For example, Fortin et al. (2007) conducted a study on the impacts and adaptation to CC for the management of the St. François and Aylmer Lakes in southern Quebec, Canada. Adaptation solutions for the current management plan appeared to be feasible, but no unique solution applicable to all climate scenarios was found. Georgakakos et al. (2012) showed the value of the adaptive management of water resources under CC conditions for the Northern California water resources system. They demonstrated that an adaptive policy maintains similar performance under two current and future hydrologic scenarios and suggested that adaptive management constitutes an effective mitigation measure for CC. Vonk et al. (2014) showed that the adjustment of reservoir operating rules mitigate the impact of climate change and increase of water demand. Developing reservoir management strategies to adapt to modifications of hydrological regimes and socio-economic activities arising from climate change is new.

Over the years, flooding has occurred in the Lièvre River watershed, a sub-watershed of the Ottawa River watershed, located in southern Quebec, Canada. In the Montreal Archipelago,

the Grand Moulin Dam, built in 1985, was constructed at the entrance of the Mille-Iles River, limiting flooding in this river without other simultaneous adaptation measures. However, building this dam caused an increase in the level of Deux Montagnes Lake. Since the mouth of the Lièvre River is located relatively close upstream of the Montreal Archipelago, the storage capacity of its reservoirs can be used, together with other reservoirs in the Ottawa River watersheds, to control, when necessary, the magnitude of flooding in the archipelago.

The aim of this work is to evaluate the impacts of and adaptations to CC in the management of reservoirs in the Lièvre River watershed to modifications in its hydrological regime and recreational activities. This study presents a reservoir management tool capable of optimizing reservoir operations for the Lièvre River watershed in the context of CC impact studies. Other reservoirs in the Ottawa River watershed were simulated using a neural network approach. The tool was successfully applied to assess system performance under current climate conditions and to evaluate how the system can handle future hydrological regimes, which were obtained by driving a hydrological model with future climate projections from a regional climate model. In this paper, a reservoir is vulnerable if its level exceeds normal operating levels as defined by the reservoir constraints.

2. Study Area

The Lièvre River watershed (Figure 3.1a) covers an area of 9544 km², or 7% of the Ottawa River watershed. Water flowing to the Montreal Archipelago comes mainly from the Ottawa River, including the Lièvre River.

The Lièvre River (source: 47°22'40''N, 74°44'50''W; outlet: 45°31'23''N, 75°25'51''W) flows in a north-south direction for a distance of 330 km and empties into the Ottawa River in the Masson-Angers sector in the city of Gatineau. During the 1971-2011 period, the average monthly flows measured at a station draining approximately 50% of the total drainage area of the watershed were 163 m³/s in May and 58 m³/s in September. The average annual flow was 85 m³/s. Three main reservoirs (Figure 3.1b and c) are found in the Lièvre River watershed: Poisson Blanc (area = 85.21 km²), Mitchinamecus (64.75 km²) and Kiamika (42.48 km²). Their capacities are 910 hm³, 533 hm³ and 436 hm³ respectively. These three reservoirs are managed by the Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ).

The Lièvre River watershed is located in a humid continental climate zone. In the south, the climate is mild and transitions to a cold and humid climate in the northern part of the basin. During the 1970-2010 period, the average seasonal temperatures in winter (December-March), spring (April-June), summer (July-August) and autumn (September-November) were -10.5, 9.7, 17.3 and 5.3°C respectively. The average annual temperature was 3.2 °C. The seasonal total precipitation in winter, spring, summer and autumn were 277.3, 258.6, 207.6, 284.1 mm respectively. Annual precipitation was 1027.6 mm.

The Deux Montagnes Lake is situated in the Montreal Archipelago Region (Figure 3.1d). The lake is fed by the Ottawa River and has four outlets: Mille-Iles River, Des Prairies River and Vaudreuil and Sainte Anne de Bellevue channels, the latter two flowing into Saint-Louis Lake. The lake covers an area of about 150 km². The distance between the outlet of the Lièvre River and the entrance to Deux Montagnes Lake is 125 km. The Grand Moulin Dam helps to control flooding in the Mille-Iles River by limiting maximum inflows to 780 m³/s.

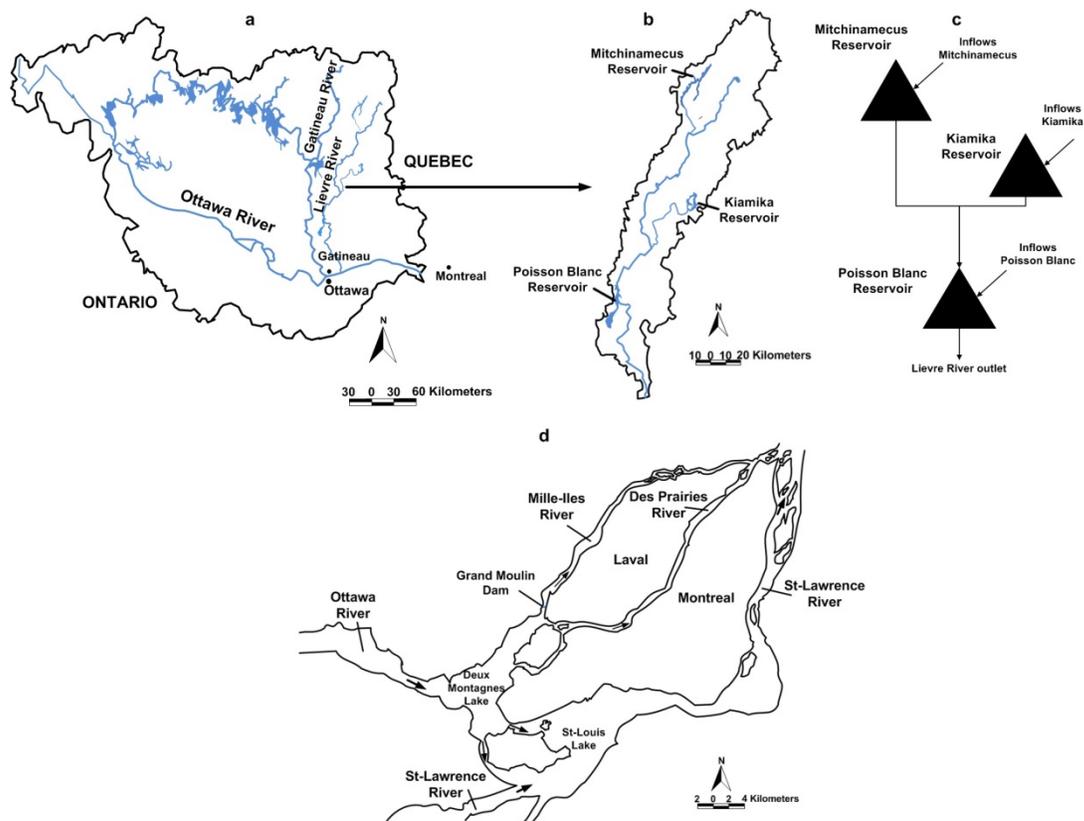


Figure 3.1 a) Location of the Lièvre River watershed inside the Ottawa River watershed, b) location of the reservoirs, c) schematic diagram of the water resources system, d) Montreal Archipelago

3. The reservoir management tool

The reservoir management tool developed in this study is schematically represented in Figure 3.2. Ensemble streamflow predictions (ESP) of the natural inflows to the reservoirs of the Lièvre system are generated. These inflows are used to drive an optimisation model that computes the reservoir releases that best satisfy the constraints imposed on the system by the CEHQ. Resulting outflow from the Lièvre River watershed is then added to the Ottawa River flows which are simulated with a neural network, to produce total inflow in the Montreal Archipelago. A water balance is conducted on the Deux Montagnes Lake, which allows the inflow to the Mille-Iles River to be estimated. If the inflow exceeds the 780 m³/s flood threshold, feedback is sent to the optimisation model, which re-optimizes the releases to reduce outflow from the Lièvre system in an attempt to control flooding. Current and future periods to test the reservoir management tool were 1990-1999 and 2059-2068, respectively.

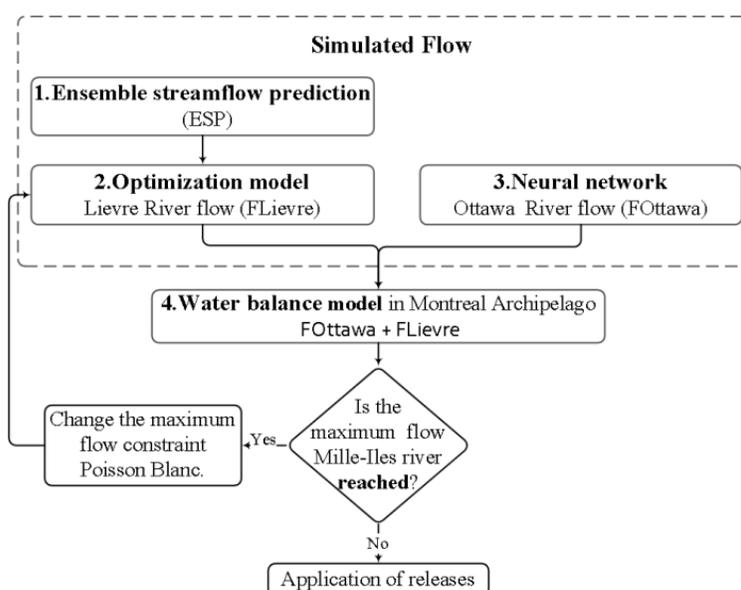


Figure 3.2 Structure of the reservoir management tool.

3.1 Hydrological forecasts

Hydrological forecasts were produced according to the ESP concept. According to Day (1985), ESP uses conceptual hydrologic/hydraulic models to forecast future streamflow using the current snow, soil moisture, river, and reservoir conditions with historical meteorological data. The ESP procedure assumes that meteorological events that occurred in the past are representative of events that may occur in the future. A number of studies have used ESP to

optimize reservoir management models [Faber et Stedinger, 2001; Faber et Stedinger, 2004; Kim et al., 2007].

The Hydrotel distributed hydrological model (Fortin et al. 2001) was used to generate the ESPs. ESPs were built from climate data covering 15 years. As a first step, state variables of the Lièvre River watershed (snow, soil moisture, flow) were simulated with Hydrotel using meteorological observations for each time step (daily) where ESPs are required. Flows for each ESP were then generated from the simulated current state of the watershed, using the weather of the past 15 years (as many years as members of the ESP). Each ESP is 150 days long. The years used to construct the ESPs do not overlap with those used in the modelling experiments (1990-1999 and 2059-2068) with the reservoir management tool.

The Hydrotel model was developed by the Institut National de Recherche Scientifique, Eau, Terre et Environnement (INRS -ETE) of Quebec and constitutes two programs written in the C++ programming language, the HYDROTEL and PHYSITEL software packages. The Hydrotel model is compatible with remote sensing data and geographic information systems (GIS). Hydrotel can simulate several hydrological variables such as snow cover, soil moisture, etc. This model can simulate flow basins ranging from small to very large. The PHYSITEL software is used to prepare the database of watershed characteristics, required by Hydrotel, such as elevation, land use, slope and soil type, among others [INRS, 2000]. Simulations can be done with a time step of 1 to 24 hours. Hydrotel offers the advantage of being used even with a minimum of meteorological data by adapting to the amount of data available. Hydrotel realizes the simulation of hydrological variables by six sub-models: the interpolation of meteorological data, the evolution of the snowpack, the potential evapotranspiration, the vertical water balance, the flow on the land part of the basin and flow through the river system. There are many hydrological studies which have employed Hydrotel as the hydrological model [Quilbé et al., 2008; Khalili et al., 2011; Ricard et al., 2013].

3.2 Reservoir management optimization

Optimisation of the Lièvre River water resources system was performed using a non-linear programming with recourse [Yeh, 1985] (also called two-stage non-linear programming). The objective function takes the form of a penalty function associated with violating target

reservoir levels. The approach explicitly takes into account ESPs in the optimization model. Each ESP is designed as an inflow tree with two stages. The first stage corresponds to the first day and the second stage represents the remaining forecasting period, in this case 149 days. The first stage solves a deterministic optimization problem, with the forecasted flow equal to the average of all members of the ESP from the first stage. The second stage consists of a deterministic optimization problem for each member of the ESP. In this stage, each objective function has $1/n$ probability, where n is the number of members of the ESP. The objective function of the second stage is the sum of the n weighted objective functions of the deterministic problems. The overall objective function is the sum of stage 1 and 2 objective functions. The optimization problems of the second stage share the same initial conditions, which are the volumes of water of the three reservoirs of the Lièvre water resources system, obtained after reservoir releases from the first stage. The solutions for the two-stage non-linear problem are the optimal releases at the first and second stage.

3.3 Simulation of the flow of the Ottawa River

Hydrotel simulates natural flow regimes. However, the Ottawa River is highly regulated and it is difficult to precisely know the management of all reservoirs. Since regulated flows are required entering the Montreal Archipelago, a simple model of the complex management of the Ottawa River water resources system is therefore needed to generate regulated flows from natural flows without having to explicitly account for all reservoirs of that system. A neural network approach [Govindaraju, 2000] was selected to simulate the management of the Ottawa River system. Previous studies have used artificial neural networking in hydrology [Smith and Eli (1995); Tokar and Markus (2000); Gao et al. (2010)].

The use of a neural network to simulate regulated flows in the Ottawa River upstream of the Lièvre River involves the hypothesis that reservoir releases are affected by hydroclimatological conditions. The following four hydroclimatological variables were used to build and drive the network: simulated snow water equivalent (SWE); simulated flows from Hydrotel; accumulative degree-days of the last 10 days; and cumulated precipitation of the last 10 days from the CRCM. Historical data (1981-2009) were used for the learning stage. The simulation stage was conducted over the periods 1990-1999 and 2059-2068. A description of

the neural network and an evaluation of its performance can be found respectively in Leconte et al. (2012) and in Huaranga and Leconte (2012).

3.4 Water balance of the Montreal Archipelago

The CEHQ developed a water balance model of the Montreal Archipelago. Flows from the Ottawa River enter the northern part of the archipelago into Deux Montagnes Lake. Flows from the St. Lawrence River enter the southern part of the archipelago into St-Louis Lake. A simplification to the model was made by disconnecting the southern part of the archipelago, as inflows from the St. Lawrence River were not available under CC conditions and required extensive hydrological modelling. Instead, rating curves were developed to calculate flows out of Deux Montagnes Lake and into St-Louis Lake. The simplified model made it possible to link the Ottawa and Mille-Iles River flows through storage into Deux Montagnes Lake, as required by the water system management tool (Figure 3.2).

The link between the northern and southern part of the archipelago are the rating curves available for Vaudreuil and Sainte-Anne-de-Bellevue which are dependent on both the Deux Montagnes Lake water level, and the St. Louis Lake water level. Thus, to simulate only the northern part of the archipelago, new rating curves for Vaudreuil and Sainte-Anne-de-Bellevue were determined from the Deux Montagnes Lake water level only. To determine these new relationships, observed flows are used in Deux Montagnes Lake and in St. Louis Lake. These flows are expressed in terms of Deux Montagnes Lake water level only. A quadratic relationship is then calculated for Vaudreuil and in Ste-Anne-de-Bellevue. A coefficient of determination (R^2) of 0.91 is obtained for the relationship in Ste-Anne-de-Bellevue and 0.95 in Vaudreuil.

3.5 Flood control in the Montreal Archipelago

As mentioned above, a control structure exists at the entrance of the Mille-Iles River to limit the maximum flow to 780 m³/s. Therefore, flooding along the Mille-Iles River is much reduced; however, it is to the detriment of an increase of the water level in Deux Montagnes Lake if nothing else is done. Temporarily retaining water in the Lièvre system aims for reducing the impact of the control structure on the water level in the lake, hence on the Montreal Archipelago. The question that arises is how much water should, or can, be held

within the Lièvre River system to alleviate the risk of flooding in the archipelago while also avoiding or limiting flooding in the Lièvre River watershed.

Under uncontrolled conditions, the flow at the entrance of the Mille-Iles River depends entirely on the water level in Deux Montagnes Lake. Under controlled conditions, the flow entering the Mille-Iles River is limited to 780 m³/s by the control structure and is therefore independent from the level of the lake. This control causes an increase of the lake level, and consequently an increase of the Des Prairies River flow and of the flow leaving Deux Montagnes Lake into St-Louis Lake. The water balance model calculates, on a daily basis, the total flow exiting Deux Montagnes Lake under uncontrolled and controlled conditions. The difference between these two flow values, referred to as the ‘maximum flow reduction’, is used to propose a flow reduction value at the Lièvre Watershed outlet. When the maximum reduction is positive, that is when the control structure effectively limits flows entering the Mille-Iles River to 780 m³/s, a re-optimization is performed to establish new reservoir releases that will try to satisfy reservoir level constraints in the Lièvre River system. A minimum flow constraint is also imposed at the watershed outlet, which may limit flow reduction during the feedback process.

