

Impact des changements climatiques sur les plans de gestion des lacs Saint-François et Aylmer au sud du Québec

Louis-Guillaume Fortin, Richard Turcotte, Stéphane Pugin, Jean-François Cyr et François Picard

Résumé : La présente étude résume les résultats d'un projet pilote portant sur les lacs Saint-François et Aylmer situés au centre sud du Québec et visant le développement d'une méthodologie pour évaluer le potentiel d'adaptation qu'offrent les plans de gestion des barrages face aux changements climatiques. Les simulations hydrologiques faites à partir des scénarios climatiques indiquent des modifications des apports annuels, variant d'une augmentation de 13 % à une baisse de 30 %, et un devancement des crues de printemps. Les étiages devraient, selon toutes les simulations réalisées, être plus sévères dans le futur. Les impacts sur les pointes de crues, les débits hivernaux et l'intensité des modifications de volumes annuels sont par contre variables selon les différents scénarios climatiques. La simulation du plan de gestion actuel montre que certaines simulations de changements climatiques modifieront le compromis actuel entre les différents usages de l'eau des lacs. Une réflexion sur l'adaptation du plan de gestion montre que celle-ci est possible, mais qu'une solution unique pour l'ensemble des scénarios possibles de changements climatiques n'est pas possible.

Mots-clés : changements climatiques, barrage, impacts, adaptation, modèles hydrologiques, Québec.

Abstract: This study presents the results of a pilot project, for the Saint-François and Aylmer lakes located in southern Quebec, aimed at developing a method to evaluate the adaptability of a current dam management plan to global climate changes. The hydrological simulations computed using available climate scenarios indicated modifications in annual water yields, from a 13% increase to a 30% decrease, and earlier spring floods. Peak flows, winter and summer low flows, and the level of increase in water yields vary depending on the studied climate scenario. The simulation of the current management plan shows that climate changes will affect the current trade-off between the various management objectives of the reservoirs. Adaptation solutions to the current management plan appeared to be feasible, but no unique solution applicable to all climate scenarios was found.

Key words: climate change, dam, impacts, adaptation, hydrologic modeling, Quebec.

1. Introduction

Le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) est une agence du ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs, et dont l'un des principaux mandats est la gestion de barrages appartenant au gouvernement du Québec (CEHQ 2001). Ces barrages sont principalement localisés dans le sud de la province à la tête de bassins versants, dont plusieurs sont de petites dimensions (50 à 5000 km²); ils visent des objectifs multiples (et parfois opposés) comme le contrôle des crues, l'alimentation en eau, le support aux activités récréatives et touristiques, la gestion faunique et la production hydroélectrique. Les plans de gestion des eaux de ces barrages consistent les directives de gestion qui servent à la conciliation des différents objectifs tout en

formalisant les compromis nécessaires entre les différents usagers. La définition de ces directives reste par ailleurs fortement dépendante de la variabilité de l'hydraulicité tant aux pas de temps horaire et journalier qu'aux échelles mensuelle, saisonnière et annuelle.

Or, il apparaît de plus en plus probable que les activités humaines depuis la période de la révolution industrielle contribuent à modifier le climat planétaire (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat 2001a). Selon différentes études portant sur l'impact de ces activités sur le climat, notamment celles compilées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), il semble que ces modifications iront en s'amplifiant dans les décennies à venir (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat 2001a, 2001b). De façon générale, il

Reçu le 28 octobre 2005. Accepté le 8 février 2007. Publié sur le site Web des Presses scientifiques du CNRC, à rcgc.cnrc.ca, le 22 août 2007.

L.-G. Fortin, R. Turcotte¹, S. Pugin, J.-F. Cyr et F. Picard. Centre d'expertise hydrique du Québec, 675, boulevard René-Lévesque Est, aile René-Lévesque, case 28, Québec, QC G1R 5V7.

Les commentaires sur le contenu de cet article doivent être envoyés au directeur scientifique de la revue avant le 31 décembre 2007.

1. Auteur correspondant (courriel : richard.turcotte2@mddep.gouv.qc.ca).

est maintenant courant d'entendre les différents spécialistes en changements climatiques parler d'un réchauffement progressif de la planète. Pour le sud du Québec, des études plus ponctuelles parlent de réchauffement généralisé de quelques degrés Celsius (Environnement Canada 1997; Ouranos 2004). La modification anticipée du régime de précipitation est plus variable, bien qu'il semble que ces dernières seront également affectées. Ces modifications du climat auront inévitablement un impact sur l'hydraulique des cours d'eau. En faisant l'hypothèse que le régime hydrologique subira des modifications significatives dans les prochaines décennies, il devient nécessaire de réfléchir aux impacts que ces modifications auront sur la gestion des lacs et de réévaluer la performance des plans de gestion pour l'atteinte des objectifs de gestion. En effet, l'équilibre actuel entre les différents objectifs et les compromis connus des représentants des différents usagers, sur lequel les plans de gestion trouvent leurs assises, risque alors d'être rompu.

C'est ainsi que, parmi les premiers jalons vers une meilleure compréhension des impacts des changements climatiques dans la gestion des barrages publics, le CEHQ a réalisé un projet visant le développement d'une méthodologie pour évaluer le potentiel d'adaptation qu'offrent les plans de gestion. Les lacs Saint-François et Aylmer, contrôlés respectivement par les barrages Jules-Allard et Aylmer et situés dans la région du Haut-Saint-François au centre sud du Québec, servent d'exemples à l'élaboration de cette méthodologie. Christensen et al. (2004) et Payne et al. (2004) ont réalisé des études similaires pour de grands bassins versants. Le présent texte résume les résultats obtenus pour un bassin versant de plus petite taille.

2. Stratégie globale de l'étude

Les figures 1 et 2 présentent de façon schématique les principaux éléments de la méthodologie. La figure 1 fait mention d'un cadre temporel caractérisé par un état de référence (1961–1990). Cette période de référence est le standard proposé par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et elle a été choisie parce qu'elle illustre en partie la variabilité climatique naturelle (Prudhomme et al. 2003). Une période de 30 ans permet également d'inclure la variabilité associée à des phénomènes à plus longue échelle comme El Niño (Morisson 2002). L'horizon futur défini (2040–2069) représentera la période soumise à l'effet des changements climatiques. Dans le cadre de cette étude, les conditions climatologiques en changements climatiques sont définies par comparaison entre des résultats de modélisation climatique pour la période de référence et la période future, ceci à l'aide de modèles de circulation générale (MCG). Les différences entre les températures et les précipitations modélisées qui sont ainsi détectées servent à perturber la climatologie historique observée aux stations climatologiques (1961–1990) pour décrire la climatologie future (2040–2069).

De même pour l'hydrologie, comme les conditions futures sont nécessairement définies à partir d'informations découlant de la modélisation mathématique, il est nécessaire que l'état de référence puisse être défini en utilisant les mêmes outils de modélisation. Ainsi, les apports en eau, tant pour la période de référence que pour la période future en change-

Fig. 1. Stratégie globale d'évaluation des impacts hydrologiques.

