

UNIVERSITE DE SHERBROOKE

Analyse et adaptation au contexte des
changements climatiques des outils d'aide à la
gestion du système hydrique du bassin versant de
la rivière des Outaouais : mise en œuvre sur le
sous bassin de la rivière du Lièvre

Rapport Final

Robert Leconte, ing., Ph.D., Mélanie Trudel, Ph.D.
Stéphane Krau, ing. jr., Ph.D., Uriel Francisco Huaranga Alvarez, B.Ing.
Pascal Côté, ing., PhD.

1^{er} Octobre 2012

Table des matières

1	Introduction.....	1
2	Contexte et objectifs de l'étude.....	2
2.1	Contexte de l'étude.....	2
2.2	Objectifs de l'étude.....	6
3	Revue de la littérature.....	7
3.1	Les outils commerciaux et approches mathématiques actuellement utilisées.....	7
3.1.1	Les modèles de simulation.....	7
3.1.2	Les modèles d'optimisation.....	8
3.2	L'état de l'art des méthodes d'optimisation explorées pour la gestion des systèmes hydriques.....	11
4	Méthodologie.....	14
4.1	Aperçu de la problématique.....	14
4.2	Modèle d'optimisation.....	15
4.3	Modélisation des apports naturels.....	16
4.4	Bilan de l'archipel de Montréal.....	20
4.5	Simulation de la gestion du bassin de la rivière des Outaouais.....	22
4.6	Assemblage des modèles dans l'outil de gestion.....	25
4.7	Simulations en climat actuel et en climat futur.....	27
5	Résultats et analyse.....	28
5.1	Les apports aux réservoirs.....	28
5.2	Variations annuelles des niveaux dans les réservoirs.....	30
5.3	Niveaux et débits soutirés aux réservoirs.....	37
5.4	Contrainte de débit à la rivière des Mille-Îles.....	45
5.5	Volume retenu dans le système de la rivière du Lièvre.....	48
5.6	Stratégies d'adaptation.....	50
5.6.1	Simulation avec 50% et 100% de l'écart.....	50
5.6.2	Modification des contraintes de niveau du réservoir Poisson Blanc.....	53
6	Conclusion et recommandations.....	56
6.1	Conclusion.....	56
6.2	Recommandations.....	58
7	Références.....	59

Figures

Figure 1. Localisation du bassin versant de la rivière des Outaouais.....	3
Figure 2. Le bassin versant de la rivière des Outaouais et ses principaux réservoirs	3
Figure 3. Le bassin versant de la rivière du Lièvre et son emplacement dans la rivière des Outaouais	5
Figure 4. Schéma de la méthodologie employée pour un pas de temps de simulation	14
Figure 5. Schéma de l'arbre de scénarios dans l'outil d'aide à la gestion.....	16
Figure 6. Emplacement des stations hydrométriques dans la région de l'archipel Montréal	17
Figure 7. Emplacement des stations hydrométriques en amont de la rivière du Lièvre	18
Figure 8. Exemple d'ensemble des débits simulés pour le réservoir Kiamika	18
Figure 9. Modèle Hydrotel_Outouais	19
Figure 10. Modèle Hydrotel_Lièvre.....	20
Figure 11. Relation entre les débits à a) Ste-Anne-de-Bellevue et b) Vaudreuil en fonction du niveau du lac des Deux Montagnes.	21
Figure 12. Simulations avec le modèle Archipel et Archipel Nord pour a) la rivière Mille-Îles et b) la rivière Des Prairies.....	22
Figure 13. Comparaison des débits simulés avec Hydrotel (non régulé) et observés sur la rivière des Outaouais en amont de la rivière du Lièvre	23
Figure 14. Résultats du réseau de neurones, intrant : débits simulés	24
Figure 15. Résultats du réseau de neurones, intrants : débits simulés et degrés jours.....	24
Figure 16. Résultats du réseau de neurones, intrant : débits simulés, degrés jours, EEN simulés, somme des précipitations	25
Figure 17. Organigramme du simulateur de la rivière du Lièvre.....	26
Figure 18. Apports journaliers moyens, maximum et minimum au réservoir Kiamika durant la période de référence (1961-2000) et futurs (2041-2070) (5 membres).....	28
Figure 19. Apports journaliers moyens, maximum et minimum au réservoir Mitchinamecus durant la période de référence (1961-2000) et futurs (2041-2070) (5 membres).....	29
Figure 20. Apports journaliers moyens, maximum et minimum au réservoir Poisson Blanc durant la période de référence (1961-2000) et futurs (2041-2070) (5 membres).....	29
Figure 21. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au réservoir Kiamika en climat actuel (1990-1999)	31
Figure 22. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au réservoir Kiamika en climat futur (2059-2068)	32
Figure 23. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au réservoir Mitchinamecus en climat actuel (1990-1999)	32
Figure 24. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au réservoir Mitchinamecus en climat futur (2059-2068)	33
Figure 25. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au réservoir Poisson Blanc en climat actuel (1990-1999)	33
Figure 26. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au réservoir Poisson Blanc en climat futur (2059-2068)	34
Figure 27. Scénario hydrologique de l'année 2063 (trait gras) et prévisions hydrologiques d'ensemble (traits colorés) au jour 60 (1er mars).	35

Figure 28. Scénario hydrologique de l’année 2063 (trait gras) et prévisions hydrologiques d’ensemble (traits colorés) au jour 70 (11 mars).....	35
Figure 29. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au lac des Deux Montagnes en climat actuel (1990-1999)	36
Figure 30. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au lac des Deux Montagnes en climat futur (2059-2068)	36
Figure 31. Niveaux au réservoir Kiamika en climat actuel de 1996 à 1998.....	38
Figure 32. Soutirages au réservoir Kiamika en climat actuel de 1996 à 1998.....	38
Figure 33. Niveaux au réservoir Kiamika en climat futur de 2060 à 2062	39
Figure 34. Soutirages au réservoir Kiamika en climat futur de 2060 à 2062	39
Figure 35. Niveaux au réservoir Mitchinamecus en climat actuel de 1996 à 1998.....	40
Figure 36 Soutirages au réservoir Mitchinamecus en climat actuel de 1996 à 1998.....	40
Figure 37. Niveaux au réservoir Mitchinamecus en climat futur de 2060 à 2062	41
Figure 38. Soutirages au réservoir Mitchinamecus en climat futur de 2060 à 2062	41
Figure 39. Niveaux au réservoir Poisson Blanc en climat actuel de 1996 à 1998	43
Figure 40. Soutirages au réservoir Poisson Blanc en climat actuel de 1996 à 1998	43
Figure 41. Niveaux au réservoir Poisson Blanc en climat futur de 2060 à 2062	44
Figure 42. Soutirages au réservoir Poisson Blanc en climat futur de 2060 à 2062	44
Figure 43. Hydrogramme de la rivière des Mille-Îles avec et sans contrainte sur le débit.	46
Figure 44. Exemple de soutirages calculés par l’optimisateur avant et après correction pour le contrôle des crues à l’archipel de Montréal	49
Figure 45. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au réservoir Poisson Blanc en climat actuel (1990-1999), 50% de l’écart retenu.....	51
Figure 46. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au réservoir Poisson Blanc en climat futur (2059-2068), 50% de l’écart retenu	51
Figure 47. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au réservoir Poisson Blanc en climat actuel (1990-1999), 100% de l’écart retenu.....	52
Figure 48. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au réservoir Poisson Blanc en climat futur (2059-2068), 100% de l’écart retenu	52
Figure 49. Niveau moyen au réservoir Poisson Blanc avec modifications des contraintes de niveau en climat actuel.....	54
Figure 50. Niveau moyen au réservoir Poisson Blanc avec modifications des contraintes de niveau en climat futur.....	54