A flow reduction value of 30% of the maximum flow reduction was evaluated in this study. The aim was to test the performance of the reservoirs of the Lièvre River system to reduce flooding in the Montreal Archipelago. Corresponding water volumes temporarily retained in the reservoirs of the Lièvre River system following the feedback process were computed. Vulnerability and reliability reservoir performance indicators were computed according to Simonovic and Li (2003). Vulnerability is an indicator of the severity of an unsatisfactory state and was computed as the maximum difference between a reference water level value and a value exceeding this level. This indicator is estimated as:

$$\beta_y = \begin{cases} 0 & \text{if } V_t \leq V_f \\ \text{Max}(V_t - V_f) & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

where β_y is the reservoir vulnerability, V_t is reference value (level of flow) at time t , and V_f is simulated value (level or flow).

Reservoir reliability, which is usually defined as the probability of no-failure reservoir operations, was computed here as the probability of not exceeding the upper level constraint in a given day, calculated as:

$$\alpha = \frac{1}{NS} \sum_{t=1}^{NS} Z_t \mid \begin{matrix} Z_t=1 & \forall x_t \in S \\ Z_t=0 & \forall x_t \in F \end{matrix} \quad (2)$$

where α is reliability, NS is the number of days of a time period, Z_t is the state of the system at time t, S is a satisfactory state and F is an unsatisfactory state.

4. Application of the reservoir management tool

4.1 Climate projections

Temperature and precipitation data under current (1961-2000) and future (2041-2070) climates came from the Canadian Regional Climate Model (CRCM) (Caya and Laprise, 1999), Version 4.2. Climate projections provided by the Ouranos consortium on regional climatology and adaptation to climate change located in Montreal, Canada, consisted of five members of the CRCM driven by the Coupled Global Climate Model, CGCM3 (McFarlane et al. 1992), using the greenhouse gas emissions scenario SRES A2, which is at the higher end of the SRES emission scenarios. Normally, the complete set of climate projections available for a study has several individual projections. Each individual projection within it is called a member. In our study, there are five members from CRCM providing a sufficient number of members for an efficient climate change study.

Despite the increasing use of regional climate models in hydrological climate change impact studies, their application is challenging due to the risk of considerable biases. The reasons for such biases include systematic model errors caused by imperfect conceptualization, discretization and spatial averaging within grid cells. This makes the use of regional climate model simulations as direct input data for hydrological impact studies more complicated. Several bias correction methods have been developed in recent times [Teutschbein et Seibert, 2012]. In our study, a bias correction on temperature and precipitation was performed to adjust simulated current and future climates, using observations of the current climate. For temperature, the difference between the observed average monthly temperatures and the simulated average monthly temperatures for the current climate was applied to the daily

simulated data for the future and current climate. Precipitation was adjusted for monthly frequency and for average monthly intensity using the Local Intensity Scaling method (Schmidli et al. 2006).

Figure 3.3 shows that temperatures are higher in a future climate. The envelopes show the climate variability for 50 years of simulation (i.e. 10 years of simulations by each CRCM member). A greater variability is noted during the winter season. Average maximum and minimum temperatures reach zero degree approximately two and three weeks earlier, respectively, for the future climate scenarios considered.

Figure 3.3 also shows corresponding monthly average precipitation for current and future climates. Precipitation during autumn, winter and spring are higher in the future, whereas summer precipitation is smaller. Whiskers represent monthly variability combining the five CRCM members.

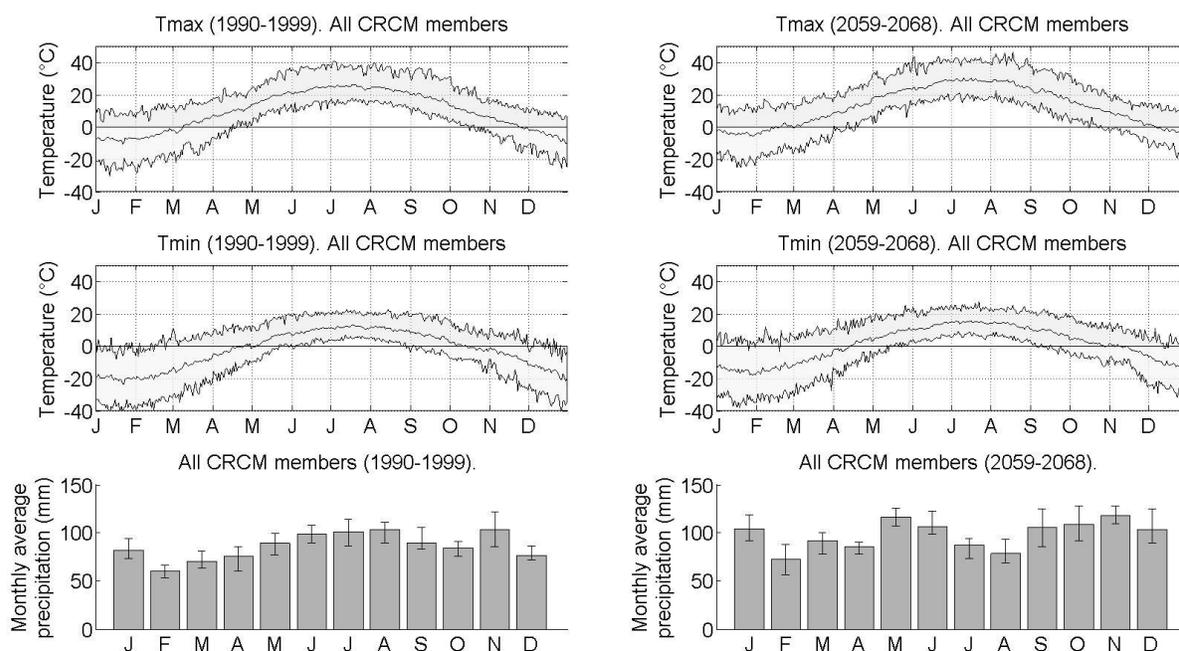


Figure 3.3 Minimum and maximum temperatures and monthly average precipitation for the Lièvre River Watershed.

4.2 Hydrological impact: Inflows

Annual average simulated inflows to the Mitchinamecus, Kiamika and Poisson Blanc reservoirs for the current and future climates show that the snow melting period comes

approximately three weeks earlier (Figure 3.4). Future fall inflows would be larger in upstream reservoirs only. Future winter inflows would be larger, which is coherent with an anticipated increase in liquid precipitation and mid-winter thaw events. Summer inflows would be smaller because of smaller precipitation in the future and increased evapotranspiration. In general, there is higher flow variability in future winter seasons as a result of more numerous and severe mid-winter thaw events.

A trend in spring peak flood magnitude is not obvious upon investigating the natural inflows at each reservoir, as two counteracting effects act simultaneously: higher winter precipitation, which tends to increase the maximum snow pack, and higher winter temperatures, which tend to reduce the maximum snowpack and the spring peak flood.

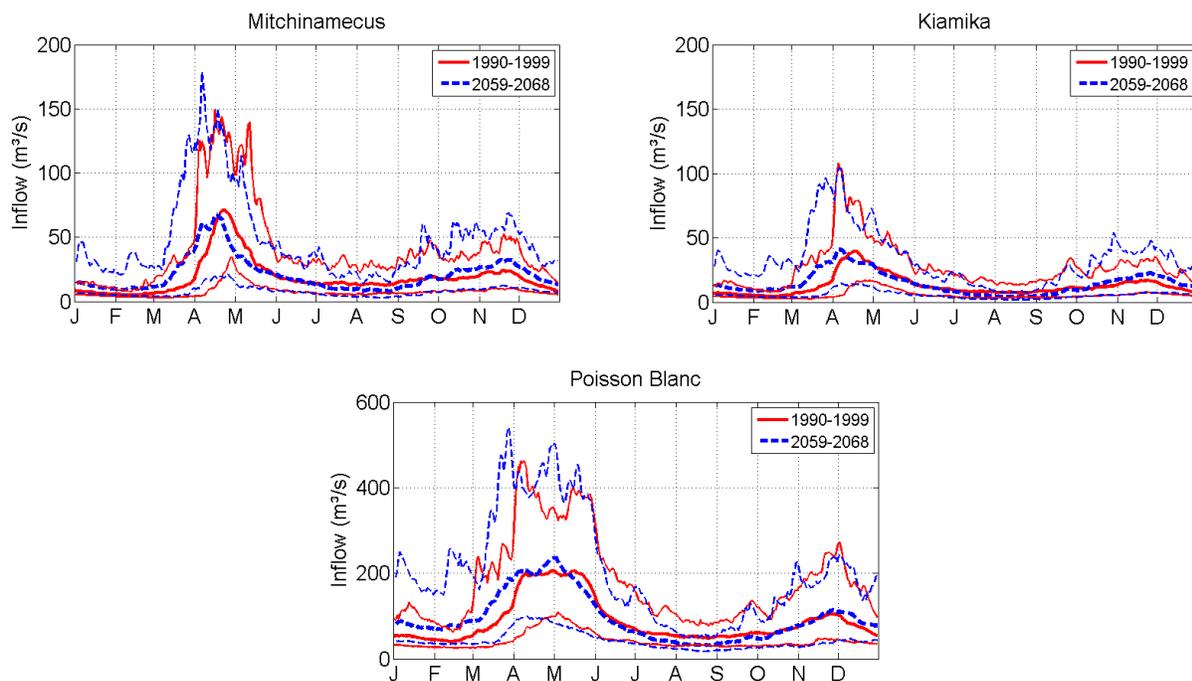


Figure 3.4 Simulation of inflows at the three reservoirs using five CRCM members. Bold lines correspond to average inflows and thin lines to minimum and maximum inflows

4.3 Climate change impacts on the Lièvre water resources system

In general, it was found that the average water levels for the three reservoirs were within the lower and upper level constraints in the current and future climates Figure 3.5. There is also greater variability in the future climate during the fall and winter seasons. These simulations were performed using the feedback process.

During the winter season, the Mitchinamecus reservoir has a lower level in the future climate compared to the current climate (Figure 3.5a). In the spring season, the reservoir fills sooner in the future climate in response to earlier snow melting. The minimum level constraint imposed during the summer season, which is intended to provide a suitable water level for resort activities, is low enough to give flexibility to limit exceedance of the maximum level constraint.

The behavior of Kiamika reservoir is very similar to the Mitchinamecus reservoir (Figure 3.5b). In the winter season, it displays a lower level for the future climate scenarios investigated compared to current climate conditions. The occurrence of an early spring in the future climate also produces a corresponding earlier reservoir filling in the future climate.

The Poisson Blanc reservoir is more heavily constrained in terms of minimum and maximum water levels as compared to the Mitchinamecus and Kiamika reservoirs (Figure 3.5c). The difference between the minimum and maximum water levels during the summer season for recreational activities is only 1.4 meters. Also, a ‘flood reserve’ is provided during April to help reduce flooding in the Montreal Archipelago. Despite these constraints, the water resources optimization model managed to regulate the reservoir without violating the constraints for current and future climate conditions. As with the Mitchinamecus and Kiamika reservoirs, the Poisson Blanc reservoir fills earlier under future climate conditions as compared to current climate conditions.

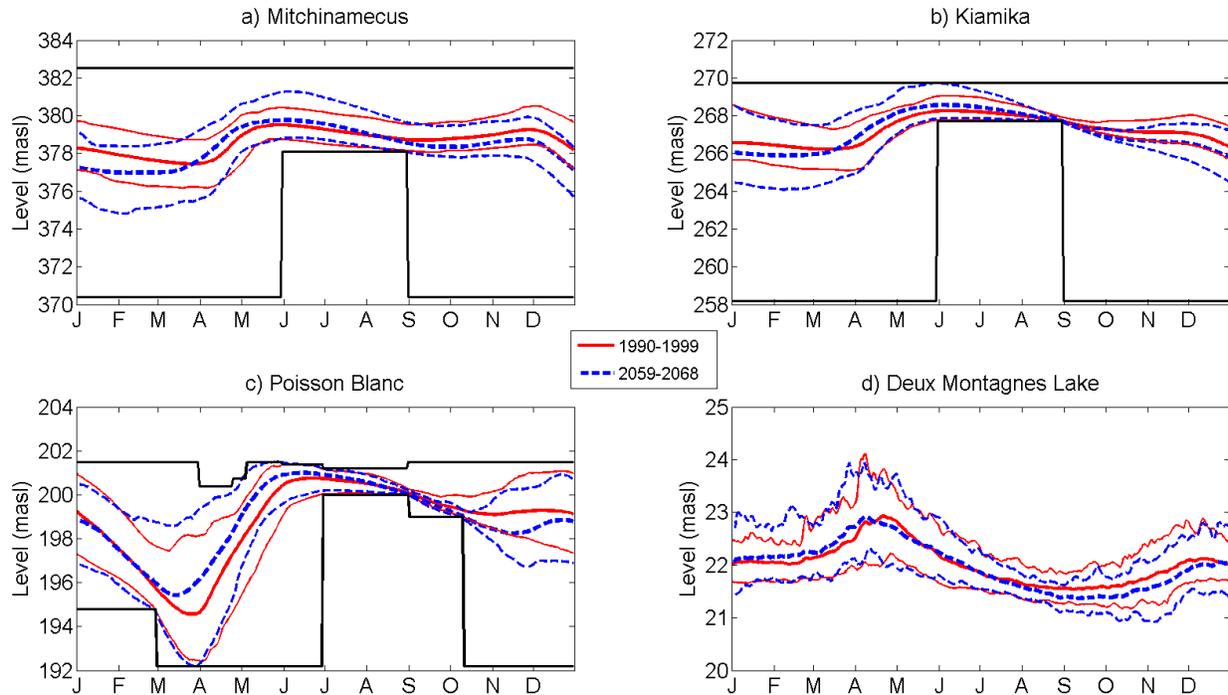


Figure 3.5 Simulation of average water levels in three reservoirs and in Deux Montagnes Lake. Bold lines correspond to average inflows and thin lines to minimum and maximum inflows. Upper and lower reservoir water level constraints as imposed by the CEHQ are also shown in Figure 3.5 a-c

Deux Montagnes Lake also has an early spring flood in the future climate analysed (Figure 3.5d). Water levels are lower in the summer and autumn seasons under future conditions, while levels are higher during the winter season, in response to changes in the hydrological regime of the Lièvre River (Figure 3.4) and Ottawa River (not shown here) watersheds.

Figure 3.6 shows the average annual volume stored in the Lièvre system to limit flooding in the Montreal Archipelago with a 30% maximum flow reduction. Results are presented for each CRCM member. Simulations show a higher volume of water retained in the future than in current climate conditions for all but one CRCM member (Member 3). The increase is the result of higher flow volumes and flow rate variability in the future. Because Mitchinamecus and Kiamika reservoirs are smaller and located in the headwaters of the Lièvre Watershed, their combined contribution remained modest as compared to that of the Poisson Blanc reservoir, with 5% of the total water retention for the current climate and 10% for the future climate investigated.

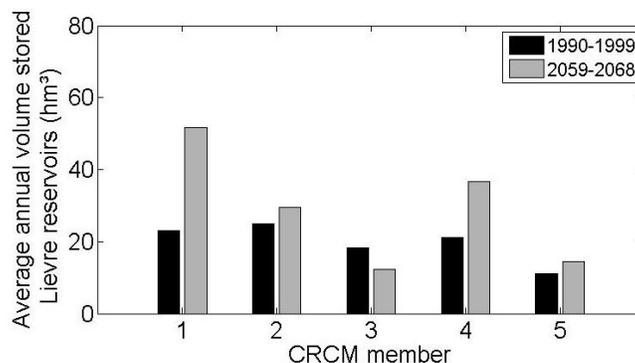


Figure 3.6 Volume stored as a result of limiting floods in the Montreal Archipelago, with a 30% maximum flow reduction under the current climate (1990-1999) and future climate (2059-2068).

The reliability of the Poisson Blanc reservoir was found to be 99% with both 0 and 30% of the maximum flow reduction under current climate conditions, while for future climate reliability it would drop respectively to 98% and 96%. Accordingly, vulnerability under current climate conditions reaches 9 cm, while for future climate, it would reach 29 cm with no feedback and to 169 cm with 30% of the maximum flow reduction. Reliability and vulnerability of the Mitchinamecus reservoir would be 100% and 0 cm, with and without feedback and for both current and future climates. Lastly, the Kiamika reservoir has 100% reliability and 0 cm vulnerability for current climate conditions with and without feedback. In future climate, it would drop to 98% reliability and 66 cm vulnerability without feedback, and to 95% reliability and 73 cm vulnerability with 30% of the maximum flow reduction.

4.4 Adaptation to climatic change

Temporal shifts of water level constraints in the reservoirs were used as potential adaptation measures to CC (Figure 3.7) for the Poisson Blanc reservoir. In this figure, simulated levels using one CRCM member (#3) for a 10-year period under future climate conditions are presented with a 30% flow reduction to mitigate flooding in the Montreal Archipelago. The reference simulation, i.e. with no modifications to the water level constraints, is shown in Figure 3.7a. Figure 3.7b illustrates the effect of shifting the level constraint by three weeks to adjust to summer-related recreational activities, which would be starting earlier in a changed climate. Figure 3.7c is similar to Figure 3.7b except that the late summer constraint was kept identical to the reference simulation. Figure 3.7d is identical to Figure 3.7c except for the flood reserve constraint during the April period, which was removed.