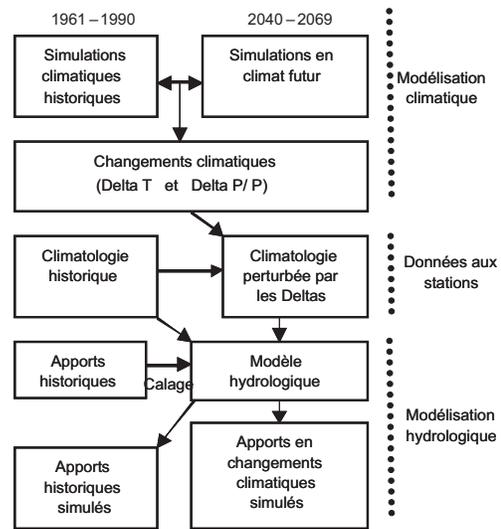
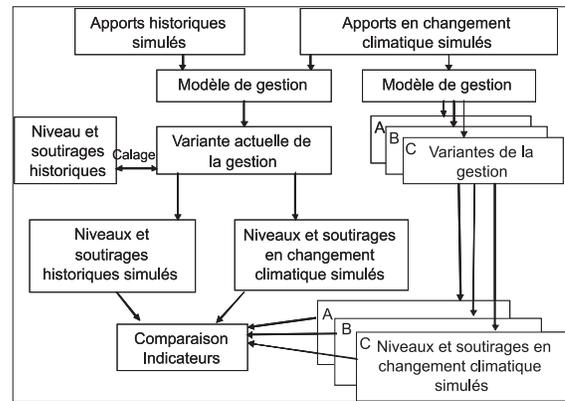


Fig. 2. Stratégie globale de comparaison des variantes de gestion pour les états de référence et futur.



ments climatiques, sont déterminés par l'utilisation conjointe de la climatologie (historique et perturbée) et d'un modèle hydrologique. Les apports historiques réellement observés servent uniquement au calage a priori des coefficients du modèle hydrologique, de sorte que celui-ci reproduise le comportement hydrologique du bassin versant.

À la figure 2, la même idée est reprise pour les niveaux et les soutirages historiques et perturbés qui sont eux aussi obtenus par modélisation. Dans ce cas, le modèle élaboré reproduit les pratiques de gestion proposées dans le plan de gestion du système et opérationnalisées en temps réel par l'équipe de gestionnaires. Dans ce cas aussi, les observations de niveaux et soutirages servent uniquement à s'assurer que le modèle mathématique s'approche de la gestion actuelle des lacs.

À la figure 2, des indicateurs de la performance de la gestion servent à quantifier les effets des changements climatiques. La dernière étape de la stratégie porte sur la proposition de nouvelles variantes de gestion. Les indicateurs serviront alors à qualifier chacune de ces variantes par rapport aux autres.

3. Système à l'étude

Les barrages Jules-Allard et Aylmer, situés à environ 150 km au sud-ouest de la ville de Québec, sont deux des barrages gérés en temps réel par le CEHQ (fig. 3). Comme le montre la figure 4, ces barrages retiennent les eaux des lacs Saint-François et Aylmer. Les lacs sont alimentés respectivement par des bassins versants de 1230 et 1730 km². Il faut savoir que les eaux transitant par le barrage Jules-Allard se déversent dans le bassin versant du barrage Aylmer, et que la superficie du bassin intermédiaire est de 500 km². Le système hydrique inclut aussi le bassin de la rivière au Saumon (1210 km²), qui n'est pas régularisé, et la centrale hydroélectrique de Weedon, aussi localisée sur la figure 4, pour une superficie totale de 2940 km².

4. Objectifs de gestion

Les objectifs de gestion des lacs sont multiples. Ils incluent la protection contre les crues autour des lacs Saint-François, Aylmer et au lac Louise situé en aval du lac Aylmer et tout juste en amont de Weedon, le soutien des niveaux des deux lacs à l'été et à l'automne pour des fins récréotouristiques, le support à la fraie du doré au printemps par l'atteinte hâtive d'un niveau cible dans le lac Saint-François et la production hydroélectrique à Weedon et aux cinq autres centrales situées en aval.

Le meilleur compromis à tirer entre ces objectifs de gestion opposés nécessite le recours à un processus de prévisions météorologique et hydrologique (Turcotte et al. 2004a), appuyé sur des observations hydrométriques et météorologiques en temps réel, de manière à permettre la prise de décision la plus éclairée possible, ciblée sur la philosophie du plan de gestion des ouvrages.

La définition du plan de gestion des eaux des lacs Saint-François et Aylmer est sous la responsabilité du CEHQ, qui agit à titre de propriétaire des ouvrages. Parallèlement, les différents défis de gestion qui se posent au fil des années, de même que les préoccupations des différents usagers, sont discutés par l'intermédiaire du Comité de consultation sur la gestion des eaux du Haut-Saint-François.

5. Plan et modèle de gestion

Les contraintes d'exploitation découlant des objectifs de gestion sont présentées aux tableaux 1 et 2. Les grandes lignes du plan de gestion appliqué pour respecter au mieux ces contraintes d'exploitation sont décrites dans deux documents produits par le CEHQ (Bilodeau et Picard 2004a, 2004b). En résumé, de mai à octobre, le plan consiste à maintenir les niveaux des lacs près des niveaux maximaux de retenue de manière à répondre aux besoins des villégiateurs. Lorsque la faiblesse des apports l'impose, les soutirages sont réduits aux débits minimaux pour éviter que les niveaux ne descendent sous les minimums prescrits. Au début de décembre, la vidange des lacs s'effectue par des soutirages garantissant un débit à Weedon égal au maximum pour la production d'énergie. Il est à noter que, même sans la production hydroélectrique, la vidange hivernale aurait lieu afin de préparer les lacs à recevoir la crue printanière. Cette vidange est limitée par les niveaux minimaux d'explo-

Fig. 3. Barrages gérés en temps réel par le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) et localisation du système hydrique du Haut-Saint-François.

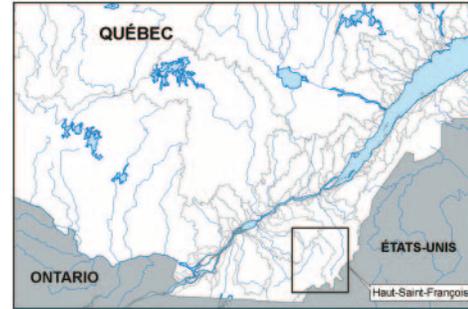


Fig. 4. Principales composantes du système hydrique du Haut-Saint-François.



Tableau 1. Contraintes d'exploitation s'appliquant sur les niveaux des lacs Saint-François et Aylmer.

Niveau	Saint-François (m)	Aylmer (m)
Maximal critique	291,00	249,66
Maximal d'exploitation	290,18	248,75
Maximal de retenue	289,57	248,14
Minimal estival	288,50	247,52
Minimal d'exploitation	281,95	245,70

tation de manière à respecter les besoins en alimentation en eau, ce qui peut amener la réduction des soutirages au cours de la saison hivernale (Turcotte et al. 2004b).

La gestion des eaux en période de crue vise à minimiser les inondations en aval, notamment au lac Louise, tout en respectant les niveaux maximaux d'exploitation. Lorsque les débits naturels en provenance de la rivière au Saumon augmentent de telle sorte que les apports à Weedon s'approchent des débits d'inondation, il est alors nécessaire de compenser cette situation en réduisant les soutirages aux barrages Aylmer et Jules-Allard. En ayant à l'esprit le principe de la réduction des impacts dans le cas d'une crue catastrophique, pour laquelle il serait impossible de respecter l'ensemble des contraintes liées aux crues, les contraintes liées à la sécurité

Tableau 2. Contraintes d'exploitation s'appliquant sur les débits (m^3/s) aux barrages Jules-Allard, Aylmer et à la centrale Weedon.