Tableaux

Tableau 1. Principaux réservoirs du bassin de la rivière des Outaouais (CPRRO, 1984).....	4
Tableau 2. Observations de débits et niveaux utilisées	17
Tableau 3. Coefficients de Nash – Calage et validation du modèle Hydrotel_Lièvre	19
Tableau 4. Coefficients de Nash des simulations Archipel et Archipel Nord	21
Tableau 5. Contrainte de débits de la rivière des Mille-Îles. Jours et volumes de dépassement.	47
Tableau 6. Volumes d’eau retenu dans le système de la rivière du Lièvre.....	49
Tableau 7. Contrainte de débits de la rivière des Mille-Îles. Jours et volumes de dépassement. 30%, 50% et 100% de l’écart.....	55
Tableau 8. Volume d’eau retenu dans le système hydrique de la rivière du Lièvre, 30%, 50% et 100% de l’écart.....	55

1 Introduction

Le système hydrique de la rivière des Outaouais, dont le bassin versant couvre une superficie de 146 334 km², comporte 30 réservoirs majeurs et 43 centrales hydroélectriques. Treize réservoirs ont une capacité supérieure à 200 hm³ (1 hm³ = 10⁶ m³). Une gestion délicate de ce système est requise pour limiter les inondations à l'intérieur, mais aussi dans l'archipel de Montréal, tout en tenant compte des différents usages quelquefois conflictuels. En effet, c'est environ 60 % de la superficie du bassin versant, principalement située dans la partie aval, qui ne possède aucune infrastructure significative de régularisation des débits. D'ailleurs, de fortes inondations se sont produites au fil des années dans plusieurs endroits du bassin, soulevant la nécessité d'améliorer les outils d'aide à la gestion des barrages du système hydrique, l'avenue qui consiste à agrandir la capacité actuelle de stockage n'étant pas envisageable en raison de contraintes socio-économiques et environnementales. Avec l'augmentation appréhendée de la fréquence d'inondations consécutive aux changements climatiques (CC), il est plus que jamais souhaitable de se doter d'outils de gestion opérationnels les plus performants possibles et adaptés à cette problématique. La complexité du système de l'Outaouais encourage d'abord de développer et tester des outils sur le sous bassin de la rivière du Lièvre, qui possède, à une échelle 'pilote', les caractéristiques que l'on retrouve sur celui des Outaouais.

Le présent projet de recherche a pour objectifs principaux de développer un outil de gestion qui servira à la prise de décision pour l'exploitation intégrée du système hydrique de la rivière du Lièvre, adapté à la problématique des CC, ainsi que d'utiliser l'outil pour investiguer des stratégies d'adaptation face aux CC. Le contrôle des inondations dans le bassin versant de la Lièvre et dans l'archipel de Montréal constitue la principale problématique visée par l'outil de gestion, quoique l'outil puisse aussi être utilisé pour le contrôle des étiages.

Les principales sections du rapport sont les suivantes: dans la section 1, une mise en contexte de la problématique de la gestion du système hydrique de la rivière des Outaouais et du sous-système de la rivière du Lièvre est présentée, accompagné par un énoncé des objectifs de la recherche proposée. Un compte-rendu de la revue bibliographique des principaux outils et approches de gestion des systèmes hydriques suivra dans la section 2. La section 3 sera consacrée à la présentation de la méthodologie et de l'outil de gestion développé dans le cadre de cette recherche. La présentation et l'analyse des résultats se retrouvent dans la section 4. Une conclusion et des recommandations complètent ce rapport.

2 Contexte et objectifs de l'étude

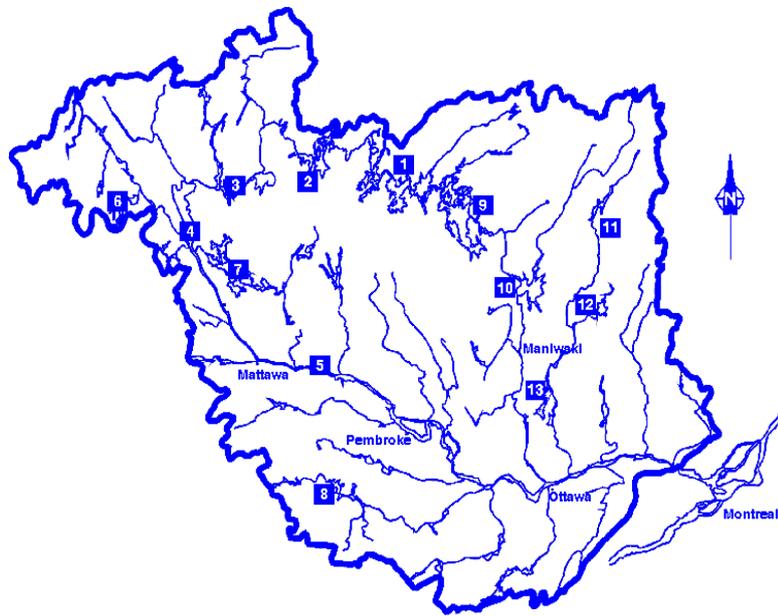
2.1 Contexte de l'étude

La capacité de stockage des réservoirs du système hydrique de la rivière des Outaouais, qui sert principalement à la production d'énergie hydroélectrique, est considérable et se chiffre à plus de 14 milliards de m³. Cette capacité contribue également à réduire les inondations et à soutenir les étiages. Malgré toute cette capacité d'emménagement, le bassin de la rivière des Outaouais génère des apports moyens printaniers de l'ordre de 31 milliards de m³ d'où un surplus de 17 milliards de m³ devant transiter dans le système sans causer d'inondation. De plus, la superficie du bassin versant tributaire de ces réservoirs ne dépasse pas 40% de la superficie totale de ce dernier, laissant ainsi plus de la moitié du territoire, localisée dans la partie aval du bassin versant, sans aucune infrastructure significative de régularisation du débit. De fortes inondations peuvent et se sont d'ailleurs effectivement produites au fil des années en plusieurs endroits du bassin, soulevant la nécessité d'améliorer les outils d'aide à la gestion des barrages du système hydrique, l'accroissement des capacités de stockage n'étant plus une avenue de solution considérée depuis de nombreuses années, en raison de contraintes socio-économiques et environnementales. La rivière des Outaouais étant le principal affluent du fleuve St-Laurent, la régularisation de son débit a également des conséquences sur le risque d'inondation dans l'archipel de Montréal, notamment aux abords des Rivières des Prairies et des Mille-Îles, en particulier si des conditions météorologiques, hydrologiques et d'emménagement particulières sont réunies pour limiter la marge de manœuvre de régularisation. La disposition d'outils de gestion opérationnels les plus performants possibles est donc plus que jamais souhaitable, dans un contexte où la fréquence et la sévérité d'événements météorologiques extrêmes seront appelées à augmenter avec les CC. Les figures 1 et 2 montrent le bassin versant de la rivière des Outaouais. Les réservoirs dont la capacité dépasse 200 hm³ sont présentés au tableau 1.

La portion de la gestion intégrée des réservoirs du bassin de la rivière des Outaouais qui est du ressort de la Commission de planification et de régularisation de la rivière des Outaouais (CPRRO) est celle qui vise comme objectif de fournir une protection contre les inondations le long de la rivière, de ses tributaires et aussi dans la région de Montréal, tout en tenant compte des différents usages – en particulier la production hydro-électrique – qui sont parfois conflictuels. Cette gestion est un défi majeur de par la complexité du système hydrique concerné. Des rencontres avec des représentants de la CPRRO et aussi du Comité de régularisation de la rivière des Outaouais (CRRO), organisme qui relève de la CPRRO et qui prend les décisions opérationnelles requises dans le but de réduire les inondations sur tout le bassin lorsqu'une crue est imminente, ont clairement fait ressortir cette complexité. Faisant suite à ces entretiens, il a été recommandé de se concentrer plutôt sur un sous bassin versant – le bassin versant de la rivière du Lièvre – qui possède à une échelle 'pilote' les caractéristiques que l'on retrouve sur le bassin versant de la rivière des Outaouais.