Figure 3.7b shows that a temporal shift of water level constraints leads to a significant increase in the variability of the water level in the Poisson Blanc reservoir during the fall season. The simulated fall level variability is about 4 meters under current climate conditions, while it exceeds 5 meters when a 3-week shift in the water level constraints is applied (Figure 3.7b). Such conditions may not be desirable if the reservoir operator wishes to establish a stable ice cover, e.g. for winter recreational activities. Note that the temporal shift only marginally affected the filling of the Poisson Blanc reservoir.

Figure 3.7c clearly illustrates a decrease in seasonal variability by keeping the end of the summer water level constraint identical to the reference simulation. Finally, removing the flood reserve constraint had no effect on the simulated reservoir levels (Figure 3.7d). It appears that the reservoir management tool, coupled with hydrological ESPs, efficiently managed the Lièvre River system, without having to resort to imposing a flood reserve constraint to help reduce floods in the Montreal Archipelago.

Finally, the value of the average reliability of 10 years is 99.9 %, for the simulation of Figure 3.7b. The maximum vulnerability for the same simulation is 2 cm. In the other three simulations (Figure 3.7 a, c, and d), the average reliability is 100 % and the maximum vulnerability is 1 cm.

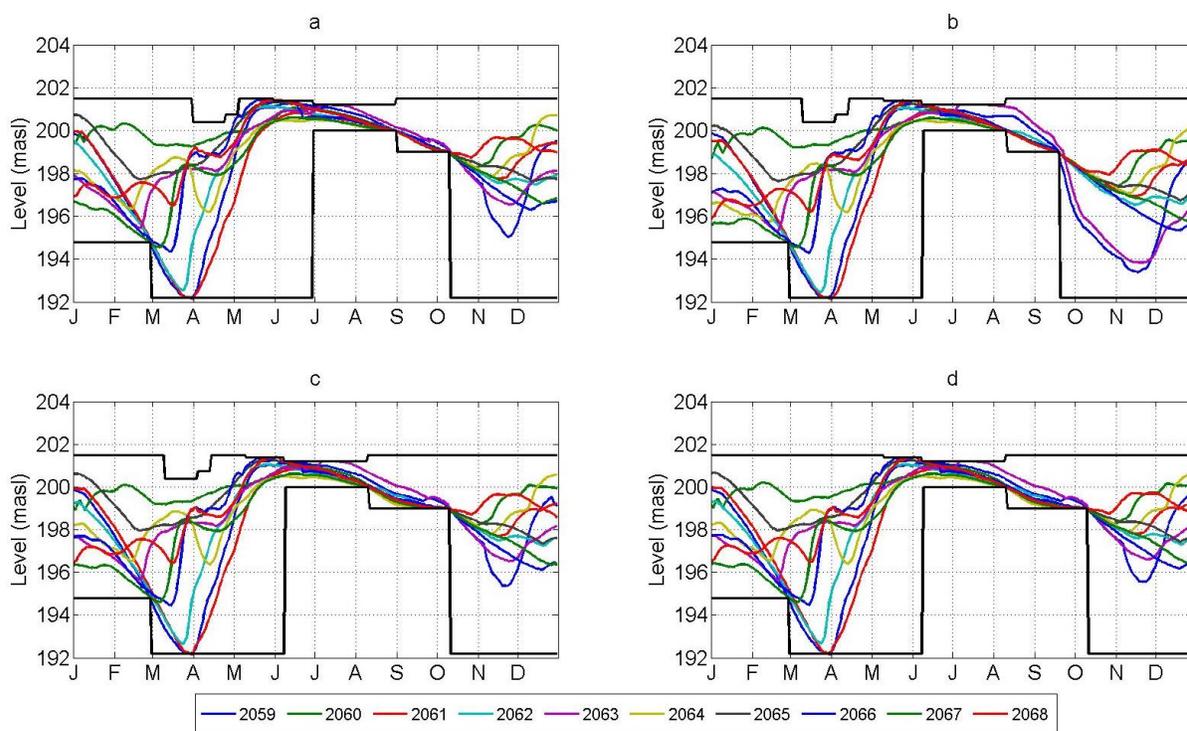


Figure 3.7 Adaptation strategies to CC. a) reference simulation; b) simulations with a three-week shift of summer water level constraints; c) same as panel b except keeping the end of the summer minimum water level constraint identical to the reference simulation; and d) same as panel c but without the flood reserve constraint.

5. Discussion

CC will modify the hydrological regime of the Lièvre River watershed, and its reservoirs will need to be managed accordingly. Based on the CC projections used in this study, the hydrological impact of CC will produce an earlier arrival of the spring flood by about three weeks. Temperatures will rise earlier, which will directly impact the timing of snowmelt. Similar results were obtained for the period 2040-2069 for the 28200 km² Peribonka River watershed, located north and east of the Lièvre River watershed (source: 52°16'17''N, 70°48'38''W; mouth: 48°44'49''N, 72°06'13''W), where an average shift of 20 days was obtained [Minville *et al.*, 2009]. In our study, a trend in the volume of spring runoff could not be clearly identified, due to the counteracting effects of increased winter precipitation and temperature on the melted volumes. December-March average runoff would be considerably higher under CC conditions, by as much as 36% for the CC projections used in this study. Average fall discharge would decrease, by 2% between September and November, as the projected increase in evapotranspiration would offset the projected increases in precipitation.

Simulation results indicate that reservoir emptying and filling in the Lièvre River system would be impacted by CC. Moreover, reservoir levels would be higher in a future climate, as a consequence of larger annual inflows. A direct consequence is that reliability would decrease and vulnerability would increase in the Poisson Blanc reservoir, and to a lesser extent in the Kiamika reservoir, under future climate conditions. Water constraints in the Mitchinamecus reservoir would not be violated under future climate conditions as this reservoir, located in the headwaters of the Lièvre Watershed, is subject to less stringent upper and lower water level boundaries. The additional volume temporarily stored in the Lièvre River system to limit flooding of the Montreal Archipelago would be larger due to greater water availability.

These impacts of CC should prompt measures to adapt reservoir management. The temporal shift of water level constraints is the adaptation measure explored in this study.

Shifting the water reservoir constraints by three weeks for summer recreational activities only marginally affected the filling of the reservoirs. However, an increased variability in levels was observed during the fall season. This problem was solved by maintaining the same minimum water level constraint relative to current climate conditions. Further shifting of this constraint later in the fall could be envisioned, as recreational activities would probably occur later in the season. This adaptation measure was not scrutinized here, but can be easily investigated using our water system management tool. Other strategies, such as lowering the minimum water level constraint in the summer season, could be explored as a means to increase reservoir reliability and reduce vulnerability, as well as to provide more flexibility for coping with downstream flooding in the Montreal Archipelago. This will be the subject of future research.

It is important to note that the projected impacts above were generated using five members of a single regional climate model driven by one GCM. Although the analysis included uncertainties due to natural climate variability, other sources of uncertainties (GCM structure, greenhouse gas emissions scenarios, spatial downscaling of the GCM projections, and hydrological model structure and parameters) were not addressed in this study. A more thorough uncertainty analysis would enable assessing the response of the Lièvre River system to diverse climate change impact scenarios. The management tool has the flexibility to address this issue. A complete evaluation of the relative importance of each of these sources of

uncertainty on projected hydrological regimes in a Canadian watershed can be found in Chen *et al.* [2011]. They identified the GCM structure as a major source of uncertainty, which was also confirmed in other studies (e.g. Wilby and Harris, 2006).

Water resources managers use management rules developed from hydrological conditions reflecting the current climate. They also make planning decisions based on the recent past. In this study, it was demonstrated that future hydrological regimes in the Lièvre River watershed will differ from current conditions. Accordingly, it was shown that water level constraints for the reservoirs of the Lièvre River system should be changed to better reflect both changes in hydrological regimes and in recreational activities. Although our model results suggest that trends in the hydrological regimes will occur gradually, which is also confirmed by numerous other impact studies (e.g. Minville *et al.*, 2010a), changes in flow variability are probably of greater concern; managers should now start analysing the potential consequences of these impacts on the operation of their water resources systems to identify whether reservoir vulnerability will increase in the future. Also, they should evaluate whether adaptation strategies, such as the ones examined in this study, can be implemented to decrease the vulnerability to CC conditions. In other words, managers should start taking into account projected inflows and act accordingly to deal with the hydrological impacts of CC. It is important that such studies be undertaken using multiple climate projections from various climate models. This will ensure the evaluation of the sensitivity of the reservoir dynamics to projected temperature and precipitation regimes and to identify whether proposed adaptation strategies would be robust and flexible enough to cope with the more extreme CC projections. The water management tool developed here allows for such studies to be efficiently carried out.

6. Conclusion

A reservoir management tool that uses a reservoir optimization model was used to manage the reservoirs of the Lièvre River while reducing the risk of flooding in the Montreal Archipelago. An analysis of the impact and adaptation strategies to CC was performed, and it revealed that the Lièvre River system would be more vulnerable in a CC context and that adaptation strategies can be implemented to better adjust to the anticipated hydrological regime.

Other improvements can be made to the reservoir management tool developed in this project. For example, it is possible, using ESPs, to forecast potential floods and to start storing water, days ahead, in the Lièvre River system to further relieve flooding in the Montreal Archipelago. This could be done, for example, by starting the feedback process earlier, i.e. by storing water in the reservoirs of the Lièvre River system, rather than waiting until flows at the Mille-Iles River exceed the flooding threshold of 780 m³/s. Explicitly considering Deux Montagnes Lake in the optimisation model as a fourth reservoir would also help optimizing the system for flood control. From an operational point of view, it is advantageous to formally include forecast and optimisation in the tools available for making decisions. Finally, because it can be used to optimize the management of a water resources system under current climate conditions and to explore its performance for future climate scenarios, the reservoir management tool presented in this study can be seen as an effective way to adapt to CC as well as a no-regrets strategy.

Acknowledgements

This research was supported by funds from the 2006-2012 Quebec's Climate change Action Plan. The authors wish to thank the Ouranos Consortium on Regional Climatology and Adaptation to Climate Change and the Centre d'expertise hydrique du Québec for their contribution to the production of climate change projections.

CHAPITRE 4 RÉSULTATS SUPPLÉMENTAIRES

4.1 Vulnérabilité et fiabilité des réservoirs.

La vulnérabilité et la fiabilité minimale et maximale des trois réservoirs, sont présentées au Tableau 4.1 pour la période de référence et en climat futur en tenant compte des cinq membres du MRCC. La conclusion principale révèle que les réservoirs Kiamika et Mitchinamecus présentent une bonne marge de manœuvre, mais celui du Poisson Blanc possède, quant à lui, une marge de manœuvre plus restreinte. L'annexe A présente la vulnérabilité et la fiabilité annuelles des trois réservoirs, évaluées sans rétroaction et avec rétroaction (30 %, 50 % et 100 % de la réduction du débit maximal), en climat présent et futur, pour chaque membre du MRCC. Au fur et à mesure que le pourcentage de réduction du débit maximal augmente, d'une part, la vulnérabilité augmente et d'autre part, la fiabilité diminue.

Tableau 4.1 Résumé de la fiabilité et de la vulnérabilité annuelle des réservoirs de la rivière du Lièvre.

FIABILITÉ (%)							
% RDM	Climat	Poisson Blanc		Mitchinamecus		Kiamika	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
30	Référence	98.6	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	Futur	87.9	100.0	100.0	100.0	88.8	100.0
50	Référence	97.8	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	Futur	84.1	100.0	100.0	100.0	81.6	100.0
100	Référence	92.3	100.0	100.0	100.0	97.0	100.0
	Futur	83.3	100.0	97.0	100.0	81.1	100.0
VULNÉRABILITÉ (m)							
% RDM	Climat	Poisson Blanc		Mitchinamecus		Kiamika	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max
30	Référence	0.000	0.088	0.000	0.000	0.000	0.000
	Futur	0.000	1.688	0.000	0.000	0.000	0.731
50	Référence	0.000	0.088	0.000	0.000	0.000	0.000
	Futur	0.000	2.627	0.000	0.000	0.000	1.079
100	Référence	0.000	1.218	0.000	0.000	0.000	0.110
	Futur	0.000	3.156	0.000	0.165	0.000	1.472

4.2 Volume retenu dans les réservoirs et volume enlevé en aval du système du Lièvre.

Les volumes stockés dans les réservoirs afin de limiter les inondations de la rivière des Mille-Îles ont été un des paramètres importants à déterminer. Effectivement, l'outil de gestion développé dans ce projet vise à limiter les inondations sur l'archipel de Montréal, et conséquemment, il est nécessaire d'estimer le volume d'eau que le système du Lièvre peut retenir. Pour déterminer les volumes stockés dans les réservoirs afin de limiter les inondations sur la rivière des Mille-Îles, quatre simulations ont été réalisées : trois simulations utilisant une rétroaction respectivement de 30 %, 50 % et 100 % de la réduction du débit maximal (RDM) et une autre, cette fois, sans la rétroaction.

La façon de calculer ces volumes s'avère assez simple. Premièrement, les niveaux simulés sont convertis en volume d'eau, grâce aux courbes de Niveau-Volume fournies par le CEHQ. Ensuite, la variation de volume journalière est calculée (hm^3/j) pour toutes les simulations disponibles. Pour déterminer le volume stocké causé par la rétroaction à 30 % de la RDM, une soustraction entre la variation de volume journalière obtenue à 30 % de la RDM et la variation de volume journalière sans rétroaction a été réalisée. Les valeurs positives de cette soustraction représentent le volume d'eau stocké dans les réservoirs grâce à la rétroaction, alors que les valeurs négatives représentent le déstockage des réservoirs. Donc, seuls les volumes positifs ont été additionnés pour le calcul de volume retenu sur les réservoirs. Les volumes stockés en raison de l'effet de la rétroaction à 50 % et 100 % de la RDM ont été calculés de la même façon. La même méthodologie a été utilisée pour le calcul des volumes enlevés à la rivière des Prairies, à la rivière des Mille-Îles et à l'écoulement du lac des Deux Montagnes vers le lac Saint-Louis (Ste-Anne-de-Bellevue et Vaudreuil), mais en faisant la conversion des débits en volumes. Les volumes enlevés du lac des Deux Montagnes ont aussi été calculés de la même façon que les volumes retenus dans les réservoirs. Le Tableau 4.2 montre les volumes totaux retenus dans les trois réservoirs, pendant les dix années de simulation, et les volumes totaux enlevés du lac des Deux Montagnes et des sorties du lac, pendant les dix années de simulation.

Tableau 4.2 Volume retenu dans les réservoirs et volume enlevé en aval du système du Lièvre

VOLUME RETENU (hm ³) DANS LES RÉSERVOIRS ET VOLUME ENLEVÉ EN AVAL DU SYSTÈME DU LIÈVRE					
Réservoirs /Lac/ Rivières et écoulement	Période	Membre	Total 10 ans		
			30 % RDM	50 % RDM	100 % RDM
Poisson Blanc	Référence (1990-1999)	1	211	316	550
		2	234	344	629
		3	177	282	465
		4	200	308	512
		5	108	172	302
	Futur (2059-2068)	1	437	713	1111
		2	269	406	710
		3	118	164	283
		4	320	513	949
		5	134	199	407
Kiamika	Référence (1990-1999)	1	8	10	37
		2	9	23	70
		3	3	4	24
		4	4	5	23
		5	1	2	10
	Futur (2059-2068)	1	41	70	99
		2	14	20	56
		3	2	1	4
		4	18	28	104
		5	5	11	45
Mitchinamecus	Référence (1990-1999)	1	10	15	63
		2	7	19	90
		3	2	3	36
		4	8	4	31
		5	1	1	16
	Futur (2059-2068)	1	38	67	103
		2	13	20	71
		3	3	6	10
		4	28	61	147
		5	6	14	34
Lac des Deux Montagnes	Référence (1990-1999)	1	54	74	117
		2	63	86	130
		3	37	57	96
		4	45	58	76
		5	25	35	66
	Futur (2059-2068)	1	87	104	189
		2	60	85	121
		3	50	58	83
		4	80	105	175
		5	46	60	91
Rivières des Mille-Îles et des Prairies et écoulement du lac des Deux Montagnes vers le lac Saint-Louis	Référence (1990-1999)	1	201	310	575
		2	241	364	688
		3	176	276	495
		4	199	311	556
		5	106	168	313
	Futur (2059-2068)	1	435	694	1366
		2	239	366	664
		3	134	184	303
		4	341	531	1039
		5	126	187	382

Les volumes enlevés du lac des Deux Montagnes et ceux des sorties du lac sont une conséquence directe de l'action de rétention de l'eau dans les trois réservoirs du système hydrique de la rivière du Lièvre. Le Tableau 4.2 montre les volumes, pour chaque membre, en période de référence et en période de changement climatique. Dans ce tableau, il est possible de voir que le réservoir du Poisson Blanc retient plus d'eau, par rapport aux deux autres réservoirs. Au fur et mesure qu'augmente le pourcentage de la RDM utilisé, le volume d'eau retenu augmente aussi. L'annexe B présente cinq tableaux qui exposent les volumes annuels stockés dans les réservoirs et les volumes enlevés, en aval du système hydrique de la rivière du Lièvre.