Débit	Jules-Allard	Aylmer	Weedon
D'inondation au lac Louise	—	—	311
Maximal pour la production d'énergie	—	—	60
Minimal	8	10	—

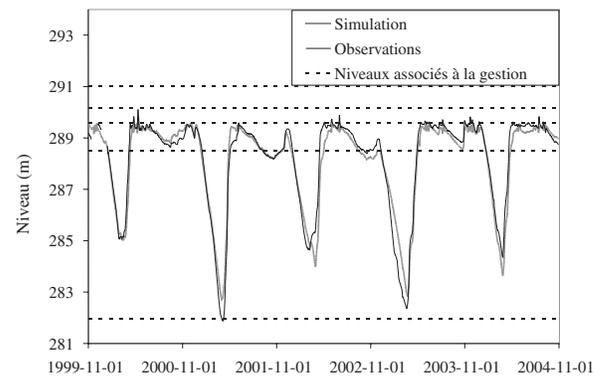
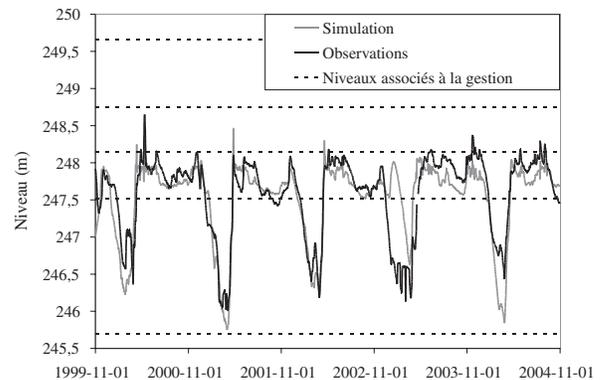
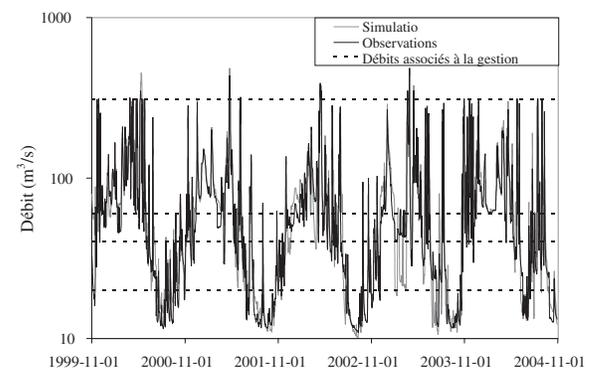
des barrages face à la rupture ont d'abord préséance, suivies de celles qui permettent de minimiser les dommages tant en aval que sur le pourtour des lacs.

À l'aide du plan de gestion et des contraintes associées, un modèle de gestion simplifié a été développé dans le cadre du projet. Ce modèle est alimenté par des données d'apports naturels entrant dans les lacs Saint-François et Aylmer, de même que les apports naturels arrivant à Weedon en provenance de la rivière au Saumon et des autres tributaires secondaires. Les données sont fournies au modèle au pas de temps journalier. Partant des conditions initiales en début de journée, le modèle choisit des soutirages constants pour les prochaines 24 h qui respectent le mieux possible les contraintes de gestion.

Sur le plan algorithmique, le modèle effectue chaque jour une première évaluation des soutirages en utilisant une stratégie de base. En période de vidange, cette stratégie de base consiste à choisir des soutirages permettant d'atteindre à Weedon le débit maximal pour la production d'énergie. Pour le reste de l'année, la stratégie de base est plutôt de soutirer les débits minimaux. Après cette première évaluation, un aspect prévisionnel est pris en compte : les niveaux correspondants après 2 jours sont analysés. Le modèle de gestion est fait en assumant une prévision exacte, c'est-à-dire qu'il considère comme prévision les apports qui seront réellement observés aux pas de temps suivants. Selon que ces niveaux soient trop élevés ou trop bas en regard des différentes contraintes de gestion, des ajustements aux soutirages sont faits. Pour les niveaux trop élevés, en premier lieu, une fonction permettant d'équilibrer les niveaux des deux réservoirs est utilisée. Ensuite, si une violation des contraintes est nécessaire, ces ajustements sont effectués en s'assurant de choisir des soutirages qui contribuent à minimiser les impacts de la crue. La même idée s'applique à l'inverse pour les bas niveaux. Ce sont les soutirages ajustés qui sont utilisés pour définir l'état initial du pas de temps suivant.

Le niveau minimum atteint à la fin de la période de vidange est aussi considéré. Lors de la vidange, une estimation du niveau à la fin de l'hiver à partir des apports moyens hivernaux a été considérée. Lorsque qu'il y a un risque que le niveau minimum atteint soit sous le niveau minimum prescrit, les soutirages sont diminués afin de correspondre à des débits seuils pour la production hydroélectrique, jusqu'à atteindre en dernier lieu les débits minimaux.

Cette approche a été testée en utilisant les apports historiques récents de manière à juger la qualité des propositions de soutirages par rapport aux observations. Comme le montrent les figures 5, 6 et 7, de manière générale, la gestion simulée est satisfaisante par rapport à celle réalisée par les ingénieurs

Fig. 5. Niveaux observés et simulés à l'aide du modèle de gestion au lac Saint-François pour la période 1999 à 2004.**Fig. 6.** Niveaux observés et simulés à l'aide du modèle de gestion au lac Aylmer pour la période 1999 à 2004.**Fig. 7.** Comparaison entre les apports observés et simulés à Weedon à l'aide du modèle de gestion pour la période 1999 à 2004.

gestionnaires des barrages. Cela dit, il faut bien saisir les limitations du modèle qui ressortent de ces figures.

D'abord, le fait que le modèle ne détermine qu'un seul soutirage par jour et l'applique à minuit ne permet pas de reproduire l'ensemble des nuances associées à des ajustements de soutirages plus fréquents ou à des heures différentes à l'intérieur de la journée. Cela est particulièrement important dans les situations de fortes crues. D'après la figure 7,

une prise de décision unique par jour conduit à des oscillations dans les soutirages qui ne sont pas conformes à la réalité. Autrement, il faut noter qu'un algorithme basé principalement sur les apports médians hivernaux et sur la date la plus tardive observée pour le début de la fonte a été défini pour tenter d'imiter le comportement des gestionnaires de l'ouvrage quant aux risques d'abaisser les lacs sous les niveaux minimums d'exploitation à la fin de l'hiver. Dans la réalité, les gestionnaires basent plutôt leurs décisions sur une approche de prévision hydrologique d'ensemble (Turcotte et al. 2004b).

Il est possible de voir, à l'analyse des figures 5 et 6, que cette stratégie simplifiée conduit quelques fois à des sous-évaluations et d'autres fois à des surévaluations des niveaux. Une des causes des surévaluations est les faibles apports hivernaux comme à l'hiver 2002–2003. En contexte de changements climatiques, cette situation sera moins fréquente, puisque toutes les simulations donnent des apports plus forts en hiver. Ensuite, le niveau du lac Aylmer a été un peu plus difficile à reproduire, puisque les apports totaux dépendaient aussi des soutirages simulés au barrage Allard. Malgré ce fait, les tendances générales du niveau du lac sont bien reproduites. La vidange hivernale est bien synchronisée pour les deux lacs, tandis que les niveaux estivaux mesurés et simulés suivent la même tendance en général. Finalement, il faut savoir que les gestionnaires peuvent être amenés à s'écarter intentionnellement du plan de gestion pour prendre en compte une situation particulière. Cela peut se produire, par exemple, lorsqu'une proposition est faite par le comité des usagers ou par les autorités ministérielles. Des raisons techniques et scientifiques peuvent également être une motivation pour s'écarter du plan de gestion afin de limiter les impacts d'une situation exceptionnelle. Les différences, mêmes faibles, entre les résultats émanant du modèle et les observations incitent à faire les comparaisons pour l'évaluation des impacts des changements climatiques en utilisant le modèle comme filtre de la réalité, et ce, même pour la période de référence pour laquelle des observations sont disponibles.