Figure 1. Localisation du bassin versant de la rivière des Outaouais
 (tiré de http://ottawariverkeeper.ca/river/watershed_map/)



Le bassin de la rivière des Outaouais

Figure 2. Le bassin versant de la rivière des Outaouais et ses principaux réservoirs
 (tiré de CPRRO, 1984)

Tableau 1. Principaux réservoirs du bassin de la rivière des Outaouais (CPRRO, 1984)

Rivière	Réservoir	Capacité (hm ³)
Outaouais	Dozois (1)*	1863
	Rapide VII (2)	371
	Quinze (3)	1308
	Témiscamingue (4)	1217
	Des Joachims (5)	229
Montréal	Lady Evelyn (6)	308
Kipawa	Kipawa (7)	673
Madawaska	Bark Lake (8)	374
Gatineau	Cabonga (9)	1565
	Baskatong (10)	2649
Lièvre	Mitchinamecus (11)	533**
	Kiamika (12)	435**
	Poisson Blanc(13)	910**

* : voir la figure 2 pour l'emplacement des réservoirs

** : selon les données du répertoire des barrages du CEHQ

En effet, le bassin de la Lièvre, dont la superficie est de 9542 km², subit régulièrement des inondations sur son territoire (ex : Ferme-Neuve, Chute-Saint-Philippe). La présence de trois réservoirs de forte contenance dans ce bassin versant régularise en partie l'écoulement et réduit les risques d'inondations. En période de crues, la gestion de l'eau de ces réservoirs accorde une priorité au contrôle des inondations, puis à la production hydroélectrique, tout en respectant si possible des contraintes associées à la navigabilité, à la villégiature et à la protection de la faune. Les contraintes de gestion sur le niveau et les soutirages des réservoirs sont présentées en annexe à ce rapport. Les déclarations de soutirage doivent donc tenir compte des besoins de plusieurs usagers de la ressource en eau, dont le Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), propriétaire des ouvrages de régularisation, et Énergie renouvelable Brookfield, producteur d'hydroélectricité sur le bassin. Puisqu'ils font partie du réseau de régularisation des eaux de la rivière des Outaouais, ces réservoirs ont aussi un impact bénéfique sur la prévention des inondations qui se fait sentir jusqu'à l'archipel de Montréal, de par leur influence sur les débits des rivières des Mille-Îles et des Prairies. La figure 3 montre le bassin versant de la rivière du Lièvre, son emplacement dans le bassin de la rivière des Outaouais, ainsi que l'emplacement de ses trois réservoirs.

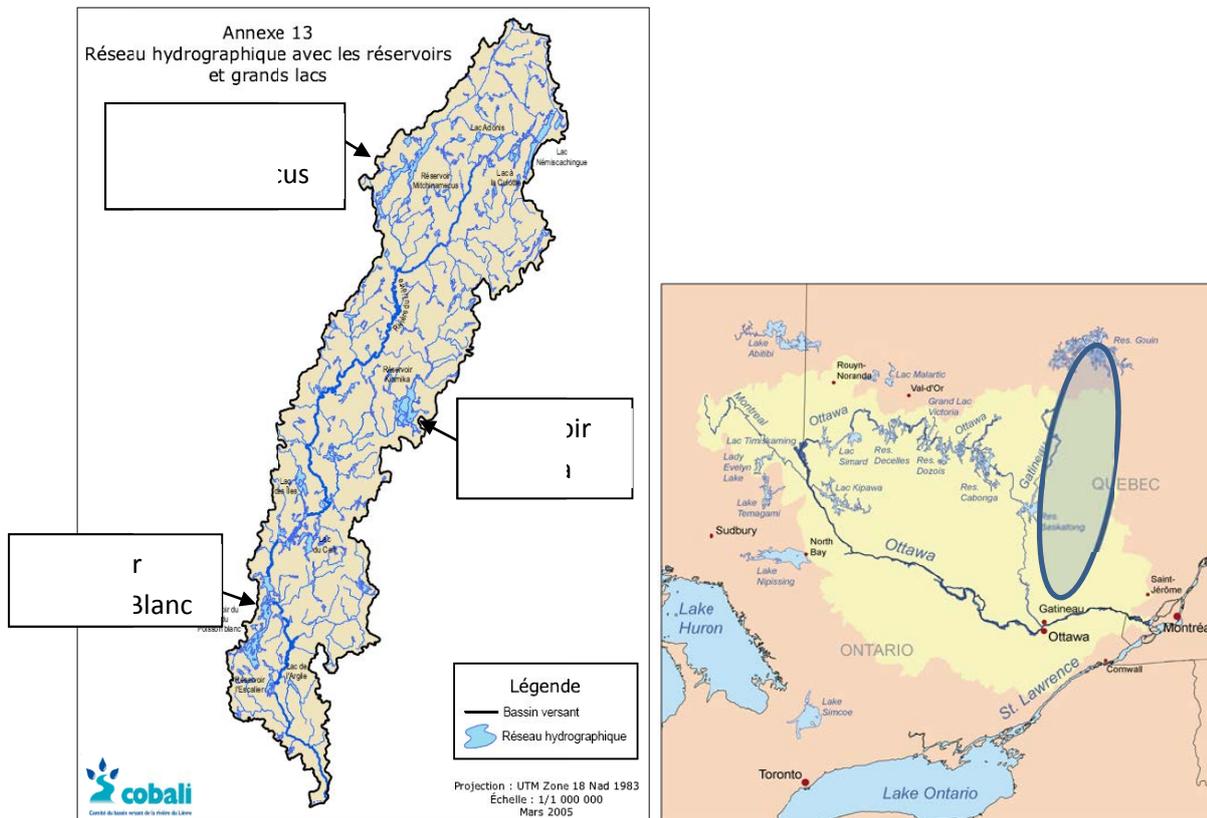


Figure 3. Le bassin versant de la rivière du Lièvre et son emplacement dans la rivière des Outaouais

(source : adapté de <http://www.cobali.org/> et <http://ottawariverkeeper.ca>)

La relative simplicité du système hydrique du bassin versant de la rivière du Lièvre aura permis d'atteindre les objectifs du présent projet, tels que présentés plus loin. Plus important encore, l'outil de gestion développé dans le cadre de cette étude constitue une assise solide pour un déploiement éventuel sur tout le bassin de la rivière des Outaouais.

Il existe des outils d'aide à la gestion intégrée des barrages. Par exemple, la CPRRO dispose d'un modèle d'optimisation pour l'exploitation intégrée des réservoirs de la rivière des Outaouais, le modèle MORRO (Rassam, 1987). MORRO utilise la programmation linéaire pour l'établissement de règles de décision pour la gestion des crues. Cependant, les usagers de MORRO notent que le modèle n'offre aucune flexibilité pour l'inclusion de contraintes de gestion locales des barrages. Il en résulte que les déclarations de soutirage produites par MORRO peuvent présenter des résultats incohérents qui ne peuvent pas être corrigés vu l'impossibilité d'ajuster les contraintes locales de gestion. Ceci devient particulièrement préoccupant pour le contexte d'études en CC, où les régimes hydrologiques seront perturbés et où des conditions hydriques extrêmes sont davantage susceptibles de se produire. Une revue exhaustive des outils et approches de gestion de systèmes a été produite dans le cadre de cette étude. Nous présentons plus loin un condensé de cette revue.