4.2.1 Bilan hydrique

Pour vérifier l'exactitude des calculs de volumes retenus sur les réservoirs résultant des volumes enlevés du lac des Deux Montagnes, les volumes enlevés des rivières et des écoulements du lac des Deux Montagnes sont nécessaires (Tableau 4.2). L'addition des volumes retenus sur les réservoirs, moins le volume du lac des Deux Montagnes, moins les volumes des rivières Mille-Îles et des Prairies et des écoulements du lac, doivent équivaloir à zéro et ces résultats sont présentés au Tableau 4.3. Ce tableau montre que le bilan s'approche de zéro, cependant, le membre 1, en climat futur, donne un volume moyen annuel de 24 hm³, en utilisant la simulation à 100 % de la RDM.

Tableau 4.3 Vérification du bilan hydrique

VÉRIFICATION DU BILAN HYDRIQUE : VOLUME (hm ³)							
	Membre	30 % RMD		50 % RMD		100 % RMD	
		Total 10 ans	Moyen annuel	Total 10 ans	Moyen annuel	Total 10 ans	Moyen annuel
Référence (1990-1999)	1	-25	-2	-43	-4	-42	-4
	2	-55	-5	-64	-6	-29	-3
	3	-31	-3	-44	-4	-65	-7
	4	-32	-3	-51	-5	-65	-7
	5	-19	-2	-28	-3	-52	-5
Futur (2059-2068)	1	-4	0	51	5	-241	-24
	2	-3	0	-5	0	53	5
	3	-61	-6	-71	-7	-89	-9
	4	-55	-6	-34	-3	-14	-1
	5	-27	-3	-23	-2	14	1

En comparant les résultats du tableau des volumes annuels retenus par Poisson Blanc et ceux du tableau des volumes annuels sortant du lac (rivières et écoulement) fournis dans l'annexe

B, on note que le problème se retrouve à l'année 2063. La différence approximative de 235 hm³, notée à l'annexe B, peut résulter du fait que la courbe d'emmagasinement (relation niveau–volume) du Poisson Blanc est valide dans une plage se situant entre 192.18 m et 203.14 m. En haut de cette plage, des volumes comportent des erreurs. En observant la Figure 4.1, qui présente les niveaux du Poisson Blanc pour le premier membre du MRCC et pour l'année 2063, il est possible de voir que le niveau simulé dépasse le niveau 203.14 m durant plusieurs jours, et ce, en utilisant la rétroaction à 100 % de la RDM. Par contre, cette limite n'est dépassée que quelques jours en utilisant la rétroaction à 50 % de la RDM.

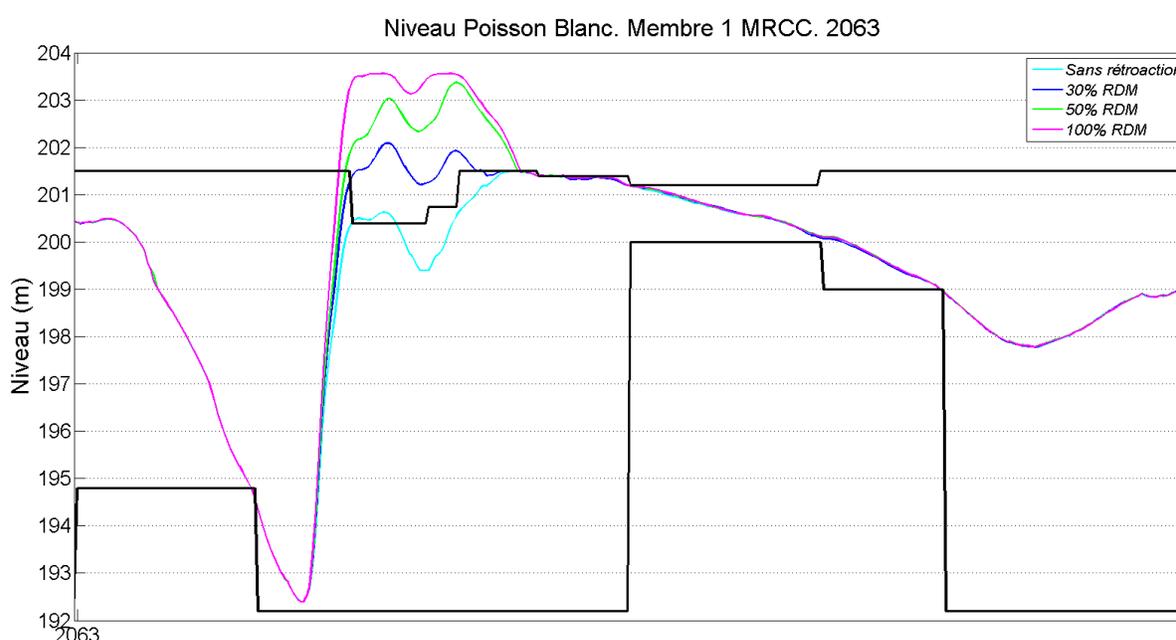


Figure 4.1 Niveau Poisson Blanc en utilisant 30%, 50 % et 100 % de la RDM et sans rétroaction. Membre 1 MRCC. Futur (2063).

En conclusion, le bilan est conservé pour l'ensemble des simulations, à l'exception du premier membre, en période future. La cause en est attribuée à un dépassement significatif de la borne maximale de la courbe d'emmagasinement de ce réservoir pour une année de la simulation, soit l'année 2063.

4.2.2 Volume stocké dans le système de la rivière du Lièvre.

La Figure 4.2 montre le volume annuel moyen stocké sur le système de la rivière du Lièvre dans le but de limiter les inondations dans la rivière des Mille-Îles. Ces figures comparent la

période de référence et la période future, pour les simulations à 30 %, 50 % et 100 % de la RDM. Ce volume est obtenu par l'addition des volumes annuels moyens retenus par les réservoirs Poisson Blanc, Kiamika et Mitchinamecus. Les simulations en période de changements climatiques montrent qu'une plus grande quantité d'eau est retenue dans les réservoirs, par rapport à la période de référence. Ce résultat s'explique par l'obtention d'une plus grande hydraulicité pour la période future.

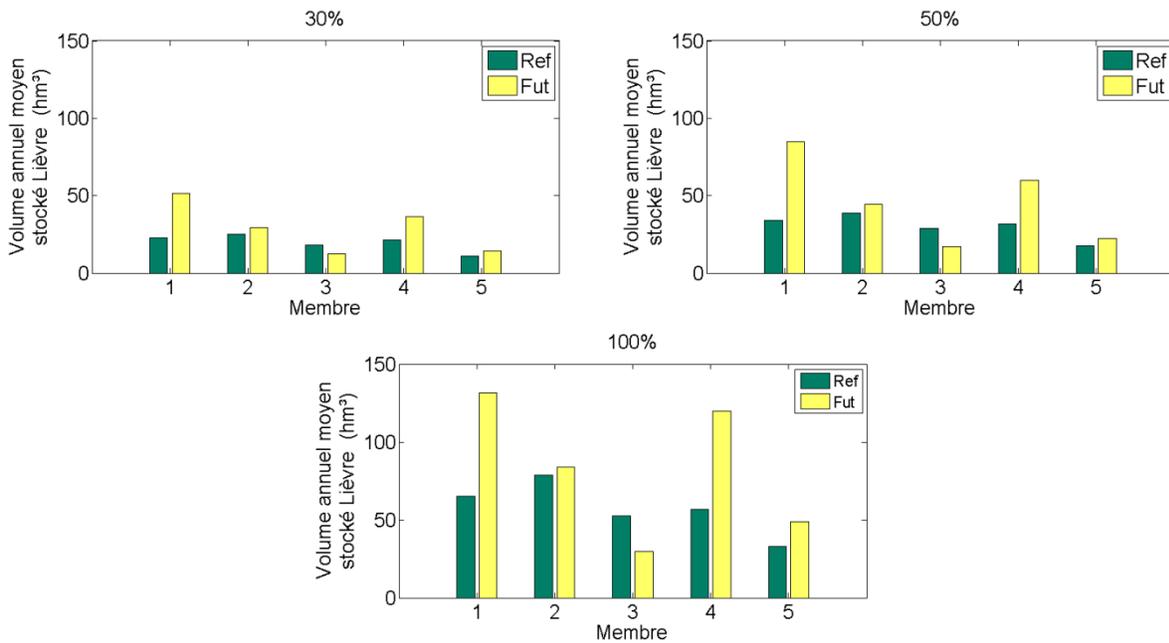


Figure 4.2 Volume stocké dans les réservoirs de la rivière du Lièvre

D'un autre côté, l'influence du stockage d'eau, dans les réservoirs de la rivière du Lièvre et du barrage du Grand Moulin sur le lac des Deux Montagnes, est présentée à l'annexe C. On sait que la réduction des crues dans l'archipel passe aussi par la contribution d'autres réservoirs (Témiscamingue notamment). Cependant, étant donné que cette étude se limite aux réservoirs de la rivière du Lièvre, on ne prendra en considération que ces réservoirs.

4.2.3 Distribution de volume dans les trois réservoirs.

La répartition du volume moyen annuel retenu dans les réservoirs du bassin versant de la rivière du Lièvre, dans le but de limiter les inondations dans la rivière des Mille-Îles, est

présentée à la Figure 4.3, pour l'ensemble des cinq membres du MRCC. Ce pourcentage a été obtenu en calculant le volume d'eau que chaque réservoir retient, par rapport au volume total que les trois réservoirs retiennent. Cette figure présente les résultats pour la période de référence et en climat futur et aussi, par rapport au pourcentage de la RDM utilisé.

Ainsi, on peut observer que les pourcentages d'eau retenus par les trois réservoirs sont presque identiques, en utilisant la rétroaction à 30 % et 50 % de la RDM, en période de référence et en climat futur. Cependant, en utilisant la rétroaction à 100 % de la RDM, la distribution de volume varie. Dans ce cas, un moins grand pourcentage d'eau est retenu dans le réservoir Poisson Blanc et un plus grand pourcentage d'eau est retenu dans les deux autres réservoirs.

Étant donné que le réservoir Poisson Blanc est celui dont la marge de manœuvre est la plus restreinte, au fur et à mesure que la quantité d'eau à stocker augmente, celui-ci est sollicité de telle façon qu'il permet aux autres réservoirs de stocker davantage d'eau.

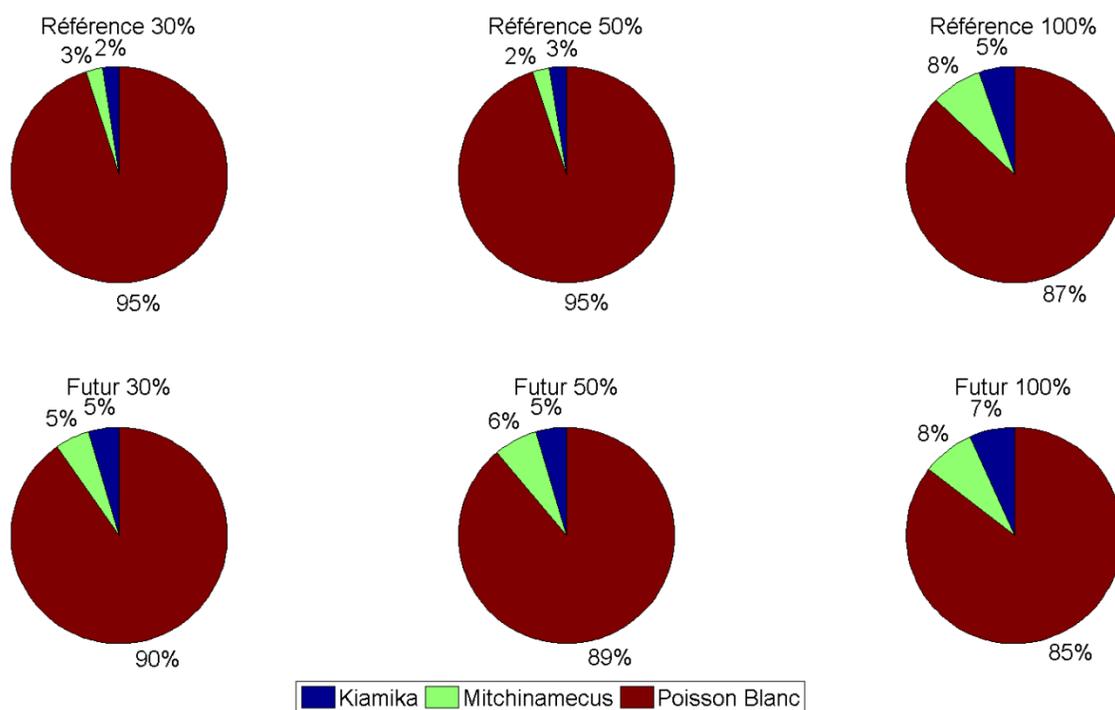


Figure 4.3 Distribution de volume sur le système hydrique de la rivière du Lièvre

4.3 Adaptation

Au chapitre 3, le décalage temporel des contraintes de niveau a été présenté pour le réservoir du Poisson Blanc, comme mesure d'adaptation à l'arrivée plus hâtive de la crue printanière en climat futur. Dans cette section, sont présentés les résultats des simulations des deux autres réservoirs. De façon globale, peu d'effets consécutifs au décalage temporel sont observés pour les réservoirs de Kiamika et Mitchinamecus. Cependant, Leconte *et al.* [2012] mentionnent que le réservoir de Kiamika commence à se vider aussitôt que la contrainte estivale sur les niveaux minimums est enlevée. On y suggère qu'il serait préférable d'allonger la période où cette contrainte est active, pour éviter une vidange prématurée du réservoir qui pourrait compromettre son usage à des fins récréatives. Dans cette section, les résultats de ces allongements des contraintes sont présentés. À la Figure 4.4 et la Figure 4.5, sont regroupées, à titre d'exemples, les simulations d'un membre du MRCC (le troisième) correspondant respectivement aux réservoirs Kiamika et Mitchinamecus.

La Figure 4.4a présente la simulation sans aucun décalage (simulation de référence). La Figure 4.4b montre la simulation en avançant les contraintes de niveau de trois semaines. La Figure 4.4c correspond à un avancement du début de la contrainte estivale de 3 semaines, mais en conservant la même date pour la fin de la contrainte estivale. Finalement, la Figure 4.4d est similaire à la Figure 4.4c, mais en retardant de trois semaines la fin de la contrainte estivale, ceci pour éviter une vidange prématurée jusqu'à la fin de septembre. En conclusion, l'allongement de la contrainte de niveau aide à maintenir le niveau du réservoir Kiamika élevé, par conséquent, à prolonger les conditions du réservoir afin qu'elles demeurent propices aux activités récréatives. Il est possible que la vidange de ce réservoir, après la contrainte de niveau minimale, augmente la sécurité face aux crues d'automne. Cependant, étant donné que les crues automnales sont de moindre intensité que les crues printanières, un allongement des contraintes de niveau ne semble pas menacer gravement la sécurité des crues d'automne.

La Figure 4.5 (a, b, c et d) présente pour le réservoir Mitchinamecus la même séquence de simulations que celle réalisée pour Kiamika. À nouveau, l'allongement de la contrainte minimale estivale aide à maintenir plus longtemps le niveau du réservoir pour assurer des conditions propices aux activités récréotouristiques. Les simulations indiquent que cette modification, pour tenir compte d'un éventuel allongement de la saison estivale, est sans

conséquence sur la vidange et le remplissage du réservoir lors des saisons hivernales et printanières, de même que sur la disponibilité d'une réserve de crue pour aider au contrôle des inondations dans l'archipel de Montréal. Finalement, l'allongement des contraintes de niveau (Figure 4.5d) ne démontre pas une grande variation des niveaux du réservoir, en raison de la plus grande marge de manœuvre que présente ce réservoir. Donc, la sécurité face aux crues d'automne ne semble pas être affectée.