6. Les indicateurs de violation de contraintes

Une des façons de mesurer la performance d'un plan de gestion est d'évaluer l'occurrence de la violation des différentes contraintes d'exploitation que sont les niveaux et les débits des tableaux 1 et 2. Des différentes contraintes apparaissant dans ces tableaux, il faut noter que les niveaux maximaux de retenue et les débits minimaux n'ont pas été utilisés comme indicateurs. En effet, le niveau maximal de retenue est un niveau qui permet de garder une réserve (hauteur entre le niveau maximal de retenue et le niveau maximal d'exploitation) de 60 cm aux deux lacs pour le laminage des crues (Bilodeau et Picard 2004a, 2004b), avant l'atteinte du niveau maximal d'exploitation qui est aussi le seuil d'inondation sur les rives des lacs Saint-François et Aylmer. Il est utilisé pour la prise de décision mais n'est pas considéré comme un niveau causant des problèmes lorsqu'il est atteint. De même, les algorithmes du modèle de simulation de la gestion obligent que les débits minimaux soient respectés intégralement, ce qui annule l'intérêt qui pourrait être porté à cet indicateur. Il faut aussi noter que, pour les objectifs de

production hydroélectrique, les quantités d'eau n'excédant pas le maximum pour la production à Weedon et pouvant donc être utilisées pour la production ont aussi été exprimées sous la forme d'un indicateur. Finalement, un comptage direct du nombre de violations de contraintes, autant pour les simulations sur la période de référence qu'en changement climatique, est utilisé pour attribuer une valeur aux indicateurs de dépassement.

Le tableau 3 résume les résultats du modèle de gestion sur la période de calage et indique une bonne performance du modèle. En s'attardant à quelques détails, il est possible de noter que les abaissements en dessous du niveau minimal estival en simulation se produisent seulement au lac Saint-François. Les algorithmes du modèle semblent favoriser le niveau du lac Aylmer lors de l'opération d'équilibrage des niveaux entre les deux lacs. Cependant, la somme de ces dépassements pour les deux lacs (23 + 9 pour les niveaux historiques et 33 + 0 pour la simulation de gestion des apports historiques) est très semblable, ce qui laisse croire que le modèle représente bien l'occurrence réelle de problèmes de niveaux estivaux lorsque les deux lacs sont pris en compte. Pour ce qui est de l'indicateur de production d'électricité, le simulateur reproduit bien les observations, tout comme pour l'occurrence des dépassements du débit maximal à Weedon (14 simulés contre 17 observés sur une période de 30 ans). Il faut aussi rappeler que les différences dans les dépassements du niveau minimum d'exploitation sont principalement causées par la façon dont le risque de manquer d'eau à la fin de l'hiver a été modélisé. La qualité du calage du modèle de gestion pourrait peut-être être améliorée mais, encore une fois, son effet sur l'analyse en changements climatiques sera atténué par le fait que les comparaisons se feront entre les simulations des deux régimes climatiques et non à partir des données observées.

7. Modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique permet de simuler la réponse d'un bassin versant à diverses conditions météorologiques. Il existe un nombre élevé de modèles hydrologiques (par exemple, Singh 1995; Singh et Frevert 2002) qui se distinguent principalement par leur façon de représenter mathématiquement les processus hydrologiques et leurs échelles spatiale et temporelle d'application. Dans le cadre de la présente étude, le modèle Hydrotel est utilisé (Fortin et al. 2001).

Le modèle Hydrotel distribue ses calculs spatialement à l'intérieur du bassin versant sur des unités hydrologiques correspondant plus ou moins aux sous-bassins de chacun des tronçons de l'ensemble des cours d'eau du réseau hydrographique. Les algorithmes simulant les différents processus sont basés sur une approche conceptuelle, tout en utilisant une paramétrisation reflétant le plus possible les phénomènes physiques impliqués. Le modèle a la caractéristique de pouvoir s'adapter à la variété de données disponibles dans la mesure où des choix d'algorithmes plus ou moins gourmands en données sont applicables pour la simulation des processus. Outre le fait que le modèle possède un niveau de complexité supérieur à la plupart des modèles utilisés dans les études en impact des changements climatiques, notamment par sa distribution spatiale et l'incorporation

Tableau 3. Occurrences de dépassement des indicateurs de performance de la gestion pour la période de calage du modèle (1999–2004) : Occurrences historiques et simulées par le modèle de gestion alimenté par les apports historiques.

Indicateur	Observations historiques	Simulation de la gestion à l'aide des apports historiques
Lac Saint-François		
Niveaux		
Maximum critique	0	0
Maximum d'exploitation	0	0
Minimum estival	23	33
Minimum d'exploitation	6	0
Lac Aylmer		
Niveaux		
Maximum critique	0	0
Maximum d'exploitation	0	0
Minimum estival	9	0
Minimum d'exploitation	0	0
Weedon		
Débit maximum (311 m ³ /s)	17	14
Électricité [(jours)(nombre de turbines)/an]	660,6	652,3

d'une certaine paramétrisation des phénomènes physiques, la sélection de ce modèle a été facilitée par le fait de son utilisation actuelle en mode prévisionnel pour le système du Haut-Saint-François (Turcotte et al. 2004a).

Les figures 8 et 9 présentent la vérification de la qualité du calage du modèle sur une échelle mensuelle et journalière. D'après ces figures, les apports simulés à la station hydrométrique de la rivière au Saumon sont satisfaisants dans l'ensemble. La figure 8 montre que le patron annuel des apports est assez bien reproduit pour les 15 années pour lesquelles des données sont disponibles, sauf pour les mois de mars et mai. Dans une perspective d'évaluation des impacts des changements climatiques, il est à remarquer que les corrections des stocks de neige à partir de relevés nivométriques faites au cours de la saison d'accumulation et de la fonte de la neige ont été désactivées. Ceci implique que les volumes printaniers ne sont pas simulés avec précision par le modèle. Ce résultat bien connu est associé à l'imprécision des mesures de précipitations solides par réseau d'observations au sol. De tenter de compenser cette imprécision en utilisant des coefficients de calage anormaux n'apparaît pas une solution intéressante, et il a été choisi d'accepter cette imprécision. La figure 9 montre que certaines crues ne sont pas très bien simulées au pas de temps journalier. Ces différences s'expliquent en partie par le pas de temps de simulation de 24 h qui est insuffisant pour capturer la distribution temporelle des pluies qui génèrent ces crues et en partie par le calage des paramètres du modèle qui a été fait préalablement à la présente étude pour répondre aux impératifs de la prévision hydrologique. Dans ce contexte, les données climatologiques utilisées lors du calage sont celles qui sont disponibles en temps réel. Ce réseau de données possède, d'une part, une résolution spatiale beaucoup moins dense que celle du réseau disponible pour la période de référence (4 stations au lieu de 18 stations) mais, d'autre

Fig. 8. Apports moyens mensuels (1975–1990) observés et simulés avec Hydrotel au site de la station hydrométrique de la rivière au Saumon.

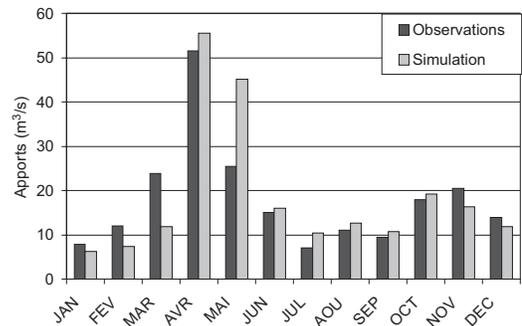
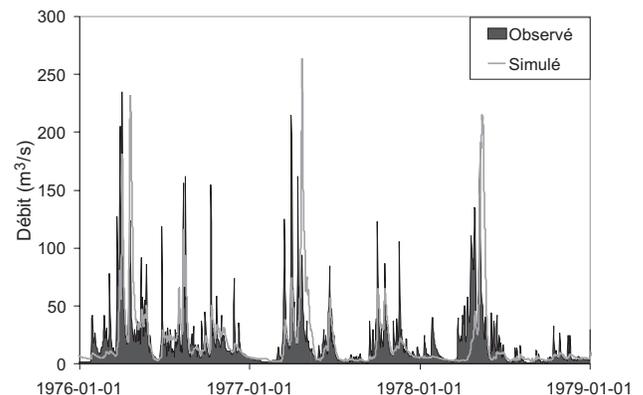


Fig. 9. Apports quotidiens (1976–1979) observés et simulés avec Hydrotel au site de la station hydrométrique de la rivière au Saumon.



part, sa résolution temporelle est plus élevée (horaire plutôt que journalier). Compte tenu de la grande sensibilité des modèles hydrologiques aux caractéristiques des réseaux de stations qu'ils utilisent (Andréassian et al. 2001), il n'est pas surprenant d'obtenir des simulations dont la qualité n'est pas optimale. Pugin et al. (2005) ont démontré par contre que l'effet des paramètres de calage pour les simulations hydrologiques, lorsque celles-ci sont comparées entre elles pour estimer l'effet relatif des changements climatiques, n'est pas majeur. Dans ce contexte, l'état actuel du calage n'invalide pas les conclusions sur l'impact hydrologique des changements climatiques qui sont tirées plus loin.