Bien que des outils d'aide à la gestion sont présentement employés pour le bassin de la rivière des Outaouais, on peut affirmer que ces derniers ont besoin d'être actualisés pour tenir en compte, notamment mais pas exclusivement, d'un plus grand nombre de

contraintes de gestion des barrages et pour permettre leur utilisation dans le contexte d'études en CC. Il sera en effet nécessaire que les modèles d'optimisation puissent être configurés sans recourir à des cibles prédéterminées pour compléter, par exemple, le remplissage ou la vidange des réservoirs. En effet, la prédétermination de pareilles dates n'est pas compatible avec un climat et un régime hydrologique changeants. En s'orientant sur le bassin de la rivière du Lièvre, la présente demande s'inscrit donc dans une démarche d'ensemble qui a pour objectif de se doter d'outils plus modernes pour la gestion intégrée des barrages de la rivière des Outaouais, dans une perspective d'adaptation face aux CC.

2.2 Objectifs de l'étude

Tout indique que la perspective de CC aura des répercussions sur le régime hydrologique des bassins versants au Québec, au Canada et ailleurs dans le monde. Des modifications aux systèmes hydriques existants, qui pourraient être d'ordre structurel ou non structurel, sont à prévoir afin de bien s'adapter aux changements appréhendés. L'évaluation de mesures possibles va nécessiter de posséder des outils de gestion adaptés et opérationnels.

L'activité proposée comporte deux objectifs majeurs :

- 1- Pourvoir les gestionnaires de la ressource hydrique d'outils qui serviront de guides à la prise de décision, adaptés à la problématique des CC, dans le but de faciliter l'exploitation intégrée des réservoirs du système hydrique de la rivière du Lièvre, affluent de la rivière des Outaouais;
- 2- Utiliser les outils résultant du premier objectif pour investiguer des stratégies d'adaptation au changement climatique sur le bassin de la rivière du Lièvre.

Un outil d'aide à la gestion du système hydrique de la rivière du Lièvre a été développé dans le cadre de ce projet. Tel qu'il le sera présenté plus loin, l'outil considère l'ensemble des contraintes de gestion des barrages au niveau local et permet que les dates auxquelles sont associés les niveaux cibles puissent être modifiées. Aussi, puisque la gestion des réservoirs sur le bassin de la rivière du Lièvre (et donc de la rivière des Outaouais) engendre des effets significatifs dans la région de l'archipel de Montréal, la prise en compte de cette contrainte a été incluse dans le modèle de gestion pour établir les stratégies de gestion optimales.

L'analyse de stratégies d'adaptation au changement climatique aura rempli deux rôles importants : premièrement, cette analyse a permis de tester la robustesse et la souplesse de l'outil de gestion dans un contexte quasi-opérationnel; deuxièmement elle a permis de saisir dans quelle mesure le système hydrique actuel est vulnérable aux CC (par exemple, est-ce que le système hydrique permet, dans sa configuration et gestion actuelle, un bon contrôle des inondations dans un régime hydrologique perturbé) et si cette vulnérabilité peut être réduite à des niveaux considérés acceptables par une adaptation des règles de gestion de ses réservoirs.

3 Revue de la littérature

Les objectifs de cette section sont, d'une part, de dresser le portrait des outils commerciaux et des approches mathématiques que les exploitants de systèmes hydriques utilisent actuellement pour gérer la problématique liée à leurs systèmes hydriques, d'autre part, de faire une revue bibliographique des méthodes d'optimisation qui sont vouées à enrichir les outils de gestion futurs.

3.1 Les outils commerciaux et approches mathématiques actuellement utilisées

Il y a deux classes d'outils d'aide à la décision qui sont utilisés dans la gestion des systèmes hydriques. Les modèles de simulation et les modèles d'optimisation.

3.1.1 Les modèles de simulation

Ils sont encore très utilisés par les opérateurs des systèmes hydriques. Ils ont l'avantage d'être rapides d'exécution et de pouvoir intégrer avec précision toutes les caractéristiques d'un système hydrique. À partir de règles de décisions qu'on leur donne, les modèles simulent la gestion du système hydrique à partir de plusieurs réalisations des aléas qui gouvernent la gestion (les apports, la demande, les bris de d'équipements). Les gestionnaires de systèmes hydriques choisissent en pratique un ensemble de scénarios (apports, demande) représentatif de la dispersion des aléas et les simulent. Ils refont en général l'exercice plusieurs fois en ajoutant des contraintes hydrauliques et en modifiant les règles de décision afin que les gestions simulées donnent des résultats en deçà d'un certain niveau de risque.

Parmi les outils de simulation commerciaux utilisés dans la gestion des systèmes hydriques on retrouve : AQUATOOL (Andreu et al., 1996), STELLA (HPS inc, 2001), HEC-ResSim (Klipsch et Hurst, 2007), MODSIM (Labadie, 2008), OASIS (HydroLogics Inc., 2009), RIBASIM (Delft Hydraulics, 2006), RiverWare (Zagona et al., 2001) et WEAP (SEI, 2005). On peut trouver facilement sur internet de la documentation concernant ces produits. Plusieurs de ces outils sont conçus pour simuler des systèmes comportant plusieurs réservoirs.

Les simulateurs sont en général déterministes lorsqu'il s'agit de déterminer des soutirages aux réservoirs. On suppose qu'il n'y a pas d'éléments fortuits (comme des bris d'équipements) qui surviennent durant le processus de simulation. En revanche, lorsque l'on désire mesurer la fiabilité d'un parc de production en puissance, des simulateurs stochastiques sont utilisés pour générer des bris d'équipements.

Dans la pratique, les opérateurs de système hydrique ont souvent leur propre outil de simulation « fait maison » lorsque la taille du système hydrique reste modeste. Ils procèdent

à des études de type « what if » en simulant des règles de décision sur des scénarios d'évènements possibles (scénarios d'apports, scénarios de demande ou scénarios de bris d'équipement). Les modèles hydrologiques peuvent aussi être utilisés comme des modèles de simulation lorsque des règles de gestion concernant les soutirages aux réservoirs peuvent être entrées dans le modèle et que l'aléa que l'on veut considérer est celui relié à la climatologie. C'est le cas, par exemple, du modèle hydrologique Watflood (Kouwen, 1988). Chez Hydro-Québec Production, bon nombre d'outils de simulation sont utilisés pour gérer des systèmes hydriques au fil de l'eau sur un pas de temps journalier. Les opérateurs ajustent sur ces systèmes des stratégies de gestion élaborées à partir des résultats d'un modèle d'optimisation ayant une vue globale du parc de production.

Dans certains cas un modèle de simulation peut être couplé avec un modèle d'optimisation, par exemple lorsque l'écoulement rivière devient un élément qu'il faut modéliser avec précision. Les équations de Saint Venant étant fortement non linéaires, leur introduction dans les contraintes d'un modèle d'optimisation rendent la résolution de celui-ci très difficile, voire impossible. Avec un tel couplage, le modèle d'optimisation calcule des décisions seulement à partir des entrées et des sorties du modèle de simulation. Le modèle d'optimisation envoie itérativement des commandes de soutirages au modèle de simulation à partir des résultats de celui-ci. La performance de ces méthodes est bonne lorsque la taille du problème (le nombre de variables) reste relativement petite. NOMAD est une méthode de ce type qui a été développée au GERAD. Shourian et al. (2008) ont jumelé MODSIM à un optimisateur heuristique pour allouer les ressources en eau temporellement et géographiquement sous des conditions de demandes en eau conflictuelles.

L'outil de simulation a ses limites lorsque l'opérateur d'un système hydrique fait face à des situations de grande incertitude comme c'est le cas durant les crues du printemps au Québec. Lorsque le domaine des soutirages possibles est grand et celui des événements d'apports complexe, il devient difficile à l'opérateur de compiler toutes ces informations et prendre une décision optimale. Il faut alors se tourner vers des modèles d'optimisation capables de traiter la complexité de ces informations, de modéliser avec suffisamment de précision le processus réel et donner une solution la plus proche possible de l'optimalité. Les modèles d'optimisation ne peuvent souvent pas modéliser tous les détails d'un système hydrique et peuvent prendre beaucoup de temps de calcul. La performance d'un modèle d'optimisation se mesure par le compromis temps de calcul versus la qualité de sa solution. L'opérateur a besoin de connaître les limites du modèle d'optimisation afin que celui-ci amène une plus-value à la gestion comparativement à un modèle de simulation.