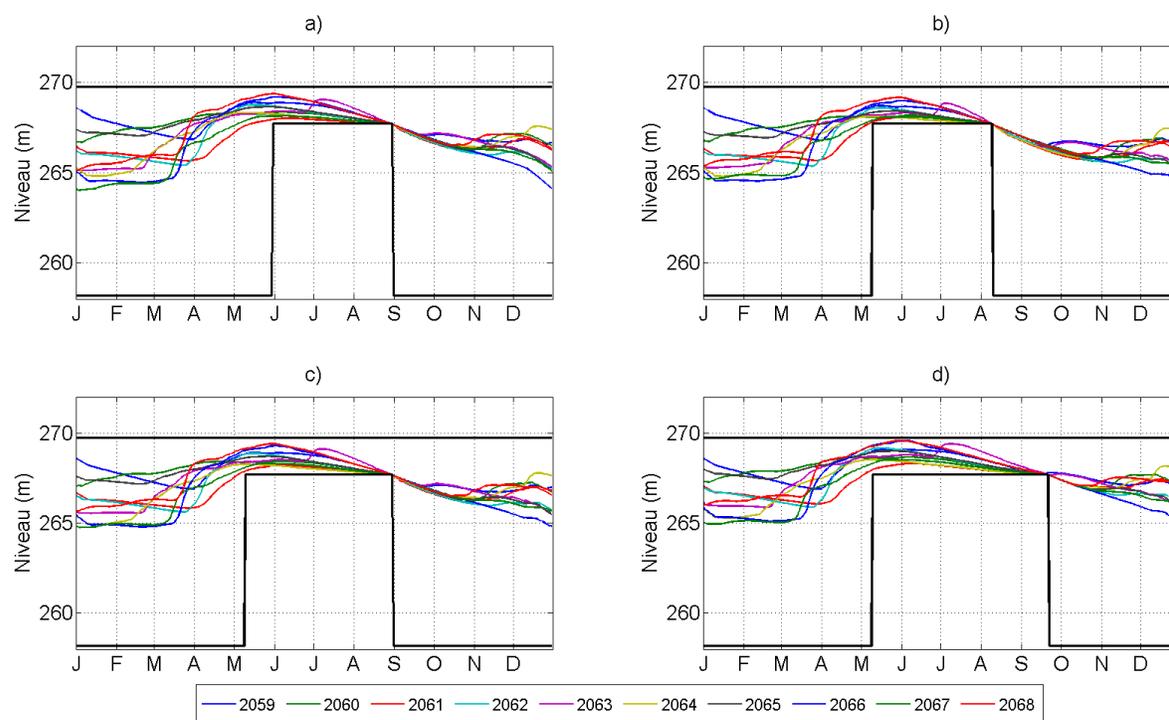


Figure 4.4 Décalage temporel des contraintes de niveau. Membre 3 MRCC. Kiamika

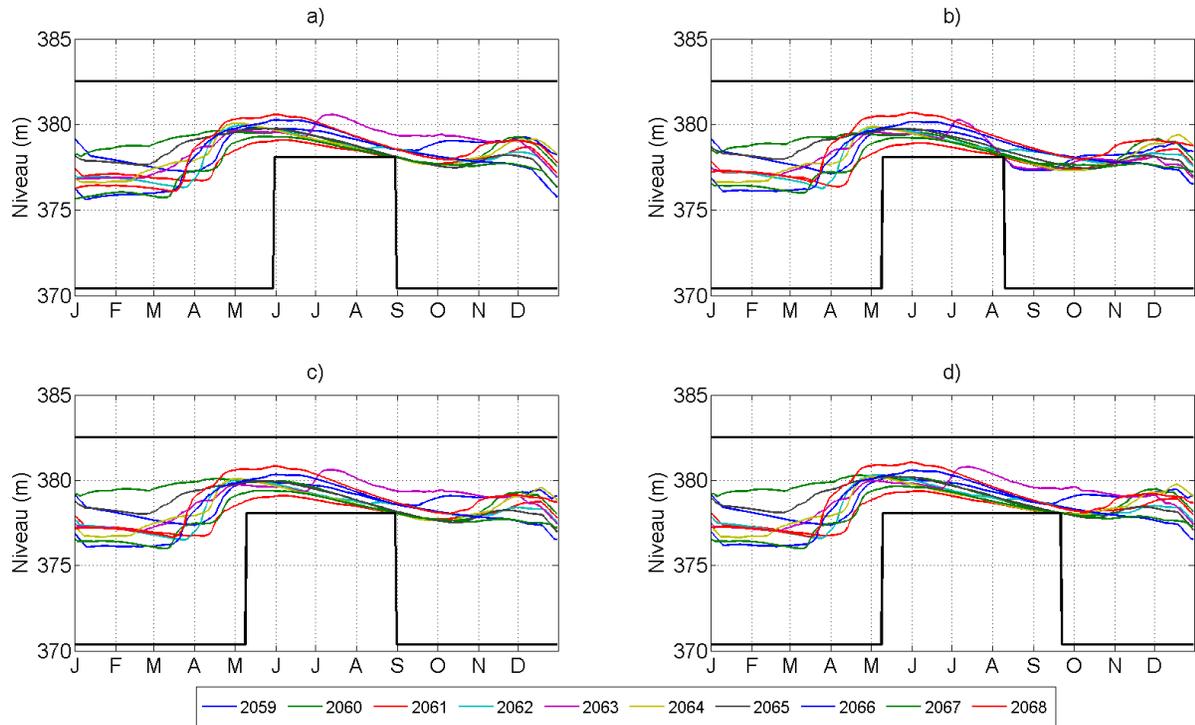


Figure 4.5 Décalage temporel des contraintes de niveau. Membre 3 MRCC. Mitchinamecus

Le tableau 4.6 présente la fiabilité moyenne, pour une période de 10 ans (2059-2068), des cinq membres du MRCC, et ce, dans la même séquence que les simulations décrites aux paragraphes précédents (a, b, c et d). Le réservoir de Mitchinamecus présente des fiabilités plus grandes que celui de Kiamika parce qu'il possède une marge de manœuvre plus grande.

Tableau 4.4 Fiabilité moyenne pendant 10 années. Kiamika et Mitchinamecus.

FIABILITÉ MOYENNE PENDANT 10 ANNÉES (%)									
Période	Membre	Kiamika				Mitchinamecus			
		a	b	c	d	a	b	c	D
Futur	1	98.9	99.2	99.0	98.9	100.0	100.0	100.0	100.0
	2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	3	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	4	99.9	100.0	99.7	99.6	100.0	100.0	100.0	100.0
	5	98.9	98.9	98.8	98.8	100.0	99.8	99.8	99.7

Le tableau 4.7 présente la vulnérabilité maximale, sur une période de 10 ans (2059-2068), des cinq membres du MRCC. Le réservoir de Kiamika est plus vulnérable que le réservoir de Mitchinamecus.

Tableau 4.5 Vulnérabilité maximale pendant 10 années. Kiamika et Mitchinamecus.

VULNERABILITÉ MAXIMALE PENDANT 10 ANNÉES (m)									
Période	Membre	Kiamika				Mitchinamecus			
		a	b	c	d	a	b	c	d
Futur	1	0.52	0.32	0.48	0.55	0.00	0.00	0.00	0.00
	2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	4	0.03	0.00	0.06	0.08	0.00	0.00	0.00	0.00
	5	0.73	0.71	0.73	0.78	0.00	0.13	0.16	0.19

CHAPITRE 5 CONCLUSION

Lors de cette étude, l'analyse des impacts des changements climatiques sur le système hydrique du bassin versant de la rivière du Lièvre, et l'adaptation aux changements climatiques en limitant les inondations dans l'archipel de Montréal, a été réalisée. Les résultats ont été analysés pour la période 1990-1999, en climat actuel, et pour la période 2059-2068, en climat futur, pour cinq membres du MRCC. Dans ce projet, un outil de gestion des réservoirs, basé sur un modèle d'optimisation stochastique à deux stades, a servi à faire les simulations

Les données météorologiques disponibles pour réaliser cette étude ont été: la plage entre 1961-2000 (40 ans disponibles), en climat actuel, et la plage entre 2041-2070 (30 ans disponibles), en climat futur, du MRCC. Par rapport à la période future, on a utilisé des données météorologiques des 15 dernières années pour la création des ESP, en conséquence, il n'est resté que 15 années disponibles pour réaliser les analyses de cette étude. Nous avons décidé d'utiliser 10 ans (2059-2068), car il ne nous restait pas beaucoup d'années disponibles et conséquemment, on a utilisé 10 ans en période de référence (1990-1999). Malgré le fait que l'utilisation de seulement 10 ans pour réaliser des analyses semble limiter la portée des résultats, puisqu'ainsi, toute l'information sur la variabilité naturelle du climat n'est pas utilisée, il est compensé par l'utilisation des 5 membres du MRCC. En effet, en utilisant 5 membres, on obtient un total de 50 ans ($5 \text{ membres} \times 10 \text{ ans}$) analysés. L'avantage d'utiliser 10 ans pour cette étude est que le temps de création des ESP et le temps de calcul des simulations sont plus rapides.

Une arrivée plus hâtive de la crue printanière, d'environ trois semaines, est prévue en climat futur pour les trois réservoirs. La montée plus hâtive des températures en climat futur causera cet événement. En automne, les apports moyens seront plus grands en période de changements climatiques, mais dans les réservoirs en amont seulement. Les apports d'hiver seront plus grands, en accord avec l'augmentation des précipitations et l'augmentation du nombre et de l'ampleur des redoux hivernaux.

La gestion des trois réservoirs du système hydrique de la rivière du Lièvre sera influencée par les changements d'hydraulicité consécutifs aux changements climatiques. Les niveaux moyens (pour 10 années de simulation et avec 5 membres du MRCC) des trois réservoirs se situeront à l'intérieur des contraintes de niveau. L'arrivée hâtive du printemps se manifestera par un rehaussement plus hâtif des niveaux dans les réservoirs. En général, il y aura plus de variabilité en climat futur. Cette augmentation de la variabilité occasionnera une augmentation de la vulnérabilité et une diminution de la fiabilité du réservoir Poisson Blanc par rapport aux conditions actuelles du climat. Par contre, les réservoirs en tête du bassin (Mitchinamecus et Kiamika) ne verront pas augmenter leur vulnérabilité et diminuer leur fiabilité, en raison de la marge de manœuvre plus importante entre les niveaux minimum et maximum alloués pour ces réservoirs.

La vulnérabilité et la fiabilité annuelle des réservoirs ont été évaluées pour chaque membre du MRCC, sans stocker de l'eau et en stockant de l'eau, dans les réservoirs de la rivière du Lièvre (30 %, 50 % et 100 % de la RDM), afin d'atténuer les effets des inondations dans l'archipel de Montréal, en climat actuel et en climat futur. Au fur et à mesure que la quantité d'eau à stocker augmente, le réservoir du Poisson Blanc devient plus vulnérable et moins fiable. Les réservoirs Mitchinamecus et Kiamika ont une plus grande marge de manœuvre et leur fiabilité et leur vulnérabilité sont influencées d'une façon marginale, par le stockage d'eau, que ce soit en climat actuel ou en climat futur.

Le volume d'eau annuel retenu sur le système hydrique de la rivière du Lièvre a été calculé pour les stockages utilisant 30 %, 50 % et 100 % de la RDM. Un bilan hydrique pour vérifier les volumes a été réalisé. Le bilan hydrique est conservé pour l'ensemble des simulations pour toutes les années et les membres du MRCC, sauf pour une année, pour le premier membre MRCC, en climat futur. Ceci est dû au dépassement de la borne maximale de la courbe d'emmagasinement du réservoir Poisson Blanc. La répartition de ces volumes dans les trois réservoirs a été réalisée. Il a été démontré que le réservoir Poisson Blanc retient de 87 à 95 % de la quantité totale stockée pour le contrôle des inondations dans l'archipel de Montréal, en climat actuel, et de 85 à 90 %, en climat futur. La diminution de pourcentage en climat futur est attribuable à la plus grande hydraulicité du bassin versant de la rivière du Lièvre, en climat

futur, additionnée aux conditions d'opération plus contraignantes dans le réservoir du Poisson Blanc, qui laissent moins de marge de manœuvre pour stocker la crue.

L'adaptation des contraintes des niveaux des réservoirs a été évaluée pour les réservoirs de Kiamika et Mitchinamecus. Le décalage temporel, en raison de l'arrivée plus hâtive de la crue printanière, montre que les niveaux baissent rapidement une fois la contrainte estivale minimale de niveau terminée. L'allongement de la contrainte minimale estivale de niveau a comme conséquence de maintenir les niveaux des réservoirs assez hauts pour ne pas perturber les activités récréatives qui s'y déroulent. Similairement, le réservoir du Poisson Blanc présente une variabilité des niveaux d'eau plus grande pendant l'automne, quand le décalage temporel de la contrainte estivale est appliqué. Cette variabilité est réduite lors de l'allongement de la contrainte estivale. Étant donné que les crues automnales sont de moindre intensité que les crues printanières, un allongement des contraintes de niveau ne semble pas affecter gravement la sécurité des crues d'automne. Les résultats d'adaptation des contraintes de niveaux correspondent à un seul membre du MRCC (#3), les autres membres n'ont pas été présentés, faute d'espace, mais la variabilité y est un peu moins évidente. Cependant, on a présenté les résultats correspondants de fiabilité et de vulnérabilité de Kiamika et Mitchinamecus, pour tous les membres du MRCC, et on a indiqué la fiabilité et la variabilité correspondant à ce membre pour Poisson Blanc.

D'autres projets, en lien avec ce travail, peuvent être considérés : a) Étant donné qu'il est démontré qu'il est possible que l'outil de gestion de réservoir soit capable de stocker de l'eau lors de crues printanières; dans une étape ultérieure, il serait aussi possible d'adapter l'outil de gestion du réservoir, pour parvenir à soutirer de l'eau des réservoirs de la rivière du Lièvre, lors des période d'étiage, afin de prévenir des niveaux d'eau très bas pendant ces périodes. b) L'inclusion du lac des Deux Montagnes, à l'intérieur du modèle d'optimisation, tel qu'un quatrième réservoir, pourrait peut-être aider au contrôle des inondations. c) L'outil de gestion de réservoirs pourrait être adapté à d'autres études, mais en utilisant d'autres modèles climatiques régionaux et d'autres modèles hydrologiques. d) Étant donné que la réduction des crues dans l'archipel de Montréal passe aussi par la contribution des réservoirs de Témiscamingue, des études pourraient être réalisées, en lien avec ces réservoirs, en tenant compte de la méthodologie utilisée pour ce projet.

Bref, l'outil de gestion de réservoirs créé pour ce projet a été utilisé pour analyser l'impact et l'adaptation aux changements climatiques du bassin versant de la rivière du Lièvre. Plusieurs analyses ont été réalisées, en climat présent et en climat futur, pour évaluer l'impact dans la gestion des réservoirs et les stratégies d'adaptation. Il ressort que les dépassements de la contrainte de niveau supérieur seront plus nombreux en climat futur. La marge de manœuvre pour pallier l'augmentation de l'hydraulicité en climat futur semble ne pas être adéquate pour le réservoir du Poisson Blanc. Les réservoirs Kiamika et Mitchinamecus présentent une marge de manœuvre plus grande.

ANNEXE A – FIABILITÉ ET VULNÉRABILITÉ

Dans cette annexe, les tableaux présentent la fiabilité et la vulnérabilité annuelles des trois réservoirs, en climat présente et en climat futur. Les calculs ont été faits sur les simulations sans rétroaction et en stockant de l'eau (rétroaction avec 30 %, 50 % et 100 % de la RDM).

Tableau A 1 Fiabilité Poisson Blanc

FIABILITÉ POISSON BLANC											
SR											
Période	Membre	Années									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Référence (1990-1999)	1.0	100.0	100.0	99.7	100.0	100.0	98.4	100.0	100.0	99.5	100.0
	2.0	99.2	99.7	99.2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.7
	3.0	100.0	100.0	99.2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	4.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	5.0	100.0	100.0	100.0	98.9	100.0	100.0	100.0	100.0	99.5	99.5
Futur (2059-2068)	1.0	100.0	100.0	99.2	100.0	95.6	100.0	100.0	100.0	100.0	99.2
	2.0	99.5	100.0	100.0	100.0	100.0	99.7	100.0	100.0	100.0	99.7
	3.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.7	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	4.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.7	99.7	100.0	99.7	99.7	100.0
	5.0	100.0	96.7	100.0	100.0	100.0	100.0	98.9	100.0	100.0	100.0
30 %											
Période	Membre	Années									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Référence (1990-1999)	1.0	100.0	100.0	99.7	100.0	100.0	98.6	100.0	100.0	99.5	100.0
	2.0	99.2	99.7	99.2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.7
	3.0	100.0	100.0	99.2	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	4.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	5.0	100.0	100.0	100.0	99.2	100.0	100.0	100.0	100.0	99.5	99.5
Futur (2059-2068)	1.0	100.0	100.0	99.2	100.0	87.9	100.0	100.0	100.0	100.0	99.2
	2.0	98.9	100.0	100.0	100.0	99.7	99.7	100.0	100.0	100.0	99.7
	3.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.7	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	4.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.7	99.7	100.0	99.7	99.7	100.0
	5.0	100.0	96.2	100.0	100.0	100.0	100.0	98.9	100.0	100.0	100.0
50 %											
Période	Membre	Années									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Référence (1990-1999)	1.0	100.0	100.0	99.7	100.0	100.0	98.4	100.0	100.0	99.5	100.0
	2.0	99.2	99.7	99.2	100.0	97.8	100.0	100.0	100.0	100.0	99.7
	3.0	100.0	100.0	99.2	100.0	100.0	100.0	99.7	100.0	100.0	100.0
	4.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	5.0	100.0	100.0	100.0	99.2	100.0	100.0	100.0	100.0	99.5	99.5
Futur (2059-2068)	1.0	100.0	100.0	99.2	100.0	84.1	100.0	100.0	100.0	100.0	99.2
	2.0	98.4	100.0	100.0	100.0	99.7	99.7	99.7	100.0	100.0	99.7
	3.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.7	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	4.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.5	99.7	100.0	98.6	100.0	100.0
	5.0	100.0	95.6	100.0	100.0	100.0	100.0	98.9	100.0	100.0	100.0
100 %											
Période	Membre	Années									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Référence (1990-1999)	1.0	100.0	100.0	99.7	100.0	100.0	98.4	100.0	100.0	97.0	100.0
	2.0	99.2	99.7	97.8	100.0	92.3	100.0	100.0	100.0	100.0	99.7
	3.0	100.0	100.0	99.2	100.0	100.0	100.0	99.7	100.0	100.0	100.0
	4.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	5.0	100.0	100.0	100.0	99.2	100.0	100.0	100.0	100.0	99.5	99.5
Futur (2059-2068)	1.0	99.7	100.0	98.9	100.0	83.3	99.7	100.0	100.0	100.0	99.2
	2.0	97.8	100.0	100.0	100.0	99.7	98.1	98.9	100.0	100.0	99.7
	3.0	100.0	100.0	100.0	100.0	99.7	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
	4.0	100.0	97.8	100.0	100.0	99.7	99.7	98.4	92.6	99.7	100.0
	5.0	100.0	93.2	100.0	100.0	100.0	100.0	98.9	100.0	100.0	100.0