8. Scénarios de changements climatiques

Le GIEC se penche depuis 1988 sur l'évolution du climat. Bien qu'il soit difficile de prédire le climat futur, des efforts sérieux ont été faits au cours des dernières années pour formaliser la réflexion sur différentes réalisations possibles du climat pour les prochaines décennies. Ces réalisations sont obtenues en combinant un scénario d'émission de gaz à effet de serre et un MCG.

En effet, différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre ont été proposés par le GIEC en fonction d'hypothèses sur les croissances industrielle, technologique et démographique mondiales (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat 2000). Il faut aussi retenir que ces scénarios sont tous considérés équiprobables au moment actuel (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat 2000). La construction de réalisations possibles du climat repose sur des outils de modélisation atmosphérique qui simulent le comportement de l'atmosphère et de ses différentes variables d'état (température, pression atmosphérique, vitesse du vent, etc.) la décrivant sur de longues périodes. Cette modélisation se fait principalement à l'aide de MCG qui ont comme caractéristique de simuler l'ensemble de la planète sur une grille à faible résolution. Plusieurs organisations gouvernementales et centres de recherche à travers le monde possèdent leur propre modèle et rendent disponibles leurs résultats à l'ensemble de la communauté par le biais du GIEC (voir tableau 4).

Pour un projet en impact et adaptation, il est nécessaire d'utiliser plusieurs scénarios afin d'avoir plus d'une trajectoire évolutive possible du climat (New et Hulme 2000). Ensuite, il est aussi reconnu que, pour le futur proche (2040–2069), les MCG considérés génèrent plus de dispersion dans l'évolution du climat que les scénarios climatiques. Ainsi, dans le cadre du projet, six scénarios tirés de trois MCG (CSIRO-mk2, ECHAM4 et HadCM3) et de deux hypothèses d'émissions de GES ont été retenus. Les modèles CGCM2 et GFDL-R30 ont été rejetés en raison de leur schéma de surface à une couche seulement (voir Chaumont et Chartier 2005). Le modèle CCSR/NIES a été rejeté en raison de sa résolution trop faible, et le modèle NCAR-PCM a été rejeté parce que les simulations commencent en 1980, ce qui ne permet pas d'utiliser la période 1961 à 1990. Un scénario de chacune des familles de scénarios d'émission de gaz à effet de serre A2 et B2 a été retenu pour chacun des trois MCG, ce qui évite la surreprésentation d'un MCG. La famille de scénarios A2 représente une croissance de la population

continue et un développement économique plutôt lent. La famille de scénarios B2 représente une croissance de la population un peu moins forte et une croissance économique intermédiaire (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) 2001). Ces scénarios ont été retenus puisqu'ils étaient les seuls à avoir été modélisés par tous les MCG considérés par le GIEC.

En outre, il faut savoir que les réalisations possibles du climat ne sont pas utilisables directement pour la simulation hydrologique. En effet, la résolution (temporelle et spatiale) trop grossière des résultats et les différents biais des variables de sortie imposent un traitement préalable des résultats que l'on appelle la mise à l'échelle (IPCC-TGCI 1999).

Pour la présente étude, la méthode de mise à l'échelle utilisée (méthode des Deltas) est très simple bien qu'encore répandue dans la littérature récente portant sur les impacts hydrologiques des changements climatiques (IPCC-TGCI 1999; Wilby et al. 2004; Dooty et al. 2005). Elle consiste à calculer des différentiels mensuels moyens entre les résultats des simulations numériques des 30 années de la période de référence (1961–1990) et ceux des 30 années de la période en climat futur (2040–2069). Pour les températures, ces différentiels sont des valeurs absolues (ΔT), alors que pour les précipitations ce sont des différences relatives ($\Delta P/P$). Les deltas de température ont par la suite été lissés par un algorithme afin d'obtenir des valeurs journalières (fig. 10). Cet algorithme conserve la moyenne mensuelle des deltas et utilise la méthode d'interpolation cubique d'Hermite par morceaux. Cette méthode conserve la monotonie des données et évite par le fait même l'introduction d'oscillations non désirables dans les données interpolées. Cette procédure a été ajoutée afin d'éviter les sauts brusques dans les données de température et dans la modélisation de l'évapotranspiration. Ces différentiels ou deltas sont ensuite appliqués sur les données mesurées aux stations pour ainsi définir une climatologie perturbée caractérisant un scénario futur.

Se basant sur un seul moment statistique, la moyenne des différences, et l'appliquant à l'échelle mensuelle, l'approche des deltas a le défaut de ne pas donner d'information sur les différences dans la variabilité temporelle inter-journalière des variables climatiques. Notamment, l'approche permet d'estimer une augmentation ou une diminution de l'intensité des événements ponctuels, mais ne peut pas donner d'indication sur une augmentation ou non du nombre de journées consécutives sans précipitation dans un contexte de changements climatiques. Cette limitation est fondamentale et doit transcender l'analyse des résultats.

Finalement, il faut noter que les données des modèles, qui spatialement ont alimenté l'étude des différentiels, sont celles de l'ensemble des points de grilles qui appartiennent à la vaste région du sud du Québec telle que présentée à la figure 11. L'utilisation de plusieurs points de grille pour les calculs de deltas (Pugin et al. 2005; Chaumont et Chartier 2005) a montré l'effet bénéfique de ce choix de données plus globales par rapport à celui d'utiliser un point de grille unique à proximité du système du Haut-Saint-François. En effet, cette stratégie permet non seulement de garder la même région de référence pour tout les MCG, mais elle donne des résultats de deltas temporels plus lissés que lors de l'utilisation d'un seul point de grille.

Tableau 4. Liste des modèles de circulation générale (MCG) dont les données sont diffusées par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), ainsi que les scénarios de changements climatiques modélisés (GIEC 2001).

MCG	Pays	Familles						
		A1b	A1T	A1FI	A1	A2	B1	B2
CCSR/NIES	Japon	1	1	1	—	1	1	1
CGCM2	Canada	—	—	—	—	1	—	1
CSIRO-Mk2	Australie	—	—	1	—	1	1	1
ECHAM4	Allemagne	—	—	—	—	1	—	1
GFDL-R30	États-Unis	—	—	—	—	1	—	1
HadCM3	Grande-Bretagne	—	—	1	—	3	1	2
NCAR-PCM	États-Unis	—	—	—	—	1	—	1

Fig. 10. Deltas température mensuels et lissés avec la méthode d'interpolation cubique d'Hermite par morceaux pour le scénario HadCM3-A2b.