3.1.2 Les modèles d'optimisation

Il y a deux classes de modèles d'optimisation : Les modèles d'optimisations déterministes et les modèles d'optimisations stochastiques. Les modèles d'optimisation déterministes ne prennent pas en compte les incertitudes dans le calcul de leurs décisions. Ils travaillent en avenir certain. Dans un contexte opérationnel, les opérateurs de systèmes hydriques en

prennent compte en contraignant le modèle lui évitant ainsi de produire des solutions trop optimistes. Par exemple, ils introduisent des bornes sur la vidange des réservoirs pour être certain que, quel que soit le scénario d'apports que le modèle va traiter, les critères de sécurité sur les réservoirs demeurent. Les modèles d'optimisation stochastiques appliqués à la gestion des réservoirs prennent en compte la distribution des apports selon des degrés de précisions plus ou moins grands. À la différence des modèles d'optimisation déterministes, les modèles d'optimisation stochastiques génèrent des gestions plus conservatrices en établissant une marge de sécurité sur les niveaux des réservoirs pour se prémunir des cas extrêmes.

La grande majorité des outils commerciaux sont des modèles d'optimisation déterministes qui reposent sur la technologie de la programmation linéaire. Les éléments de modélisation non-linéaires du système hydrique y sont représentés souvent par des fonctions linéaires par morceaux. Un solveur commercial (ex. CPLEX, MINOS) est alors appelé pour résoudre itérativement le problème d'optimisation linéaire. Le temps de calcul des solveurs linéaires (et non linéaires) commerciaux ne cesse de s'améliorer et permet de traiter des systèmes hydriques de grande taille en prenant en compte beaucoup de détails de leurs caractéristiques physiques.

MODSIM est un logiciel commercial développé par l'université du Colorado. À la base, c'est un outil de simulation à l'intérieur duquel on peut entrer des règles de décisions et les simuler au travers d'un jeu de scénarios d'apports. Il est aussi doté d'un modèle d'optimisation qui s'écrit comme un problème de flots à coûts minimum qui calcule l'allocation optimale de l'eau entre les différents sites d'un système hydrique. Ce logiciel est utilisé sur des systèmes hydriques complexes dont la problématique est le partage de l'eau entre les différents intervenants sur la rivière. Il n'y a pas d'éléments non linéaires modélisés dans MODSIM. Cet outil est doté d'un autre modèle d'optimisation qui s'appelle CSUDP. Il s'agit d'un code de programmation dynamique qui génère des règles de gestion qui pourront être implantées dans MODSIM. La programmation dynamique permet de calculer des règles de gestion optimales, c'est-à-dire des soutirages au réservoir en fonction de l'état du système. L'état est généralement décrit par les niveaux actuels des réservoirs. La programmation dynamique n'est pas encore appliquée dans l'opérationnel à des systèmes hydriques ayant plus de 2-3 réservoirs à capacité variable, à cause de son temps de calcul qui augmente exponentiellement avec le nombre de variables d'état. Hydro-Québec Production utilise la programmation dynamique stochastique (PDS) pour des systèmes hydriques ayant au plus 2 réservoirs à capacité variable.

Riverware est un autre outil commercial qui fonctionne en mode simulation et en mode optimisation. À la différence de MODSIM, Riverware peut optimiser des problèmes non linéaires. Il s'applique bien à la gestion d'un système hydrique pourvu de centrales hydroélectriques. Il est conçu pour des systèmes hydriques de tailles importantes (comme la plupart des logiciels commerciaux). Le modèle d'optimisation est un problème d'optimisation multicritère non linéaire à variables mixtes. Les éléments de modélisation

non linéaires sont approximés dans le modèle par des fonctions linéaires par morceaux. Le problème d'optimisation permet de prendre en compte plusieurs objectifs, parfois contradictoires, comme c'est souvent le cas dans la gestion d'un système hydrique : maximiser la production en minimisant les violations des contraintes hydrauliques. Il fonctionne avec un pas de temps pouvant aller d'une heure à une année. Les variables sont soit entières et binaires. Les variables binaires permettent par exemple de modéliser les arrêts démarrages des groupes turbines-alternateurs. En revanche, l'obtention de la solution optimale d'un problème mathématique non linéaire à variables mixtes est difficile. Riverware utilise alors une heuristique couplée avec un solveur linéaire (CPLEX) pour trouver une solution sous-optimale rapidement.

Chez Hydro-Québec, on retrouve un produit non commercial (PPD) bâti aussi sur le principe de la programmation linéaire par morceaux, pour la gestion moyen terme du parc de production.

La difficulté chez le gestionnaire d'un système hydrique utilisant un modèle déterministe est de prendre une décision étant donnée celles calculées par un modèle déterministe à partir de plusieurs scénarios d'apports. Il n'existe pas de règle simple permettant de déduire la décision optimale des solutions déterministes. Il y a un besoin pressant dans l'industrie d'intégrer les sources d'incertitudes dans les modèles de gestion. La technologie 'idéale' est la PDS car elle permet de générer des règles de décision optimales en fonction de l'état du système et en prenant en compte la distribution des apports (ou tout autre élément aléatoire). Ces règles sont par exemple des soutirages aux réservoirs à chaque pas de temps de l'horizon d'optimisation, à partir des niveaux des réservoirs au début des pas de temps et des apports passés. Cette méthode est très intéressante car elle permet de faire des calculs de risques rigoureux sans avoir de biais déterministe. Tout comme pour la programmation dynamique, le temps de calcul pour la PDS augmente exponentiellement avec le nombre de variables d'état (ex : niveau des réservoirs) inclus dans le modèle, ce qui explique pourquoi cette méthode n'est que peu employée de manière opérationnelle. On note Hydro-Québec Production qui utilise cette approche pour des systèmes hydriques ayant au plus 2 réservoirs à capacité variable. BC Hydro l'utilise aussi pour gérer un de son système hydrique dont la réserve en eau se trouve essentiellement dans le réservoir de tête. Électricité de France utilise aussi la PDS pour gérer son parc de production. Il procède par agrégations et désagrégations en fonctionnant uniquement avec une seule variable d'état.

SDDP (Stochastic Dual Dynamic Programming) est un logiciel commercial pourvu d'un modèle d'optimisation stochastique du même nom que le logiciel. À la différence de la PDS, la technique mathématique ne fournit pas des règles de gestion mais la décision optimale à prendre maintenant compte tenu des aléas futurs et de la fonction objectif à maximiser. La technique mathématique permet de se libérer de la limite sévère sur le nombre d'états que l'on retrouve dans la PDS. Elle approxime cependant plus grossièrement le processus aléatoire des apports et les contraintes doivent être linéaires pour assurer la convergence

vers l'optimalité. SDDP est utilisé, au Brésil notamment, pour de grands systèmes hydriques. Cette méthode est à l'étude chez Hydro-Québec Production.

SOHO est un outil d'aide à la décision développé par des chercheurs de l'IREQ et de la chaire en optimisation stochastique de la production d'hydroélectricité de l'École polytechnique. SOHO a été conçu pour gérer le système hydrique de la rivière Gatineau sur un pas de temps journalier. La technologie de SOHO se base sur la production d'un arbre de scénarios d'apports inter-reliés par des probabilités de transitions d'un scénario à l'autre. L'arbre des scénarios d'apports dans SOHO modélise l'erreur de la prévision météorologique sur les premiers jours puis la distribution des apports pour les jours suivants. Une version simplifiée d'arbre à deux stades (programmation avec recours), construit directement à partir des scénarios de prévision hydrologique, a donné de très bons résultats. La méthode de résolution est la programmation linéaire successive, les non linéarités étant représentées par des fonctions linéaires par morceaux.