Tableau A 4 Dépassement maximal annuel de la contrainte de niveau supérieure sur Poisson Blanc (m). Vulnérabilité

DÉPASSEMENT MAXIMAL ANNUEL DE LA CONTRAINTE DE NIVEAU SUPÉRIEURE SUR POISSON BLANC (m). VULNÉRABILITÉ											
SR											
Période	Membre	Années									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Référence (1990-1999)	1	0.000	0.000	0.002	0.000	0.000	0.022	0.000	0.000	0.007	0.000
	2	0.013	0.008	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.087
	3	0.000	0.000	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	5	0.000	0.000	0.000	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016
Futur (2059-2068)	1	0.000	0.000	0.007	0.000	0.225	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009
	2	0.185	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.000	0.000	0.000	0.086
	3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.177	0.000	0.001	0.001	0.000
	5	0.000	0.290	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000
30 %											
Période	Membre	Années									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Référence (1990-1999)	1	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.020	0.000	0.000	0.006	0.000
	2	0.013	0.008	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.088
	3	0.000	0.000	0.012	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	5	0.000	0.000	0.000	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016
Futur (2059-2068)	1	0.000	0.000	0.007	0.000	1.688	0.000	0.000	0.000	0.000	0.008
	2	0.286	0.000	0.000	0.000	0.055	0.004	0.000	0.000	0.000	0.086
	3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.004	0.178	0.000	0.001	0.002	0.000
	5	0.000	0.352	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000
50 %											
Période	Membre	Années									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Référence (1990-1999)	1	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.020	0.000	0.000	0.003	0.000
	2	0.016	0.008	0.005	0.000	0.073	0.000	0.000	0.000	0.000	0.088
	3	0.000	0.000	0.012	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
	4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	5	0.000	0.000	0.000	0.016	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016
Futur (2059-2068)	1	0.000	0.000	0.007	0.000	2.627	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009
	2	0.466	0.000	0.000	0.000	0.054	0.004	0.005	0.000	0.000	0.086
	3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.005	0.178	0.000	0.069	0.000	0.000
	5	0.000	0.479	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000
100 %											
Période	Membre	Années									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Référence (1990-1999)	1	0.000	0.000	0.003	0.000	0.000	0.020	0.000	0.000	0.060	0.000
	2	0.013	0.008	0.071	0.000	1.218	0.000	0.000	0.000	0.000	0.092
	3	0.000	0.000	0.012	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
	4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	5	0.000	0.000	0.000	0.013	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.016
Futur (2059-2068)	1	0.012	0.000	0.007	0.000	3.156	0.046	0.000	0.000	0.000	0.009
	2	0.805	0.000	0.000	0.000	0.051	0.130	0.019	0.000	0.000	0.086
	3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	4	0.000	0.574	0.000	0.000	0.012	0.179	0.061	0.886	0.002	0.000
	5	0.000	1.308	0.000	0.000	0.000	0.000	0.009	0.000	0.000	0.000

ANNEXE B – VOLUME RETENU ET ENLEVÉ

Les cinq tableaux de cette annexe représentent les volumes d'eau annuels retenus dans le système hydrique de la rivière du Lièvre (réservoirs du Poisson Blanc, Kiamika et Mitchinamecus) et les volumes d'eau enlevés en aval de celui-ci (lac des Deux montagnes et rivières) par effet du stockage sur les réservoirs.

Les volumes annuels, les volumes totaux et les volumes moyens des 10 années simulées, en période de référence et en climat futur, par chacun des membres, sont présentés. Ces simulations ont été réalisées en considérant une rétroaction avec 30 %, 50 % et 100 % de la RDM.

Finalement, deux volumes ont été surlignés en jaune. Le volume retenu dans le réservoir du Poisson Blanc et le volume enlevé des rivières. Les deux correspondent à la cinquième année (2063) en climat futur du premier membre. La différence de ces deux chiffres donne 235 hm³, telle que mentionnée dans la section 4.2.1 Bilan Hydrique.

Tableau B 1 Volume annuel retenu au réservoir du Poisson Blanc (hm³)

VOLUME ANNUEL RETENU AU RÉSERVOIR DU POISSON BLANC (hm ³)													
30 % RDM													
Période	Membre	Années										Total	Moyenne annuelle
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Référence (1990-1999)	1	21	19	6	4	0	62	5	0	89	4	211	21
	2	33	12	8	5	89	54	2	0	1	31	234	23
	3	10	3	16	6	1	0	79	3	60	0	177	18
	4	0	6	1	2	69	43	73	5	1	0	200	20
	5	4	11	24	47	3	18	0	0	2	0	108	11
Futur (2059-2068)	1	46	2	57	34	198	63	4	30	5	1	437	44
	2	46	4	3	5	63	82	33	26	7	0	269	27
	3	53	5	0	6	1	8	0	28	1	16	118	12
	4	23	51	0	2	18	31	53	106	33	1	320	32
	5	0	51	30	4	0	32	0	7	6	4	134	13
50 % RDM													
Période	Membre	Années										Total	Moyenne annuelle
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Référence (1990-1999)	1	39	28	9	4	0	96	3	0	132	4	315.5	31.6
	2	50	16	10	5	121	87	3	0	1	51	344.1	34.4
	3	18	3	24	7	1	0	126	3	99	2	282.4	28.2
	4	0	7	1	2	105	67	118	6	1	0	307.8	30.8
	5	5	17	38	77	4	29	0	0	2	0	172.3	17.2
Futur (2059-2068)	1	69	2	89	52	340	103	6	46	6	0	712.6	71.3
	2	71	5	5	8	98	123	49	42	5	1	405.9	40.6
	3	70	5	0	10	1	11	0	41	1	24	163.7	16.4
	4	39	76	0	2	32	46	91	167	58	2	512.7	51.3
	5	0	71	50	5	0	49	0	11	8	4	198.9	19.9
100 % RDM													
Période	Membre	Années										Total	Moyenne annuelle
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Référence (1990-1999)	1	70	52	17	6	1	171	4	1	218	10	550.5	55.0
	2	87	33	19	7	230	157	4	0	2	90	629.1	62.9
	3	29	6	48	13	1	0	205	13	149	2	464.8	46.5
	4	0	13	1	2	154	118	215	9	1	0	512.4	51.2
	5	10	31	68	125	8	56	0	0	3	0	301.9	30.2
Futur (2059-2068)	1	110	3	150	83	454	203	8	87	12	0	1111.2	111.1
	2	115	6	9	11	190	208	89	70	11	2	710.5	71.0
	3	121	5	0	19	1	18	0	74	1	43	282.5	28.3
	4	77	147	0	1	55	84	139	348	93	5	948.7	94.9
	5	0	166	92	11	0	96	0	19	18	7	406.8	40.7
Capacité de retenue		910 hm ³											

Tableau B 2 Volume annuel retenu au réservoir de Kiamika (hm³)

VOLUME ANNUEL RETENU AU RÉSERVOIR DE KIAMIKA (hm ³)													
30 % RDM													
Période	Membre	Années										Total	Moyenne annuelle
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Référence (1990-1999)	1	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	3.6	0.3	0.1	3.0	0.6	8	0.8
	2	0.6	0.4	4.5	0.1	2.7	0.4	0.2	0.0	0.1	0.3	9	0.9
	3	0.2	0.1	0.1	0.5	0.0	0.0	0.5	0.2	1.1	0.1	3	0.3
	4	0.0	0.2	0.0	0.1	0.7	0.8	1.6	0.4	0.2	0.0	4	0.4
	5	0.0	0.4	0.2	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1	0.1
Futur (2059-2068)	1	2.0	0.0	0.7	0.3	33.1	4.0	0.7	0.2	0.1	0.1	41	4.1
	2	6.0	0.4	0.0	0.2	2.9	2.2	0.3	1.1	0.8	0.0	14	1.4
	3	0.4	0.7	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.1	2	0.2
	4	0.2	5.5	0.0	0.0	0.6	2.2	0.3	9.2	0.3	0.0	18	1.8
	5	0.0	3.7	0.7	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.6	0.2	5	0.5
50 % RDM													
Période	Membre	Années										Total	Moyenne annuelle
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Référence (1990-1999)	1	0.4	0.4	0.3	0.1	0.1	3.3	0.2	0.1	5.0	0.5	10.5	1.0
	2	0.7	0.4	7.0	0.0	13.2	0.9	0.4	0.0	0.1	0.4	23.1	2.3
	3	0.3	0.1	0.2	0.5	0.0	0.0	0.8	0.1	1.5	0.1	3.6	0.4
	4	0.0	0.2	0.0	0.1	0.8	0.8	3.0	0.4	0.2	0.0	5.5	0.5
	5	0.1	0.6	0.3	0.8	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.2
Futur (2059-2068)	1	2.0	0.0	0.9	0.4	58.5	6.3	0.7	1.1	0.1	0.0	70.1	7.0
	2	7.1	0.5	0.0	0.2	4.8	4.1	1.7	1.3	0.8	0.0	20.5	2.0
	3	0.4	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.3	0.0	0.2	1.1	0.1
	4	0.2	8.0	0.0	0.0	0.4	2.3	0.1	16.3	0.3	0.0	27.7	2.8
	5	0.0	8.3	1.4	0.2	0.0	0.2	0.0	0.1	0.6	0.2	10.9	1.1
100 % RDM													
Période	Membre	Années										Total	Moyenne annuelle
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Référence (1990-1999)	1	0.5	0.4	0.3	0.1	0.1	12.1	0.4	0.1	21.9	0.9	36.9	3.7
	2	1.9	0.5	10.2	0.0	44.0	8.5	0.5	0.0	0.2	3.9	69.6	7.0
	3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.0	0.0	14.5	0.6	7.5	0.4	24.1	2.4
	4	0.0	0.2	0.0	0.0	11.0	4.6	6.5	0.5	0.1	0.0	23.0	2.3
	5	0.1	0.6	2.3	6.3	0.2	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	10.0	1.0
Futur (2059-2068)	1	10.1	0.3	6.0	3.6	61.7	13.9	1.0	2.5	0.2	0.0	99.2	9.9
	2	13.4	0.5	0.1	0.1	12.9	14.7	5.9	7.9	0.8	0.1	56.4	5.6
	3	2.6	0.0	0.0	0.1	0.0	0.3	0.0	0.4	0.0	0.3	3.9	0.4
	4	0.4	21.6	0.0	0.1	4.3	3.4	14.4	58.4	1.6	0.1	104.4	10.4
	5	0.0	40.5	2.2	0.9	0.0	0.9	0.0	0.1	0.6	0.3	45.5	4.5
Capacité de retenue		435 hm ³											

Tableau B 3 Volume annuel retenu au réservoir de Mitchinamecus (hm³)

VOLUME ANNUEL RETENU AU RÉSERVOIR DE MITCHINAMECUS (hm ³)													
30 % RDM													
Période	Membre	Années										Total	Moyenne annuelle
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Référence (1990-1999)	1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	3.8	0.0	0.1	6.0	0.1	10	1
	2	3.2	0.1	0.4	0.1	2.4	0.3	0.1	0.0	0.0	0.2	7	1
	3	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.5	0.0	1.2	0.1	2	0
	4	0.0	0.0	0.0	0.0	4.7	0.3	2.5	0.1	0.1	0.0	8	1
	5	0.0	0.1	0.1	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	1	0
Futur (2059-2068)	1	2.5	0.1	0.5	0.2	28.9	4.1	0.5	1.4	0.2	0.0	38	4
	2	7.6	0.3	0.1	0.1	0.5	3.2	0.2	0.2	0.5	0.0	13	1
	3	1.2	0.6	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0	0.1	3	0
	4	0.1	9.3	0.0	0.0	0.6	3.2	0.1	14.2	0.0	0.0	28	3
	5	0.0	5.0	0.3	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	6	1
50 % RDM													
Période	Membre	Années										Total	Moyenne annuelle
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Référence (1990-1999)	1	3.9	0.2	0.1	0.1	0.0	4.1	0.0	0.1	6.4	0.1	14.9	1.5
	2	3.3	0.1	1.3	0.1	13.6	0.2	0.1	0.0	0.0	0.3	18.9	1.9
	3	0.1	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.8	0.0	1.9	0.1	3.3	0.3
	4	0.0	0.1	0.0	0.0	0.6	0.5	2.9	0.1	0.1	0.0	4.3	0.4
	5	0.1	0.2	0.2	0.4	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	1.1	0.1
Futur (2059-2068)	1	2.6	0.1	0.6	0.3	51.4	9.4	0.5	1.5	0.2	0.0	66.5	6.7
	2	9.0	0.3	0.0	0.1	2.4	5.7	1.6	0.4	0.6	0.1	20.2	2.0
	3	3.5	0.6	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	1.6	0.0	0.2	6.1	0.6
	4	0.2	15.0	0.0	0.0	0.2	3.1	5.4	37.0	0.0	0.4	61.3	6.1
	5	0.0	11.3	2.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	13.8	1.4
100 % RDM													
Période	Membre	Années										Total	Moyenne annuelle
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Référence (1990-1999)	1	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0	19.9	0.0	0.1	42.0	0.0	63.1	6.3
	2	3.6	0.2	4.6	0.0	62.7	12.7	0.0	0.0	0.0	6.4	90.2	9.0
	3	0.2	0.1	0.3	0.1	0.0	0.0	22.9	0.2	12.4	0.2	36.3	3.6
	4	0.0	0.0	0.0	0.0	17.0	8.5	5.4	0.1	0.1	0.0	31.2	3.1
	5	0.1	0.2	4.1	11.3	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	16.0	1.6
Futur (2059-2068)	1	10.5	0.1	10.2	5.3	54.2	18.1	0.7	3.7	0.2	0.0	103.1	10.3
	2	19.9	0.7	0.0	0.1	15.7	20.7	6.9	6.2	0.2	0.0	70.6	7.1
	3	7.2	0.6	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	1.8	0.0	0.3	10.0	1.0
	4	0.4	28.1	0.0	0.0	12.6	4.7	36.0	61.8	2.9	0.0	146.7	14.7
	5	0.0	30.1	3.2	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.6	0.1	34.2	3.4
Capacité de retenue		533 hm ³											

Tableau B 4 Volume annuel enlevé au lac des Deux Montagnes (hm³)

VOLUME ANNUEL ENLEVÉ AU LAC DES DEUX MONTAGNES (hm ³)													
30 % RDM													
Période	Membre	Années										Total	Moyenne annuelle
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Référence (1990-1999)	1	3	5	2	2	1	10	4	1	22	4	54	5
	2	10	5	3	9	18	9	3	0	0	6	63	6
	3	4	2	4	3	0	0	10	3	9	1	37	4
	4	0	3	0	1	10	8	17	4	1	1	45	4
	5	1	5	6	6	1	5	0	0	1	0	25	2
Futur (2059-2068)	1	11	1	7	7	28	15	3	12	2	2	87	9
	2	11	2	1	2	15	15	8	1	5	0	60	6
	3	21	5	0	2	0	3	0	12	0	6	50	5
	4	4	11	0	2	7	10	14	20	11	2	80	8
	5	0	19	9	1	0	6	0	2	3	5	46	5
50 % RDM													
Période	Membre	Années										Total	Moyenne annuelle
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Référence (1990-1999)	1	7.0	7.7	3.5	1.8	0.6	14.7	3.3	0.9	31.0	3.5	73.8	7.4
	2	14.1	6.1	4.3	10.5	23.0	14.9	3.8	0.0	0.6	9.2	86.5	8.6
	3	6.7	2.1	6.6	2.9	0.3	0.3	19.9	2.8	14.6	1.1	57.2	5.7
	4	0.0	3.0	0.4	0.9	13.2	8.8	23.4	5.6	1.3	0.9	57.5	5.8
	5	1.9	6.1	7.7	9.4	1.2	7.7	0.0	0.0	1.2	0.1	35.4	3.5
Futur (2059-2068)	1	13.2	1.0	9.5	10.5	32.2	17.0	3.9	14.1	2.6	0.0	104.0	10.4
	2	13.9	3.0	1.8	4.3	20.0	20.4	13.5	3.9	3.4	0.9	85.2	8.5
	3	21.7	6.0	0.3	3.0	0.9	3.8	0.2	14.8	0.5	6.7	57.9	5.8
	4	5.5	12.2	0.5	1.6	6.0	13.0	19.5	24.5	16.3	6.0	105.0	10.5
	5	0.0	22.3	15.2	2.0	0.0	8.3	0.0	4.1	4.1	3.5	59.5	6.0
100 % RDM													
Période	Membre	Années										Total	Moyenne annuelle
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Référence (1990-1999)	1	10.5	11.9	5.6	4.4	2.5	24.0	5.0	1.8	44.3	6.9	116.9	11.7
	2	21.5	10.8	6.3	11.6	26.7	27.5	4.8	0.1	1.5	18.9	129.8	13.0
	3	7.9	3.1	14.2	5.7	0.4	0.0	28.1	8.9	25.3	1.9	95.6	9.6
	4	0.0	4.6	0.4	1.3	18.0	17.9	25.5	5.7	1.2	0.9	75.5	7.6
	5	4.8	9.8	14.3	17.5	3.4	14.8	0.0	0.0	1.6	0.1	66.4	6.6
Futur (2059-2068)	1	22.2	2.1	23.9	20.6	66.6	22.4	4.2	22.5	5.0	0.0	189.4	18.9
	2	21.6	3.1	3.3	4.6	20.0	35.4	22.0	3.2	5.7	1.9	120.8	12.1
	3	32.8	5.8	0.0	5.9	0.4	6.3	0.0	20.0	0.3	11.1	82.6	8.3
	4	10.9	19.5	0.6	1.3	15.9	22.7	39.1	35.3	22.9	6.6	174.9	17.5
	5	0.0	27.5	22.0	4.1	0.0	17.6	0.0	6.1	7.8	5.7	90.9	9.1