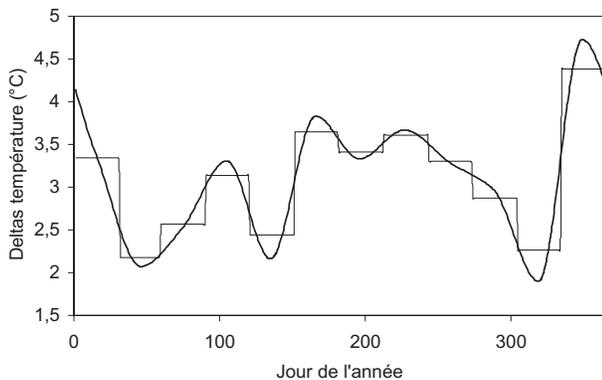
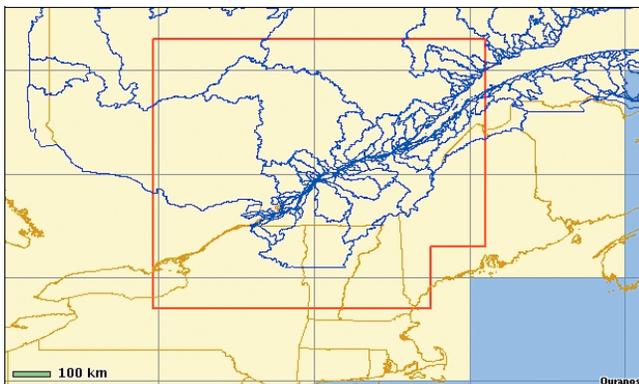


Fig. 11. Maillage du modèle HadCM3 et polygone à 6 côtés (en rouge dans la version Web) considéré pour le calcul des différentiels climatiques (d'après Chaumont et Chartier 2005).



9. Impacts hydrologiques

L'utilisation des différentes réalisations climatiques futures (combinaison d'un modèle climatique et d'un scénario d'émission de gaz à effet de serre) pour alimenter les modèles hydrologiques conduit à un ensemble de scénarios d'impacts hydrologiques. Dans la perspective d'avoir une méthodologie complète d'analyse des impacts et des adaptations, il

s'avère essentiel de disposer d'une stratégie permettant d'appréhender cette variété de scénarios d'impacts.

Le tableau 5 présente les deltas associés aux six réalisations futures du climat qui ont été utilisées. Une analyse complète de la caractérisation des réalisations pour leur application dans le sud du Québec a été réalisée par Pugin et al. (2005). Selon les différentes réalisations, la température devrait augmenter de 2,5 °C à 4,9 °C, et les précipitations devraient croître de 2 % à 15 % en moyenne annuellement. Ces augmentations ne semblent pas suivre de patron annuel qui soit bien défini.

Ces deltas ont servi à créer des séries météorologiques pour la période future (2040–2069) qui ont par la suite alimenté le modèle Hydrotel. La figure 12 présente les apports mensuels moyens simulés pour l'état de référence (1961–1990) et pour l'état futur (2040–2069) au lac Saint-François. Il faut par ailleurs rappeler que l'impact des changements climatiques sur la variabilité des crues est plus important à l'échelle journalière que l'indiquent les apports mensuels.

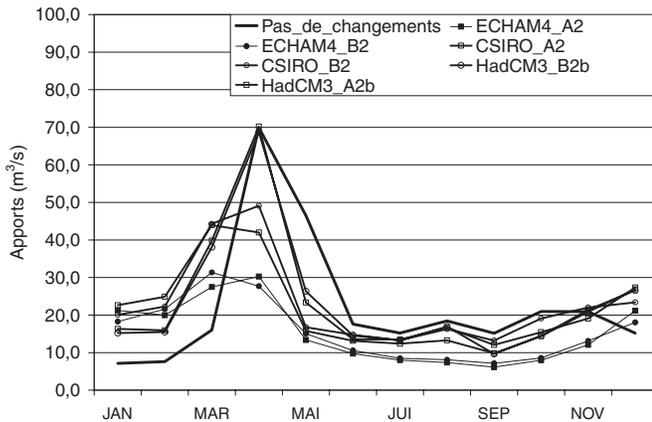
Dans le cadre de l'étude, l'objectif était de couvrir une large variabilité de l'hydrogramme des apports futurs possibles. Le tableau 6 présente les apports moyens annuels modélisés avec Hydrotel. Cela permet de classer les réalisations de la plus sèche à la plus humide. Ainsi, pour la gestion, les deux scénarios extrêmes (plus humide : HadCM3-A2b, plus sec : ECHAM4-A2) et un scénario intermédiaire (CSIRO-A2) ont été retenus. La crue de printemps est devancée de manière significative, et ce, pour les trois réalisations. La pointe de crue de printemps des réalisations ECHAM4-A2 et CSIRO-A2 est de beaucoup atténuée. Pour ce qui est des apports durant l'été, ils s'avèrent être légèrement diminués pour les trois réalisations considérées. Les apports hivernaux sont dans tous les cas plus élevés que lors de la période de référence.

10. Adaptation du plan de gestion

En utilisant les apports simulés tant pour la période de référence que pour la période 2040–2069 comme intrant pour le modèle de la gestion, il est possible d'évaluer les niveaux et les débits résultants pour ces périodes. Ensuite, l'application du plan de gestion actuel permet de voir, au tableau 7, les occurrences associées aux indicateurs de performances. Il est possible de remarquer que l'état de référence est caractérisé par un certain nombre de dépassements des niveaux et débits maximaux et de dépassements par le bas

Tableau 5. Différentiels climatiques selon le mois pour les six réalisations considérées (information tirée de Chaumont et Chartier 2005).

Mois	ECHAM4-A2		ECHAM4-B2		CSIRO-A2		CSIRO-B2		HadCM3-A2b		HadCM3-B2b	
	ΔT (°C)	$\Delta P/P$										
Janvier	6,9	1,05	6,4	1,01	5,6	1,21	5,1	1,24	3,3	1,21	3,2	1,18
Février	5,2	1,02	6,2	1,10	5,0	1,27	4,2	1,19	2,2	1,22	2,4	1,10
Mars	4,0	1,08	5,6	1,15	5,1	1,21	4,1	1,23	2,6	1,35	2,5	1,28
Avril	5,2	0,98	4,7	1,03	6,4	1,25	4,9	1,08	3,1	1,16	2,9	1,17
Mai	4,1	1,00	3,3	1,04	5,1	1,09	4,1	1,09	2,4	1,04	1,8	1,13
Juin	3,7	1,00	3,3	0,98	3,7	1,16	3,4	1,18	3,6	1,08	3,0	1,03
Juillet	4,2	0,92	3,9	0,93	3,9	1,11	3,9	1,12	3,4	1,17	3,0	1,13
Août	4,9	0,90	4,2	0,91	3,1	1,05	2,5	1,13	3,6	1,14	3,4	1,14
Septembre	4,8	1,00	4,1	1,05	3,4	1,02	2,9	1,11	3,3	1,08	3,1	0,89
Octobre	4,6	0,98	4,0	0,90	3,0	1,05	3,0	1,11	2,9	0,99	2,5	1,05
Novembre	4,6	1,11	4,6	1,09	3,6	1,17	4,1	1,10	2,3	1,06	2,5	1,17
Décembre	6,1	1,30	5,8	1,02	5,2	1,21	3,5	1,15	4,4	1,35	3,8	1,33

Fig. 12. Apports mensuels simulés au lac Saint-François : états de référence et futur selon les réalisations futures du climat considérées.**Tableau 6.** Apports moyens annuels (Mm^3/an) pour les différentes réalisations futures du climat.