3.2 L'état de l'art des méthodes d'optimisation explorées pour la gestion des systèmes hydriques

On peut regrouper les méthodes d'optimisation stochastiques en deux classes : les méthodes explicites et les méthodes implicites (Labadie, 2004).

Les méthodes explicites sont des techniques d'optimisation stochastiques dont les variables aléatoires sont représentées par des distributions de probabilité ou des ensembles de scénarios. On détermine une règle de gestion en appliquant la méthode d'optimisation une seule fois. Les méthodes implicites utilisent des techniques d'optimisation déterministes. Les variables aléatoires sont représentées par des scénarios et la méthode d'optimisation est appliquée autant de fois qu'il y a des scénarios. Une technique de régression (ou toute autre stratégie) est ensuite appliquée aux solutions déterministes pour obtenir une règle de gestion pouvant être utilisée en temps réel.

La programmation linéaire est la méthode d'optimisation la plus utilisée en recherche opérationnelle puisqu'elle garantit, pour un problème réalisable de taille « raisonnable », de trouver la solution optimale globale. Cette méthode peut aussi être utilisée pour solutionner des problèmes stochastiques. Dans ce cas, on parle plutôt de programmation linéaire avec recours (Brige, 1985). L'utilisation d'un grand nombre de scénarios dans le programme linéaire crée des modèles linéaires de très grande taille. Pour cette raison, certains ont proposé des méthodes plus sophistiquées pour résoudre ces problèmes comme les décompositions de Benders (Jacobs et al., 1995) ou les méthodes de points intérieurs Seifi et Hipel, 2001). Combiné à l'utilisation de prévisions d'ensemble, ce genre d'approche peut être très intéressant puisqu'aucune hypothèse de stationnarité n'est requise. On peut donc envisager utiliser la programmation avec recours pour des études sur les CC.

La méthode explicite de programmation dynamique stochastique (PDS) est la méthode la plus utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation stochastique puisqu'elle garantit,

sous certaines conditions, l'optimalité de la solution (Bertsekas, 2007). En revanche, cette approche devient impossible lorsque le nombre de réservoirs est supérieur à trois. Dans de nombreux travaux concernant des problèmes de gestion, on a souvent essayé de transformer le problème original afin de pouvoir appliquer cette méthode. Par exemple, si la fonction objective est représentée par une fonction quadratique, le problème de dimensionnalité peut être facilement réglé (Murray et Yakowitz, 1979). Par contre, une fonction objectif de forme quadratique ne permet pas toujours de bien représenter la nature des critères d'optimisation imposés par les usagers.

Les techniques d'agrégation et de désagrégation sont des méthodes qui reposent sur le principe suivant: agréger les réservoirs du système afin de déterminer une règle de gestion par la PDS, puis désagréger pour déterminer les règles de décisions en chacun des réservoirs. La difficulté de cette approche est de désagréger car il faut induire des règles de décisions individuelles à partir d'une règle de décision d'un ensemble de réservoirs. Un des premiers travaux d'importance dans ce domaine est celui de Turgeon (1981). Pour un problème de N réservoirs, l'auteur propose de résoudre N problèmes stochastiques à deux variables. Pour chaque problème, la première variable d'état représente le contenu d'un réservoir alors que la deuxième variable correspond au contenu des autres réservoirs du système qui ont été agrégés. Une fois ces problèmes résolus par la PDS, il est possible d'obtenir une règle de gestion de chacun des réservoirs en utilisant une somme pondérée des solutions préalablement obtenues. Des améliorations à cette approche ont été proposées notamment par Turgeon et Charbonneau (1998) et Archibald et al. (1997).

Saad et Turgeon (1992) ont proposé une technique où l'agrégation est basée sur l'analyse en composantes principales (ACP) de solutions déterministes. L'ACP permet d'éliminer les variables d'état non significatives. La programmation dynamique est appliquée au problème transformé et réduit. La désagrégation devient facilement réalisable en appliquant la transformation inverse de l'ACP. Saad et al. (1994) ont amélioré la désagrégation en utilisant un réseau de neurones entraîné à désagréger une politique de gestion en utilisant des solutions du problème déterministe obtenues avec des scénarios d'apport.

La programmation dynamique stochastique doit être adaptée pour qu'elle soit appliquée aux études en CC. La raison est que les apports naturels doivent suivre un processus stochastique stationnaire, ce qui n'est pas le cas en contexte de CC. Néanmoins, Minville et al. (2010) ont démontré que sur une certaine période, l'hypothèse de stationnarité est plausible. En n'utilisant qu'une portion de l'historique des apports, on peut alors actualiser une règle de gestion à chaque année avec la PDS et ainsi produire des études en CC.

La programmation dynamique par scénarios est une approche qui utilise des scénarios d'apports (Kellman et al., 1990). Avec cette approche, les scénarios servent à représenter la variabilité des apports naturels. Dans certains cas, cette méthode donne de meilleurs résultats que la PDS puisque les structures de corrélation sont plus facilement prises en considération lors de l'optimisation (Turgeon, 2006). Faber et Stedinger (2001) ont montré que cette approche peut être utilisée pour opérer un système en temps réel lorsque l'on

dispose de prévisions hydrologiques d'ensemble générées par un modèle hydrologique ajusté à partir des conditions actuelles du bassin versant. Cette méthode est aussi très appréciée pour les études concernant l'impact des CC sur la gestion des réservoirs (Vicuna, 2007) car les scénarios peuvent être non stationnaires. Néanmoins, il est important de noter qu'avec cette méthode le problème de dimensionnalité de la PDS est toujours présent.

L'apprentissage par renforcement est aussi une technique qui permet d'utiliser l'algorithme de la programmation dynamique en utilisant des scénarios d'apports. Cette approche consiste à calculer une politique de gestion en utilisant une approximation de la fonction objective construite à partir de simulations. Lee et Labadie (2007) ont utilisé cette approche avec succès pour un problème de deux réservoirs. Castelletti et al. (2010) ont utilisé une approche similaire dans laquelle un réseau de neurones est utilisé pour modéliser la fonction objective. Bien que cette approche puisse s'adapter facilement au CC, le temps de calcul de ces algorithmes demeure élevé et la mise en œuvre semble relativement compliquée.

La programmation dynamique duale (SDDP) est une méthode développée par Pereira (1989) qui permet de réduire le problème de dimensionnalité de la PDS. Cette méthode consiste à construire une approximation de la solution par des fonctions linéaires par partie. Étant donné qu'un problème à une période est beaucoup plus facile à résoudre, le nombre de réservoirs considérés peut être alors très élevé.