Tableau B 5 Volume annuel enlevé aux rivières (hm³)

VOLUME ANNUEL ENLEVÉ AUX RIVIÈRES (hm ³)													
30 % RDM													
Période	Membre	Années										Total	Moyenne annuelle
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Référence (1990-1999)	1	21	18	6	3	1	60	5	2	82	3	201	20
	2	34	11	8	12	89	53	2	0	1	32	241	24
	3	10	3	16	6	1	0	78	4	58	1	176	18
	4	0	5	1	2	67	42	73	7	2	1	199	20
	5	3	10	23	47	3	17	0	0	2	0	106	11
Futur (2059-2068)	1	44	1	55	34	201	61	4	28	4	3	435	43
	2	44	3	3	5	65	79	33	2	4	0	239	24
	3	66	13	0	6	1	7	0	26	0	16	134	13
	4	25	53	1	2	24	30	55	115	34	2	341	34
	5	0	43	30	3	0	31	0	7	7	4	126	13
50 % RDM													
Période	Membre	Années										Total	Moyenne annuelle
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Référence (1990-1999)	1	38	30	10	3	1	93	4	2	126	4	310	31
	2	52	16	12	12	131	85	4	0	1	51	364	36
	3	16	4	23	7	1	0	123	4	96	2	276	28
	4	0	7	1	2	102	66	122	9	2	1	311	31
	5	5	15	37	77	4	28	0	0	2	0	168	17
Futur (2059-2068)	1	68	1	87	53	330	101	4	43	6	0	694	69
	2	70	4	5	7	103	119	49	6	3	1	366	37
	3	85	16	0	10	1	9	0	39	1	24	184	18
	4	40	82	1	2	32	45	90	176	53	8	531	53
	5	0	64	46	5	0	47	0	10	10	5	187	19
100 % RDM													
Période	Membre	Années										Total	Moyenne annuelle
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Référence (1990-1999)	1	69	51	17	6	3	177	6	3	236	7	575	58
	2	86	31	22	12	268	165	5	0	2	97	688	69
	3	27	5	46	12	1	0	225	12	165	3	495	49
	4	0	12	1	2	176	129	223	11	2	1	556	56
	5	9	29	73	136	9	54	0	0	3	0	313	31
Futur (2059-2068)	1	123	2	156	88	689	204	6	87	11	0	1366	137
	2	126	4	8	10	201	205	98	7	3	3	664	66
	3	139	15	0	18	1	16	0	71	0	43	303	30
	4	78	157	1	2	70	82	181	364	94	9	1039	104
	5	0	160	78	9	0	94	0	18	17	5	382	38

ANNEXE C – INFLUENCE DU STOCKAGE DE L’EAU DANS LES RÉSERVOIRS DE LA RIVIÈRE DU LIÈVRE ET DU BARRAGE DU GRAND MOULIN SUR LE LAC DES DEUX MONTAGNES

Variation de niveau maximal du lac des Deux Montagnes.

Cette section analyse les variations maximales annuelles de niveau du lac des Deux Montagnes sous deux conditions: en stockant de l’eau dans les réservoirs de la rivière du Lièvre (utilisant une rétroaction) et par le barrage du Grand-Moulin, à l’entrée de la rivière des Mille-Îles.

La fermeture du barrage du Grand-Moulin, sur la rivière des Mille-Îles, entraîne comme conséquence directe la montée du niveau de l’eau dans le lac des Deux Montagnes. Le comportement inverse se produit lors du stockage dans les réservoirs de la rivière du Lièvre. Effectivement, le fait de stocker de l’eau dans les réservoirs permet de diminuer le niveau du lac des Deux Montagnes. En d’autres mots, un des effets du stockage de l’eau dans les réservoirs est d’atténuer la hausse de niveau du lac des Deux Montagnes, produite par le barrage du Grand-Moulin, à l’entrée de la rivière des Mille-Îles.

La diminution maximale annuelle du niveau du lac des Deux Montagnes, résultant de l’effet du stockage de l’eau sur les réservoirs du système hydrique de la rivière du Lièvre, s’obtient en réalisant simplement la différence de niveau entre les simulations avec rétroaction et la simulation sans rétroaction. Ensuite, la plus grande diminution de niveau qui se produit pendant l’année est obtenue. L’augmentation maximale annuelle du niveau du lac des Deux Montagnes, résultant de l’effet du barrage du Grand-Moulin, s’obtient en réalisant la différence de niveau entre les simulations, avec barrage et sans barrage. Ensuite, la plus grande augmentation de niveau qui se produit pendant l’année est trouvée.

Le Tableau C 1 montre les diminutions maximales annuelles de niveau dans le lac des Deux Montagnes, produites par le stockage dans les réservoirs et ce, pour tous les membres du MRCC, en période de référence et de climat futur. Les résultats montrent qu’au fur et à mesure

que la quantité d'eau stockée dans les réservoirs augmente (rétroaction avec 30 %, 50 % et 100 % de la RDM), l'abaissement du niveau dans le lac des Deux Montagnes devient plus prononcé. La plus grande baisse de niveau dans le lac se produit en utilisant le premier membre en climat futur, pour l'année 2063. Cette baisse de niveau se produit en utilisant la rétroaction avec 100 % de la RDM, où on obtient jusqu'à 11 cm de variation de niveau.

Tableau C 1 Diminution maximale annuelle de niveau dans le lac des Deux Montagnes produite par la rétroaction

DIMINUTION MAXIMALE ANNUELLE DE NIVEAU (m) DANS DEUX MONTAGNES PRODUITE PAR LA RÉTROACTION											
30 % RDM											
Période	Membre	Années									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Référence (1990-1999)	1	0.013	0.011	0.006	0.003	0.001	0.018	0.005	0.001	0.027	0.002
	2	0.014	0.011	0.007	0.004	0.026	0.021	0.004	0.000	0.002	0.025
	3	0.008	0.003	0.006	0.006	0.001	0.000	0.026	0.005	0.025	0.001
	4	0.000	0.004	0.001	0.003	0.030	0.021	0.025	0.003	0.002	0.001
	5	0.004	0.011	0.014	0.025	0.003	0.008	0.000	0.000	0.002	0.000
Futur (2059-2068)	1	0.024	0.001	0.019	0.025	0.033	0.022	0.003	0.022	0.004	0.001
	2	0.022	0.002	0.004	0.005	0.032	0.028	0.020	0.002	0.003	0.000
	3	0.046	0.003	0.001	0.006	0.002	0.004	0.001	0.014	0.000	0.012
	4	0.014	0.029	0.001	0.002	0.014	0.015	0.021	0.031	0.021	0.001
	5	0.000	0.017	0.015	0.004	0.000	0.017	0.000	0.008	0.005	0.004
50 % RDM											
Période	Membre	Années									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Référence (1990-1999)	1	0.022	0.018	0.010	0.003	0.001	0.029	0.003	0.001	0.044	0.002
	2	0.023	0.018	0.012	0.004	0.044	0.035	0.007	0.000	0.002	0.041
	3	0.013	0.003	0.010	0.009	0.001	0.001	0.044	0.005	0.041	0.001
	4	0.000	0.006	0.001	0.003	0.050	0.035	0.047	0.005	0.002	0.001
	5	0.007	0.017	0.023	0.042	0.004	0.014	0.000	0.000	0.003	0.000
Futur (2059-2068)	1	0.039	0.001	0.031	0.041	0.055	0.038	0.002	0.036	0.007	0.000
	2	0.037	0.002	0.006	0.008	0.059	0.045	0.035	0.005	0.002	0.002
	3	0.035	0.003	0.001	0.010	0.002	0.006	0.001	0.023	0.001	0.018
	4	0.024	0.048	0.001	0.002	0.023	0.023	0.035	0.051	0.038	0.003
	5	0.000	0.028	0.025	0.007	0.000	0.027	0.000	0.013	0.009	0.003
100 % RDM											
Période	Membre	Années									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Référence (1990-1999)	1	0.043	0.037	0.019	0.006	0.003	0.060	0.003	0.001	0.083	0.005
	2	0.043	0.035	0.024	0.005	0.070	0.066	0.007	0.000	0.003	0.068
	3	0.026	0.005	0.020	0.017	0.001	0.000	0.061	0.012	0.067	0.002
	4	0.000	0.012	0.001	0.003	0.080	0.065	0.065	0.009	0.002	0.001
	5	0.013	0.035	0.047	0.062	0.008	0.027	0.000	0.000	0.005	0.000
Futur (2059-2068)	1	0.060	0.001	0.066	0.060	0.110	0.073	0.002	0.071	0.014	0.000
	2	0.068	0.002	0.013	0.016	0.084	0.078	0.071	0.005	0.008	0.003
	3	0.061	0.004	0.000	0.020	0.002	0.012	0.000	0.044	0.000	0.036
	4	0.047	0.095	0.001	0.002	0.044	0.046	0.063	0.102	0.078	0.002
	5	0.000	0.061	0.049	0.014	0.000	0.054	0.000	0.025	0.018	0.006

Le Tableau C 2 montre les augmentations maximales de niveau produites par le barrage du Grand- Moulin pour tous les membres, en période de référence et en climat futur. La plus grande hausse de niveau se produit avec le premier membre en climat futur, en 2063, où on obtient jusqu'à 23,5 cm de variation de niveau.

Tableau C 2 Augmentation maximale annuelle de niveau dans le lac des Deux Montagnes produite par le barrage du Grand-Moulin

AUGMENTATION MAXIMALE ANNUELLE (m) DE NIVEAU PRODUIT DANS DEUX MONTAGNES PRODUITE PAR LE BARRAGE DU GRAND-MOULIN											
Période	Membre	Années									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Référence (1990-1999)	1	0.078	0.063	0.033	0.002	0.000	0.119	0.000	0.000	0.185	0.000
	2	0.073	0.050	0.037	0.000	0.190	0.120	0.000	0.000	0.005	0.133
	3	0.046	0.008	0.035	0.029	0.001	0.000	0.189	0.000	0.169	0.003
	4	0.000	0.018	0.000	0.004	0.195	0.109	0.150	0.014	0.000	0.000
	5	0.022	0.060	0.081	0.160	0.014	0.046	0.000	0.000	0.009	0.000
Futur (2059-2068)	1	0.149	0.000	0.117	0.152	0.235	0.158	0.000	0.138	0.024	0.000
	2	0.137	0.000	0.022	0.027	0.221	0.182	0.133	0.000	0.000	0.000
	3	0.102	0.002	0.000	0.034	0.000	0.021	0.000	0.078	0.000	0.066
	4	0.074	0.164	0.000	0.000	0.064	0.068	0.114	0.183	0.129	0.000
	5	0.000	0.156	0.100	0.023	0.000	0.094	0.000	0.043	0.030	0.004

En conclusion, l'influence du barrage de la rivière des Mille-Îles sur le niveau du lac des Deux Montagnes est plus grande que l'influence exercée par le stockage de l'eau dans les réservoirs du bassin versant de la rivière du Lièvre. On voit que la hausse de niveau du lac peut être partiellement atténuée par le stockage de l'eau dans les réservoirs du système hydrique de la rivière du Lièvre.

Effet du barrage du Grand-Moulin par rapport au volume d'eau.

L'effet du barrage du Grand-Moulin à l'entrée de la rivière des Mille-Îles, qui limite le débit de cette rivière à 780 m³/s, fait en sorte que le niveau du lac des Deux Montagnes augmente, tel que décrit dans la section précédente. Cette section détermine l'augmentation de volume du lac des Deux Montagnes et l'augmentation des volumes de sortie du lac, à travers la rivière des Prairies et le passage vers le lac Saint-Louis, à la hauteur de Sainte-Anne-de-Bellevue et Vaudreuil, en raison du barrage.

Le Tableau C 3 montre l'augmentation annuelle du volume dans le lac des Deux Montagnes, en climat présent et en climat futur, pour chacun des membres du MRCC. Le Tableau C 4 montre l'augmentation des volumes de sortie du lac des Deux Montagnes. Dans ces deux tableaux, il est possible d'observer la plus grande disponibilité de l'eau en climat futur, qui se manifeste par une plus grande augmentation de volume en climat futur.

Tableau C 3 Augmentation du volume dans le lac des Deux Montagnes produite par le barrage du Grand-Moulin.

AUGMENTATION DE VOLUME (hm ³) DANS LE LAC DES DEUX MONTAGNES PRODUITE PAR LE BARRAGE DU GRAND-MOULIN													
Période	Membre	Années										Total	Moyenne
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Référence (1990-1999)	1	15	17	6	1	0	35	0	0	59	0	133	13
	2	25	10	7	0	51	40	0	0	1	24	158	16
	3	9	2	21	6	0	0	55	0	45	1	137	14
	4	0	6	0	1	30	22	32	3	0	0	94	9
	5	4	11	23	30	3	22	0	0	2	0	95	10
Futur (2059-2068)	1	36	0	28	27	81	33	0	36	8	0	250	25
	2	30	0	4	5	34	48	24	0	0	0	145	14
	3	34	0	0	9	0	8	0	26	0	14	91	9
	4	14	27	0	0	12	26	51	40	23	0	194	19
	5	0	29	27	4	0	27	0	8	8	1	104	10

Tableau C 4 Augmentation des volumes de sortie du lac des Deux Montagnes produite par le barrage du Grand-Moulin

AUGMENTATION DES VOLUMES DE SORTIE DU LAC PRODUITE PAR LE BARRAGE DU GRAND-MOULIN (hm ³)													
Période	Membre	Années										Total	Moyenne
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Référence (1990-1999)	1	117	94	27	1	0	352	0	0	588	0	1179	118
	2	162	36	24	0	698	286	0	0	2	155	1364	136
	3	44	4	95	17	0	0	586	0	399	2	1147	115
	4	0	16	0	2	366	223	469	8	0	0	1084	108
	5	13	46	134	296	11	98	0	0	5	0	602	60
Futur (2059-2068)	1	277	0	383	200	1393	443	0	234	22	0	2952	295
	2	264	0	12	16	602	537	234	0	0	0	1665	166
	3	259	1	0	32	0	28	0	148	0	77	544	54
	4	112	238	0	0	87	118	271	684	142	0	1651	165
	5	0	433	210	14	0	172	0	30	26	2	887	89

En général, les volumes stockés dans le lac sont plus petits que les volumes qui sortent du lac. Ces résultats s'expliquent par le fait que le lac n'est pas un ouvrage de retenue. Il ne peut pas retenir beaucoup d'eau parce qu'il existe d'autres sorties par où l'eau s'écoulera.

Enfin, le Tableau C 5 montre l'augmentation du volume dans le lac des Deux Montagnes et l'augmentation des volumes de sortie du lac des Deux Montagnes, déterminées au Tableau C 3 et au Tableau C 4

Tableau C 5 Augmentation de volume total.