Réalizations futures	Apports totaux		Apports intermédiaires
	Saint-François	Aylmer	
Période de référence	712,8	291,2	716,9
ECHAM4-A2	485,1	202,0	467,9
ECHAM4-B2	493,3	204,6	476,2
CSIRO-A2	683,1	281,1	677,7
CSIRO-B2	721,7	296,4	721,7
HadCM3-B2b	738,3	303,2	740,0
HadCM3-A2b	745,1	306,6	746,6

des niveaux minimaux, bien qu'aucune contrainte critique ne soit dépassée. Il faut noter que le nombre de dépassements des niveaux minimaux estivaux est jugé très élevé par les gestionnaires de l'ouvrage. Il faut savoir que 60 % de ces dépassements ont lieu au cours de 4 années critiques. Ce nombre de violations de contraintes, auquel il est possible d'ajouter la capacité actuelle de production électrique, représente le compromis explicite ou implicite fait par les différents usagers pour trouver un équilibre entre les différents

usages contradictoires des lacs. Partant de l'hypothèse que ce compromis doit être maintenu dans le futur, il devient pertinent d'évaluer, dans un premier temps, l'impact des changements climatiques sur ces mêmes indicateurs et, dans un deuxième temps, les pistes d'adaptation au plan de gestion pour maintenir le compromis actuel et ainsi compenser les impacts de changements climatiques.

Pour la réalisation HadCM3-A2b, la gestion actuelle permet de reproduire assez bien l'état de compromis historique entre les différents usages, ce qui laisse croire qu'il n'y aurait pas beaucoup de différences dans la gestion à appliquer par rapport à la période de référence dans le cas où ce scénario se réaliserait. Cependant, pour les réalisations ECHAM4-A2 et CSIRO-A2, le nombre de violations des niveaux minimaux estivaux est augmenté d'un facteur 4 et d'un facteur 2 environ. Ceci s'explique par deux causes simultanées soit : la diminution des apports de mai à novembre et la désynchronisation entre la stratégie de vidange et de remplissage du lac actuelle et l'augmentation des apports hivernaux et le devancement de l'intensité de la crue de printemps.

L'étape suivante consiste à rechercher des solutions d'adaptation de gestion qui permettraient de retrouver des occurrences de dépassement similaires à ceux de la période de référence. Deux variantes de gestion adaptées spécifiquement aux réalisations ECHAM4-A2 et CSIRO-A2 ont été développées dans cette optique, et les dépassements qui leurs sont associés sont aussi présentés au tableau 7. Pour adapter la gestion à la réalisation ECHAM4-A2, la période de gestion hivernale a dû être raccourcie de 2 mois, et la période de remplissage du lac a été devancée conséquemment de 2 mois. De même, les niveaux minimums à ne pas dépasser en période de vidange ont dû être rehaussés (passant de 281,95 à 286,25 m au lac Saint-François et de 245,70 à 246,70 m à Aylmer). Pour adapter la gestion à la réalisation CSIRO-A2, la période de vidange a été raccourcie de 3 semaines, ce qui s'est traduit par le devancement de la période de remplissage de 3 semaines. Ainsi, il a été possible de synchroniser la faible crue printanière de ces deux réalisations avec la période de remplissage et de diminuer les volumes nécessaires au remplissage des deux lacs dans le cas de la réalisation ECHAM4-A2. L'occurrence des dépassements par le bas des niveaux minimaux durant la période estivale a ainsi diminué

Tableau 7. Occurrences des indicateurs de performance de la gestion simulée pour trois possibilités de gestion; états de référence (1961–1990) et futur (2040–2069) pour les réalisations extrêmes.

Indicateur	Type	État de référence	Gestion actuelle			Gestion adaptée à ECHAM4-A2			Gestion adaptée à CSIRO-A2		
			ECHAM4 A2	CSIRO A2	HadCM3 A2b	ECHAM4 A2	CSIRO A2	HadCM3 A2b	ECHAM4 A2	CSIRO A2	HadCM3 A2b
Lac St-François											
Niveau											
Maximum critique	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maximum d'exploitation	1	10	0	8	10	8	8	39	82	0	27
Minimum estival*	2	789	3096	1702	759	746	266	266	122	2690	252
Minimum d'exploitation	2	0	474	29	0	0	0	0	0	452	0
Lac Alymer											
Niveau											
Maximum critique	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maximum d'exploitation	1	17	0	8	13	8	39	81	0	8	31
Minimum estival*	2	172	2172	572	200	176	118	1366	0	174	173
Minimum d'exploitation	2	0	146	0	0	0	0	92	0	0	0
Weedon											
Débit maximum (311 m ³ /s)	1	16	4	17	13	4	16	29	2	12	12
Électricité [(jours)(nombre de turbines)/(an)]	3	595,6	363,9	523,3	578,6	344,7	482,2	498,1	368,9	526	567,1

Nota : 1, nombre de jours avec un niveau supérieur à l'indicateur; 2, nombre de jours avec un niveau inférieur à l'indicateur; 3, nombre de turbines en fonction à 20 m³/s pendant une journée.
*Estimé du 1^{er} juin au 30 septembre.

dans la mesure où les niveaux au début de l'été correspondent à un remplissage complet du lac. Le fait que la crue printanière soit plus faible dans ces réalisations permet aussi de diminuer l'occurrence des inondations (dépassement des niveaux maximums d'exploitation et du débit maximal à Weedon). Somme toute, l'adaptation aux réalisations ECHAM4-A2 et CSIRO-A2 mène à une réduction généralisée des violations de contraintes. Ce type de stratégie avait été testé par Payne et al. (2004) et menait à une baisse de production d'énergie, tout comme dans le cas présent.

Par ailleurs, il est essentiel de mentionner que la proposition d'adaptation du plan de gestion n'est pas compatible avec le scénario HadCM3-A2. Pour ce qui est de la gestion adaptée au scénario ECHAM4-B2 appliquée au scénario HadCM3-A2b, l'occurrence des inondations a augmenté de manière significative aux deux lacs et à Weedon.

11. Conclusions

L'impact des changements climatiques sur la gestion des lacs est une question complexe dont l'analyse nécessite le recours à des outils de modélisation. Le présent travail a servi à développer une méthodologie qui définit toutes les étapes nécessaires à l'élaboration d'une stratégie d'adaptation de la gestion d'un bassin versant géré par des ouvrages de retenue des eaux.

L'étude a été réalisée en considérant trois MCG (HadCM3, ECHAM4 et CSIRO-mk2) et deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre (A2 et B2), pour un total de six réalisations. Les résultats obtenus indiquent que les changements climatiques pour l'horizon 2050 (2040–2069) auront des impacts notables sur l'hydrologie de la partie sud du Québec. Notamment, les apports annuels varieront d'une augmentation de 15 % à une baisse de 30 %, et les crues de printemps seront devancées de quelques jours pour toutes les réalisations considérées. Les étiages seront plus sévères pour les six réalisations du climat considérées. Les impacts sur l'intensité des pointes de crues printanières et estivales et (ou) automnales, les débits hivernaux, et l'intensité des modifications de volumes annuels sont notables bien que variables selon la réalisation étudiée.

Les impacts sur les niveaux des lacs et les débits des barrages pour l'horizon 2050 (2040–2069) ont été quantifiés par des compteurs de dépassement des contraintes. Pour la réalisation la plus sèche, quatre fois plus de violations de contraintes de niveaux minimums devraient être observés, alors que les problèmes d'inondation devraient diminuer. À l'autre bout du spectre, la réalisation la plus humide indique peu de différence au niveau des indicateurs de violation des contraintes.

Des stratégies d'adaptation réalistes au plan de gestion permettant de compenser l'effet des changements climatiques et de reproduire les violations de contraintes qui existent sur ce bassin versant pour la période de référence (1961–1990) ont été proposées. En étudiant les mesures d'adaptation nécessaire pour faire face aux réalisations A2 des trois MCG, qui comptent entre autre les deux extrêmes du groupe de réalisations étudiés, il est apparu évident que la variabilité importante dans les réalisations climatiques ne permet par ailleurs pas de définir une solution d'adaptation unique applicable à l'ensemble des réalisations.