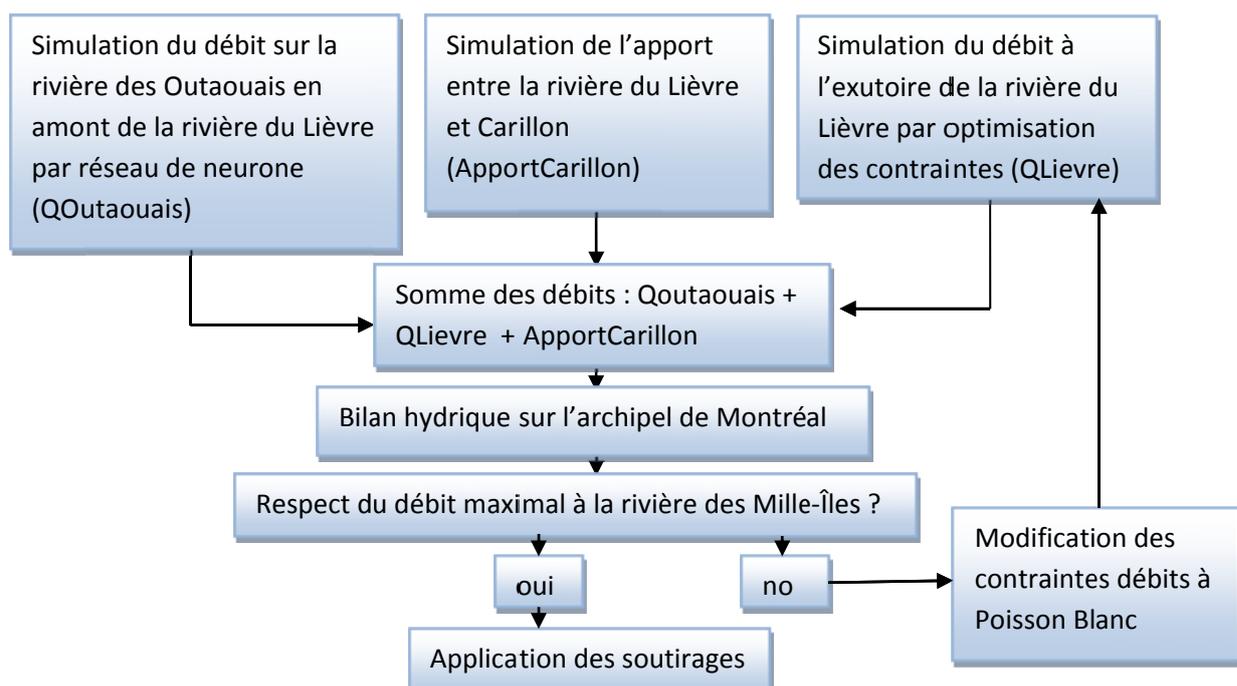
Les méthodes dites implicites sont celles dont la politique de gestion est construite à partir des solutions de problèmes déterministes. Par exemple, Karamouz et Houck (1982) ont utilisé des scénarios d'apports pour construire des problèmes d'optimisation déterministes qui peuvent être solutionnés par des techniques de programmation non linéaire. Ces solutions sont ensuite utilisées pour effectuer des régressions linéaires sur une politique de gestion représentée par des fonctions de transfert linéaires donnant le soutirage d'un réservoir en fonction de son contenu et de l'apport prévu. Chandramouli et Raman (2001) ont utilisé des réseaux de neurones pour représenter la politique de gestion et ont présenté des résultats intéressants obtenus pour un système comprenant trois réservoirs.

Une autre façon de construire une méthode implicite est d'optimiser les paramètres des fonctions représentant la politique de gestion et ce directement à partir des résultats des simulations. Par exemple, Momtahan et Dariane (2007) ont proposé un algorithme génétique (AG) pour optimiser une politique de gestion modélisée par une série de Fourier qui donne le soutirage des réservoirs en fonction du contenu et de l'apport. L'AG optimise globalement les paramètres des séries en se basant sur les résultats des simulations. Cette méthode a l'avantage de prendre en considération, lors de l'ajustement de la politique de gestion, de toutes les données du problème telles que le délai de l'écoulement de l'eau, ce qui est généralement très difficile à prendre en considération. Le désavantage de ce genre d'approche est que chaque évaluation de la fonction objective nécessite la simulation d'une politique de gestion, ce qui demande un temps de calcul important. De plus, la fonction objective devient non dérivable, ce qui restreint le choix de l'algorithme d'optimisation.

4 Méthodologie

4.1 Aperçu de la problématique

L'outil d'aide à la gestion doit pouvoir simuler la gestion des barrages sur le bassin versant de la rivière du Lièvre et d'évaluer l'impact des changements climatiques sur la gestion. Des prévisions hydrologiques d'ensemble forment les apports naturels nécessaires au système de d'aide à la gestion. Ces prévisions, qui couvrent un horizon de 150 jours, sont réalisées par le modèle hydrologique Hydrotel avec comme intrants des chroniques historiques de température et de précipitations journalières. En plus des contraintes de niveaux et de débits des différents réservoirs situés dans le bassin versant, la gestion doit tenir compte d'une contrainte de débit maximum à la rivière des Mille-Îles dans l'archipel de Montréal. Toutefois, l'eau s'écoulant vers l'archipel de Montréal ne provient pas uniquement du bassin versant de la rivière du Lièvre, mais également de l'ensemble du bassin versant de la rivière des Outaouais. Le bassin de la rivière des Outaouais comprend plus de 40 barrages gérés par différent intervenants. Il est donc difficile de connaître avec précision la gestion des différents réservoirs. Cette gestion doit par contre être simulée afin de connaître le débit entrant dans l'archipel de Montréal. Une méthode par réseau de neurones a été choisie pour simuler cette gestion à partir des données des années précédentes. Un modèle d'optimisation par méthode non-linéaire stochastique a été développé pour déterminer la gestion sur le bassin de la rivière du Lièvre. Le bilan hydrique sur l'archipel de Montréal est calculé afin de connaître le débit à la rivière des Mille-Îles. Il est ainsi possible de calculer le débit maximal à la sortie du bassin versant de la rivière du Lièvre permettant de respecter la contrainte de débit à la rivière des Mille-Îles. La figure 4 présente un schéma de la méthodologie employée. Les différents modèles sont maintenant présentés.



4.2 Modèle d'optimisation

La problématique de gestion journalière du système hydrique de la Rivière du Lièvre est un problème d'optimisation stochastique. L'outil d'aide à la décision sert, au début de chaque journée, à décider des soutirages à effectuer aux réservoirs Kiamika, Mitchinamecus et Poisson Blanc durant la journée. Son objectif est de proposer des soutirages pour satisfaire, le mieux possible, aux contraintes d'exploitation à court et moyen terme, en positionnant le mieux possible les niveaux des réservoirs au cours du temps. Pour ce faire, l'outil utilise une prévision des apports sur un horizon de temps donné. Les apports sont supposés connus parfaitement durant la première journée, et représentés par un ensemble de scénarios d'apports disjoints à partir de la seconde journée.

L'exigence d'une gestion journalière, couplée à l'objectif d'étendre éventuellement l'outil d'aide à la décision à l'ensemble du système hydrique de la rivière des Outaouais, nous a amené à choisir l'approche par programmation non linéaire avec recours. Cette approche, bien connue de la recherche opérationnelle, permet de prendre en compte explicitement les scénarios d'apports prévisionnels à l'intérieur du modèle d'optimisation. Elle s'exprime comme un programme mathématique non linéaire à 2 stades. Le premier stade est constitué d'un problème d'optimisation déterministe construit à partir de la moyenne des scénarios d'apports prévisionnels durant le premier stade. Le second stade est constitué des problèmes d'optimisation déterministes correspondant à chacun des scénarios d'apports prévisionnels. Le poids de la fonction objectif du premier stade est 1, celui pour chaque fonction objectif d'un problème déterministe du second stade est $(1/n)$ car les n scénarios d'apports prévisionnels dans le cas de la rivière du Lièvre sont équiprobables. La fonction objectif du second stade est la somme des n fonctions objectifs des problèmes déterministes. La fonction objectif du problème non linéaire à 2 stades est la somme des fonctions objectif du premier et du second stade, pondérées par leurs poids respectifs. Les problèmes d'optimisation du second stade ont en commun leurs conditions initiales, c'est-à-dire les volumes d'eau des 3 réservoirs au début du stade, ceux engendrés par les soutirages au premier stade. Cette propriété lie les 2 stades ensemble. Contrairement à un modèle déterministe du type MORRO, la décision au premier stade ne se fait pas avec une connaissance certaine d'une future, ce qui correspond mieux à la réalité. La résolution du problème mathématique non linéaire à 2 stades permet alors de trouver les valeurs optimales des soutirages du premier et du second stade. La longueur des stades est un paramètre du problème. Dans le cas de la Lièvre, c'est un multiple d'une journée.