AUGMENTATION TOTAL (hm³) = VOLUME DANS LE LAC DES DEUX MONTAGNES +VOLUME SORTIE DU LAC DES DEUX MONTAGNES													
Période	Membre	Années										Total	Moyenne
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Référence (1990-1999)	1	132	111	34	2	0	387	0	0	646	0	1312	131
	2	187	46	31	0	748	326	0	0	3	179	1521	152
	3	53	5	116	22	0	0	642	0	444	2	1284	128
	4	0	22	0	2	395	244	502	11	0	0	1177	118
	5	17	57	157	326	14	120	0	0	7	0	698	70
Futur (2059-2068)	1	313	0	411	228	1475	476	0	270	30	0	3202	320
	2	295	0	16	21	636	585	258	0	0	0	1810	181
	3	293	1	0	40	0	35	0	174	0	90	634	63
	4	127	265	0	0	99	144	322	724	165	0	1845	184
	5	0	461	236	18	0	199	0	38	34	3	991	99

LISTE DES RÉFÉRENCES

- Andreu, J., Capilla, J. et Sanchís, E. (1996). AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology*, volume 177, numéro 3-4, p. 269-291.
- ArcGIS Ressources (2012). What is SWAT? Dans *SWAT: Soil & Water Assessment Tool*. <http://blogs.esri.com/esri/arcgis/2012/03/14/swat-soil-water-assessment-tool/> (page consultée le 27 juillet 2012).
- Arsenault, R., Brissette, F., Malo, J. S., Minville, M. et Leconte, R. (2013). Structural and Non-Structural Climate Change Adaptation Strategies for the Péribonka Water Resource System. *Water Resources Management*, volume 27, numéro 7, p. 2075-2087.
- Bertsekas, D. P. (2007). *Dynamic Programming and Optimal control: Athena Scientifique*
- Brissette, F., Leconte, R., Minville, M. et Roy, R. (2007). Can we adequately quantify the increase/decrease of flooding due to climate change? Dans *2006 IEEE EIC Climate Change Technology Conference, EICCCC 2006, May 10, 2006 - May 12*. Inst. of Elec. and Elec. Eng. Computer Society, Ottawa, ON, Canada,
- Caya, D. et Laprise, R. (1999). A semi-implicit semi-Lagrangian regional climate model: The Canadian RCM. *Monthly Weather Review*, volume 127, numéro 2-3, p. 341-362.
- Caya, D., Laprise, R., Giguere, M., Bergeron, G., Blanchet, J. P., Stocks, B. J., Boer, G. J. et McFarlane, N. A. (1995). Description of the Canadian regional climate model. Dans *Proceedings of the International Boreal Forest Research Association Conference, September 25, 1994 - September 30*, volume 82. Kluwer Academic Publishers, Saskatoon, Can, p. 477-482.
- CEHQ (2013). Atlas hydroclimatique du Québec méridional. Centre d'expertise hydrique du Québec. Dans www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/atlas/ (page consultée le 07 juillet 2013).
- Chang, L. -. et Chang, F. -. (2009). Multi-objective evolutionary algorithm for operating parallel reservoir system. *Journal of Hydrology*, volume 377, numéro 1-2, p. 12-20.
- Chen, J., Brissette, F. P. et Leconte, R. (2011). Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *Journal of Hydrology*, volume 401, numéro 3-4, p. 190-202.
- Chen, J., Brissette, F. P., Poulin, A. et Leconte, R. (2011). Overall uncertainty study of the hydrological impacts of climate change for a Canadian watershed. *Water Resources Research*, volume 47, numéro 12,

-
- Christensen, N. S., Wood, A. W., Voisin, N., Lettenmaier, D. P. et Palmer, R. N. (2004). The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado River basin. *Climatic Change*, volume 62, numéro 1-3, p. 337-363.
- Day, G. N. (1985). Extended streamflow forecasting using NWSRFS. *Journal of Water Resources Planning & Management - ASCE*, volume 111, numéro 2, p. 157-170.
- Diaz-Nieto, J. et 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*, volume 69, numéro 2-3, p. 245-268.
- ESCCER (s.d). Réseau canadien en modélisation et diagnostic du climat régional (MDCR): Modèle MRCC (Modèle régional canadien du climat). Dans Université du Québec à Montréal (UQAM), *Centre pour l'étude et la simulation du climat à l'échelle régionale (ESCCER)*. http://www.mrcc.uqam.ca/index.php?page=modeles_-ang.html&sm=sm4 (page consultée le 30 mai 2012).
- Eum, H. -, Vasan, A. et Simonovic, S. P. (2012). Integrated Reservoir Management System for Flood Risk Assessment Under Climate Change. *Water Resources Management*, p. 1-18.
- Eum, H. et Simonovic, S. P. (2010). Integrated Reservoir Management System for Adaptation to Climate Change: The Nakdong River Basin in Korea. *Water Resources Management*, volume 24, numéro 13, p. 3397-3417.
- Faber, B. A. et Stedinger, J. R. (2001). Reservoir optimization using sampling SDP with ensemble streamflow prediction (ESP) forecasts. *Journal of Hydrology*, volume 249, numéro 1-4, p. 113-133.
- Faber, B. A. et Stedinger, J. R. (2004). SSDP reservoir models using Ensemble Streamflow Prediction (ESP) forecasts. Dans *Bridging the Gap: Meeting the World's Water and Environmental Resources Challenges - Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress 2001*, volume 111
- Fortin, J. P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J. et Villeneuve, J. P. (2001). Distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. I: Description of model. *Journal of Hydrologic Engineering*, volume 6, numéro 2, p. 91-99.
- Fortin, L. G., Turcotte, R., Pugin, S., Cyr, J. -. et Picard, F. (2007). Impact of climate changes on the management plans for Saint-Francois and Aylmer lakes in the south of Quebec. *Canadian Journal of Civil Engineering*, volume 34, numéro 8, p. 934-945.
- Franco, G., Cayan, D. R., Moser, S., Hanemann, M. et Jones, M. -. (2011). Second California Assessment: Integrated climate change impacts assessment of natural and managed systems. Guest editorial. *Climatic Change*, volume 109, numéro SUPPL. 1, p. 1-19.

-
- Georgakakos, A. P., Yao, H., Kistenmacher, M., Georgakakos, K. P., Graham, N. E., Cheng, F. -, Spencer, C. et Shamir, E. (2012). Value of adaptive water resources management in Northern California under climatic variability and change: Reservoir management. *Journal of Hydrology*, volume 412-413, p. 34-46.
- Govindaraju, R. S. (2000). Artificial neural networks in hydrology. I: Preliminary concepts. *Journal of Hydrologic Engineering*, volume 5, numéro 2, p. 115-123.
- Grillakis, M. G., Koutroulis, A. G. et Tsanis, I. K. (2011). Climate change impact on the hydrology of Spencer Creek watershed in Southern Ontario, Canada. *Journal of Hydrology*, volume 409, numéro 1-2, p. 1-19.
- HEC-HMS (2000). *Hydrologic modeling system HEC-HMS. Technical reference manual*. Arlen D.Feldman, USA, 145 p.
- HRC et GWRI (2007). Integrated Forecast and Reservoir Management (INFORM) for Northern California: system development and initial demonstration (Georgakakos, K P; Graham, Nicolas E; Georgakakos, Aris P). Hydrologic Research Center and Georgia Water Resources Institute (HRC, GWRI). Dans State of California, *California energy Commission*. <http://www.energy.ca.gov/2006publications/CEC-500-2006-109/CEC-500-2006-109.PDF> (page consultée le 6 juin 2012).
- Huaranga, U., Leconte, R. (2012). Changements climatiques sur le système hydrique de la rivière des Outaouais: débits de la rivière des Prairies et de la rivière des Milles-Îles. Final report. Research projet funded by the Ouranos Consortium on Regional Climatology and Adaptation to Climate Change. Département de génie civil, Faculté de génie, Université de Sherbrooke, 36 p.
- Hydro-Québec (1991). *Vocabulaire de l'exploitation des barrages*, première édition. Québec, Canada, 123 p.
- INRS (2000). Hydrotel: Fiche Technique. Dans INRS (Institut national de la recherche scientifique), *Le modèle hydrologique Hydrotel*. <http://www1.ete.inrs.ca/activites/modeles/hydrotel/fr/fiche.htm> (page consultée le 27 juillet 2012).
- IPCC (2007a). In: ParryML, Canziani JP, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (eds) Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, 1000 p
- IPCC (2007b). Climate Change 2007 : Synthesis Report. The contribution of working Group I, II, and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Dans IPCC, *Reports-Assessment Reports*. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr.pdf (page consultée le 15 juillet 2012).

- IPCC (2007c). Climate Change 2007 : Technical Summary. The contribution of working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Dans IPCC Working Group I, Technical Support Unit, University of Bern Friedbühlstrasse, Switzerland, *A report accepted by Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change but not approved in detail*. <https://www.ipcc-wg1.unibe.ch/publications/wg1-ar4/ar4-wg1-ts.pdf> (page consultée le 01 juillet 2012).
- IPCC (2007d). Climate Change 2007 : The physical Science Basis. The contribution of working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Dans IPCC Working Group I, Technical Support Unit, University of Bern Friedbühlstrasse, Switzerland, *Chapter 8: Climate Models and Their Evaluation*. <https://www.ipcc-wg1.unibe.ch/publications/wg1-ar4/ar4-wg1-chapter8.pdf> (page consultée le 12 juillet 2012).
- Khalili, M., Brissette, F. et Leconte, R. (2011). Effectiveness of Multi-Site Weather Generator for Hydrological Modeling. *Journal of the American Water Resources Association*, volume 47, numéro 2, p. 303-314.
- Kim, Y. -, Eum, H. -, Lee, E. -. et Ko, I. H. (2007). Optimizing operational policies of a Korean multireservoir system using sampling stochastic dynamic programming with ensemble streamflow prediction. *Journal of Water Resources Planning and Management*, volume 133, numéro 1, p. 4-14.
- Klipsch, J. et Hurst, M. (2007). HEC-ResSim Reservoir System Simulation User's Manual Version 3.0. Dans US Army Corps of Engineers, *Hec-ResSim*. http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ressim/documentation/HEC-ResSim_30_UsersManual.pdf (page consultée le 28 juillet 2012).
- Labadie, J. W. (2006). MODSIM: Decision support system for integrated river basin management. Dans *Proceedings of the iEMSs 3rd Biennial Meeting, "Summit on Environmental Modelling and Software"*
- Labadie, J. W. (2004). Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, volume 130, numéro 2, p. 93-111.
- Leander, R. et Buishand, T. A. (2007). Resampling of regional climate model output for the simulation of extreme river flows. *Journal of Hydrology*, volume 332, numéro 3-4, p. 487-496.
- Leander, R., Buishand, T. A., van den Hurk, B. J. J. M. et de Wit, M. J. M. (2008). Estimated changes in flood quantiles of the river Meuse from resampling of regional climate model output. *Journal of Hydrology*, volume 351, numéro 3-4, p. 331-343.

-
- Leconte, R., Trudel, M., Krau, S., Huaringa, U. et Côté P (2012). *Analyse et adaptation au contexte de changements climatiques des outils d'aide à la gestion du système hydrique du bassin versant de la rivière des Outaouais: mise en oeuvre sur le sous-bassin de la rivière du Lièvre*. Final report. Research projet funded by the Ouranos Consortium on Regional Climatology and Adaptation to Climate Change. Université de Sherbrooke. Département de Génie civil,
- Lenderink, G., Buishand, A. et Van Deursen, W. (2007). Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: Direct versus delta approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, volume 11, numéro 3, p. 1145-1159.
- Li, L., Xu, H., Chen, X. et Simonovic, S. P. (2010). Streamflow forecast and reservoir operation performance assessment under climate change. *Water Resources Management*, volume 24, numéro 1, p. 83-104.
- Lindström, G., Johansson, B., Persson, M., Gardelin, M. et Bergström, S. (1997). Development and test of the distributed HBV-96 hydrological model. *Journal of Hydrology*, volume 201, numéro 1-4, p. 272-288.
- Loucks, D. et Van Beek, E. (2005). *Water Resources Systems Planning and Managements. An Introduction to methods, models and applications*. United Nations Educational, Paris, France, 680 p.
- Manuel d'Hydrotel (2011). Hydrotel: Les bases théoriques. Dans Projet Hosting for Open Sources Software, Codeplex. <http://hydrotel.codeplex.com/documentation> (page consultée le 15 juin 2012).
- McFarlane, N. A., Boer, G. J., Blanchet, J. P. et Lazare, M. (1992). The canadian climate center second-generation general circulation model and its equilibrium climate. *Journal of Climate*, volume 5, p. 1013-1044.
- Minville, M., Brissette, F., Krau, S. et Leconte, R. (2009). Adaptation to climate change in the management of a Canadian water-resources system exploited for hydropower. *Water Resources Management*, volume 23, numéro 14, p. 2965-2986.
- Minville, M., Brissette, F. et Leconte, R. (2008). Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed. *Journal of Hydrology*, volume 358, numéro 1-2, p. 70-83.
- Minville, M., Brissette, F. et Leconte, R. (2010a). Impacts and uncertainty of climate change on water resource management of the Peribonka River System (Canada). *Journal of Water Resources Planning and Management*, volume 136, numéro 3, p. 376-385.
- Minville, M., Krau, S., Brissette, F. et Leconte, R. (2010b). Behaviour and performance of a water resource system in Quebec (Canada) under adapted operating policies in a climate change context. *Water Resources Management*, volume 24, numéro 7, p. 1333-1352.

-
- Murtagh, B. et Saunders, M. (1995). "MINOS 5.4 user's guide." *technical Rep.No50 L 83-20R*. Stanford Univ., Stanford, Calif.,
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry et J.R, W., J.R (2011). SWAT. Theoretical documentation. Version 2009. Dans Texas Water Resources Institute, *Publications*. <http://twri.tamu.edu/reports/2011/tr406.pdf> (page consultée le 6 juin 2012).
- Perrin, C. (2000). *Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative*. Thèse de Doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, France,
- Plummer, D. A., Caya, D., Frigon, A., Côté, H., Giguère, M., Paquin, D., Biner, S., Harvey, R. et De Elia, R. (2006). Climate and climate change over North America as simulated by the Canadian RCM. *Journal of Climate*, volume 19, numéro 13, p. 3112-3132.
- Quilbé, R., Rousseau, A. N., Moquet, J. -, Trinh, N. B., Dibike, Y., Gachon, P. et Chaumont, D. (2008). Assessing the effect of climate change on river flow using general circulation models and hydrological Modelling - Application to the chaudière River, Québec, Canada. *Canadian Water Resources Journal*, volume 33, numéro 1, p. 73-94.
- Ricard, S., Bourdillon, R., Roussel, D. et Turcotte, R. (2013). Global calibration of distributed hydrological models for large-scale applications. *Journal of Hydrologic Engineering*, volume 18, numéro 6, p. 719-721.
- Scharffenberg, W. et Fleming, M. (2010). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. User's Manual. Version 3.5.USA*, 316 p.
- Schmidli, J., Frei, C. et Vidale, P. L. (2006). Downscaling from GCM precipitation: A benchmark for dynamical and statistical downscaling methods. *International Journal of Climatology*, volume 26, numéro 5, p. 679-689.
- Seifi, A. et Hipel, K. W. (2001). Interior-point method for reservoir operation with stochastic inflows. *Journal of Water Resources Planning and Management*, volume 127, numéro 1, p. 48-57.
- Simonovic, S. P. et Li, L. (2003). Methodology for assessment of climate change impacts on large-scale flood protection system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, volume 129, numéro 5, p. 361-371.
- Simonovic, S. P. et Li, L. (2004). Sensitivity of the Red River basin flood protection system to climate variability and change. *Water Resources Management*, volume 18, numéro 2, p. 89-110.
- Singh, V. P. et Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, volume 7, numéro 4, p. 270-292.

-
- Teutschbein, C. et Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, volume 456–457, numéro 0, p. 12-29.
- Veijalainen, N., Dubrovin, T., Marttunen, M. et Vehviläinen, B. (2010). Climate Change Impacts on Water Resources and Lake Regulation in the Vuoksi Watershed in Finland. *Water Resources Management*, volume 24, numéro 13, p. 3437-3459.
- Vicuña, S., Dracup, J., Lund, J., Dale, L. et Maurer, E. (2010). Basin scale water system operations with uncertain future climate conditions: Methodology and case studies. *Water Resources Research*, volume 46:19,
- Vicuña, S., Dracup, J. A. et Dale, L. (2011). Climate change impacts on two high-elevation hydropower systems in California. *Climatic Change*, volume 109, numéro 1, p. 151-169.
- Vonk, E., Xu, Y. P., Booij, M. J., Zhang, X. et M. Augustijn, D. C. (2014). Adapting Multireservoir Operation to Shifting Patterns of Water Supply and Demand. *Water Resources Management*, volume 28, numéro 3, p. 625-643.
- Water Resources Engineering Area (2010). Aquatool. Dans Université Polytechnique de Valencia, *Aquatool software*. <http://www.upv.es/aquatool/software.html> (page consultée le 10 juin 2012).
- Wilby, R. L., Dawson, C. W. et Barrow, E. M. (2002). SDSM-a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, volume 17, numéro 2, p. 147-59.
- Wilby, R. L. et Harris, I. (2006). A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research*, volume 42, numéro 2,
- Wurbs, R. (2005). Comparative Evaluation of Generalized River/Reservoir System Models. Dans Texas A&M University, *Texas Water Resources Institute*. <http://twri.tamu.edu/reports/2005/tr282.pdf> (page consultée le 27 juillet 2012).
- Yeh, W. W. -. (1985). Reservoir management and operations models: a state-of-the-art review. *Water Resources Research*, volume 21, numéro 12, p. 1797-1818.