L'application de cette méthodologie et le développement de modèles de gestion pour différents bassins possédant des ouvrages de gestion pourraient faire partie des étapes futures de la présente étude. À l'automne 2002, le gouvernement du Québec s'est donné une politique de l'eau. Un de ses engagements était de « mettre en place la gestion intégrée par bassin versant, afin de réformer la gouvernance de l'eau » (Gouvernement du Québec 2002). Afin de mieux connaître les impacts sur un bassin comme celui de la rivière Saint-François, il serait aussi intéressant d'inclure dans une prochaine étude la partie aval du bassin, jusqu'à l'embouchure de la rivière Saint-François, sur le fleuve Saint-Laurent. En effet, les impacts des changements climatiques se feront sentir sur la totalité du bassin, et les modifications de la gestion en tête de bassin se feront ressentir sur toute la partie aval.

Il faut aussi noter qu'une des étapes cruciales lors de l'élaboration d'un projet en changements climatiques est la mise à l'échelle des données brutes des MCG. La méthode des deltas est simple et souvent utilisée, mais fortement critiquable (Wilby et al. 2004; Prudhomme et al. 2003). En effet, la fréquence et l'intensité des événements extrêmes (sécheresses, orages, canicules, etc.) ne sont pas bien représentées et pourtant sont très importantes pour obtenir l'évaluation des impacts des changements climatiques sur l'hydraulique des cours d'eau. Les techniques de régression linéaire et non-linéaire, de générateur de climat, statistiques et de modèles régionaux de climat (Wilby et Wigley 1997) ont été développées pour la mise à l'échelle des données des MCG. L'utilisation du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC) pourrait aussi être considérée (Frigon et al. 2002) pour améliorer les stratégies de mise à l'échelle.

Dans tous les cas de figures, la définition d'une méthodologie et d'un ensemble d'outils pouvant être réutilisés lorsque les connaissances sur les changements climatiques se préciseront est une contribution scientifique d'intérêt.

Remerciements

Nos remerciements à M^{me} Diane Chaumont, MM. George Desrochers, René Roy, Michel Slivitsky et Luc Vescovi du Consortium Ouranos; M^{mes} Danielle Caron et Stephanie Gottlieb, MM. André Carpentier, Pierre Lacombe et Charles Poirier du Centre d'expertise hydrique du Québec; M^{me} Monique Plamondon et M. Bruno Robert du ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs; MM. Jean-Pierre Fortin et Jean-Pierre Villeneuve de l'Institut national de la recherche scientifique.

Bibliographie

- Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., Usart-Sanchez, I., et Lavabre, J. 2001. Impact of imperfect rainfall knowledge on the efficiency and the parameters of watershed models. *Journal of Hydrology*, **250**(1-4) : 206–223.
- Bilodeau, A., et Picard, F. 2004a. Sommaire du plan de gestion de gestion des eaux retenues : Barrage Jules-Allard X0003925, Rapport du Centre d'expertise hydrique du Québec, Québec.
- Bilodeau, A., et Picard, F. 2004b. Sommaire du plan de gestion de gestion des eaux retenues : Barrage Aylmer X0002572, Rapport du Centre d'expertise hydrique du Québec, Québec.
- Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). 2001. Plan d'action 2001–2002. Bibliothèque nationale du Québec, Québec.

- Chaumont, D., et Chartier, I. 2005. Développement de scénarios hydrologiques à des fins de modélisation de la dynamique sédimentaire des tributaires du Saint-Laurent dans un contexte de changements climatiques. Ouranos, Rapport technique, Montréal.
- Christensen, N.S., Wood, A.W., Lettenmaier, D.P., et Palmer, R.N. 2004. Effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado River basin. *Climatic Change*, **62** : 337–363.
- Dooty, W., Lam, D., Bowen, G., Resler, O., et Leon, L. 2005. Modelling changes in stream water quality due to climate change in a southern Ontario watershed. *Canadian Water Resources Journal*, **30**(3) : 211–226.
- Environnement Canada. 1997. Étude pan-canadienne : Impacts et adaptation au climat. Chapitre québécois. Tome V. Octobre 1997. Ottawa, Ont.
- Fortin, J.P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J., et Villeneuve, J.-P. 2001a. A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. Part 1 : Description of the model. *Journal of Hydrologic Engineering, ASCE*, **6**(2) : 91–99.
- Frigon, A., Caya, D., Slivitzky, M., et Tremblay, D. 2002. Investigation of the hydrologic cycle simulated by the Canadian Regional Climate Model over Québec/Labrador territory. *Dans Advances in global change research. Vol. 10. Climatic change: Implications for the hydrological cycle and for water management. Sous la direction de M. Beniston. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.* p. 31–55.
- Gouvernement du Québec. 2002. Politique nationale de l'eau. Bibliothèque nationale du Québec, Québec.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). 2000. Scénarios d'émissions. Résumé à l'intention des décideurs. Rapport spécial du Groupe de travail III du GIEC, Québec.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). 2001a. Bilan 2001 des changements climatiques : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au Troisième Rapport d'évaluation du GIEC 2001 : Résumé technique, Québec.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). 2001b. Bilan 2001 des changements climatiques : Conséquences, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au Troisième Rapport d'évaluation du GIEC 2001 : Résumé technique, Québec.
- IPCC-TGCI. 1999. Guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment. Version 1. *Sous la direction de T.R. Carter, M. Hulme et M. Lal. Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Scenarios for Climate Impact Assessment (IPCC-TGCI), Genève, Suisse.*
- Morisson, J., Quick, M.C., et Foreman, M.G.G. 2002. Climate change in the Fraser River watershed : flow and temperature projections. *Journal of Hydrology*, **263**(1-4) : 230–244.
- New, M., et Hulme, M. 2000. Representing uncertainty in climate change scenarios : a Monte Carlo approach. *Integrated Assessment*, **1**(3) : 203–213.
- Ouranos. 2004. S'adapter aux changements climatiques. Ouranos, Montréal, Québec.
- Payne, J.T., Wood, A.W., Hamlet, A.F., Palmer, R.N., et Lettenmaier, D.P. 2004. Mitigating the effects of climate change on the water resources of the Columbia River basin. *Climatic Change*, **62** : 233–256.
- Prudhomme, C., Jakob, D., et Svensson, C. 2003. Uncertainty and climate change impact on the flood regime of small UK catchments. *Journal of Hydrology*, **277**(1-2) : 1–23.
- Pugin, S., Cyr, J.F., Turcotte, R., et Fortin, L.G. 2005. Impact des changements climatiques — Développements méthodologiques pour un bassin versant témoin. Rapport, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, Québec.
- Singh, V.P. 1995. Computer models of watershed hydrology. Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, Colo.
- Singh, V.P., et Frevert, D.K. 2002. Mathematical models of small watershed hydrology and applications. Water Resources Publications, LLC, Highlands Ranch, Colo.
- Turcotte, R., Lacombe, P., Dimnik, C., et Villeneuve, J.-P. 2004a. Prédiction hydrologique distribuée pour la gestion des barrages publics du Québec. *Canadian Journal of Civil Engineering*, **31**(2) : 308–320.
- Turcotte, R., Lafleur, J., Picard, F., Lacombe, P., Latraverse, M., et Tremblay, D. 2004b. La mise en place de systèmes de prévision hydrologique et d'aide à la gestion des barrages publics du Québec comme mesure d'adaptation face aux conditions hydrologiques extrêmes. Actes du 57^e congrès annuel de l'Association canadienne des ressources hydriques, Montréal, 16 au 18 Juin 2004. L'Association canadienne des ressources hydriques, Montréal.
- Wilby, R.L., et Wigley, T.M.L. 1997. Downscaling general circulation model output: a review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography*, **21** : 530–548.
- Wilby, R.L., Charles, S.P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., et Mearns, L.O. 2004. Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods [en ligne]. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) data distribution center, Technical guidelines and other supporting material. Disponible à www.ipcc-data.org/guidelines/dgm_no2_v1_09_2004.pdf [cité le 15 août 2007].