La fonction objectif est une somme de fonctions de pénalités dont chacune est associée au respect d'une contrainte hydraulique. Le poids de ces fonctions est proportionnel à l'importance du respect de la contrainte qu'elle représente. Les contraintes hydrauliques considérées ici sont des niveaux cibles des réservoirs ainsi qu'un débit cible en aval du réservoir Poisson Blanc pour la production hydroélectrique d'une centrale appartenant à Énergie Brookfeld. L'ensemble des contraintes du système hydrique de la Lièvre ont été transmises par le CEHQ.

En pratique, la construction du problème mathématique se fait simplement en moyennant les apports des scénarios d'apports du premier stade, voir la figure 5 ci-dessous, afin d'obtenir un arbre à 2 stades.

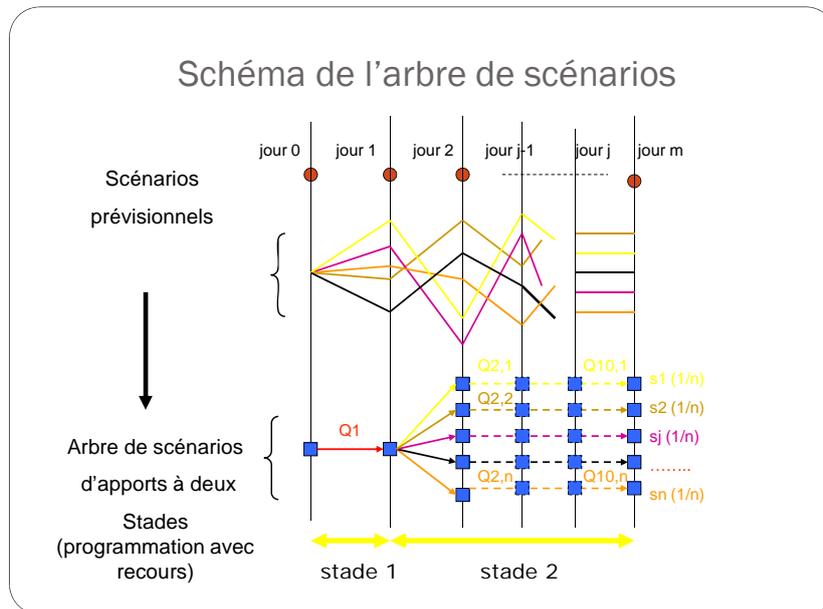


Figure 5. Schéma de l'arbre de scénarios dans l'outil d'aide à la gestion

Une description détaillée des équations du modèle de programmation est présentée dans le guide d'utilisation que l'on retrouve en annexe à ce rapport.

4.3 Modélisation des apports naturels

Le modèle hydrologique Hydrotel (Fortin et al., 2001) a été utilisé pour la modélisation des apports. Un modèle calibré sur le bassin versant de la rivière du Lièvre ainsi que du bassin versant de la rivière des Outaouais nous a été remis par le CEHQ. Les données hydrométriques utilisées proviennent du CEHQ ainsi que de la base de données Hydat d'environnement Canada. Le tableau 2 et les figures 6 et 7 dans les pages suivantes présentent les différentes observations utilisées.

Le modèle Hydrotel a été utilisé pour obtenir des ensembles de prévisions hydrologiques en absence de barrages. Dans un premier temps, les variables d'état du bassin versant (neige, humidité du sol, écoulement, débit) ont été simulées avec Hydrotel à l'aide d'observations météorologiques puisées d'une année donnée pour chaque jour où une prévision d'ensemble est requise. Le choix de l'année est ici arbitraire puisque l'outil n'était pas utilisé en temps réel. Les débits de chaque membre d'ensemble ont ensuite été simulés à partir de l'état actuel simulé du bassin versant, mais en utilisant les conditions météorologiques des années antérieures (autant d'années que de membres de l'ensemble). La figure 8 présente un exemple d'ensemble pour le réservoir Kiamika.

Tableau 2. Observations de débits et niveaux utilisées

	Code CEHQ	Code Hydat	Coordonnées UTM (18N)	Années Disponibles
Niveau du Lac de Deux-Montagnes (N2M)	043116	02OA013	581650 5028441	1919-2010
Niveau du Lac St-Louis (NSTL)	000091	02OA039	592264 5031149	1915-2010
Débit Mille-Îles (QMI)	043201	02OA003	597203 5057369	1913-2009
Débit des Prairies (QDP)	043301	02OA004	589927 5041055	1922-2011
Débit Du Nord (QN)	040110	02LC008	576724 5071776	1930-2011
Débit Châteauguay (QCha)	030905	02OA054	596994 5020386	1970-2011
Débit Lasalle (QLassale)	001003	02OA016	607716 5029975	1955-2009
Débit Carillon (QCarillon)		02LB024	547381 5046453	1962-2008
Débit Beauharnois (QBeauharnois)		02MC010	585590 5016857	1952-2008
Débit des Cèdres (QCedres)		02MC018	572948 5017624	1957-2008
Débit Gatineau (QGatineau)		02LH030	440297 503868	1980-2008
Débit Outaouais-Aylmer (QOutaouais)		02KF005	436905 5023759	1960-2008
Débit Rideau (QRideau)		02LA004	445434 5025568	1933-2008

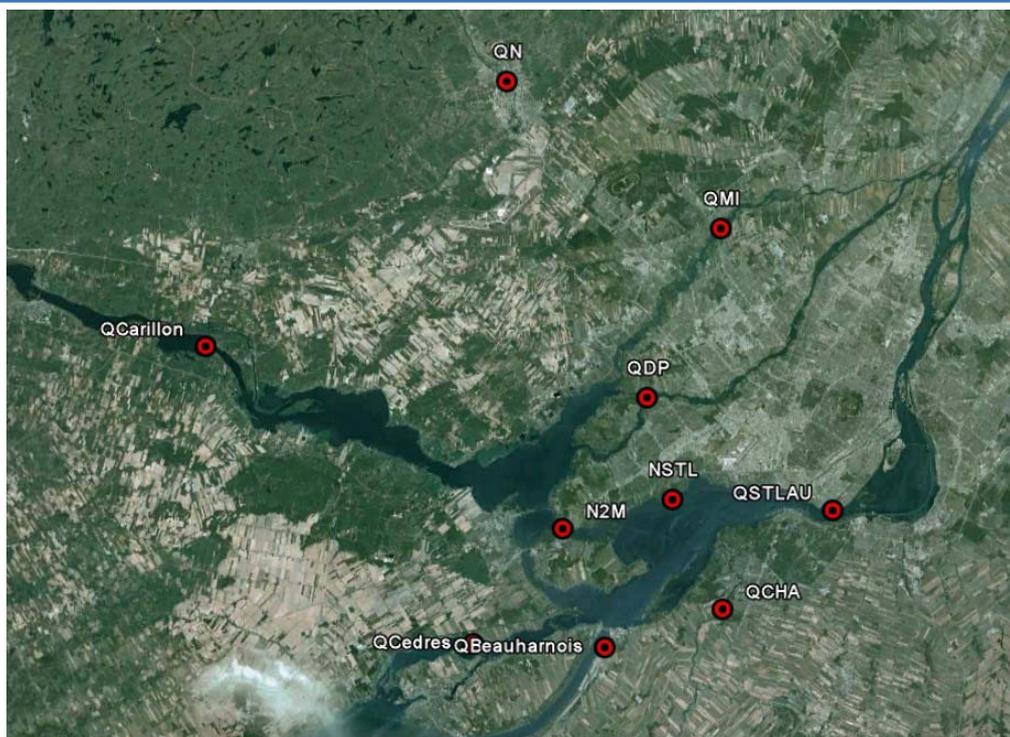


Figure 6. Emplacement des stations hydrométriques dans la région de l'archipel Montréal



Figure 7. Emplacement des stations hydrométriques en amont de la rivière du Lièvre

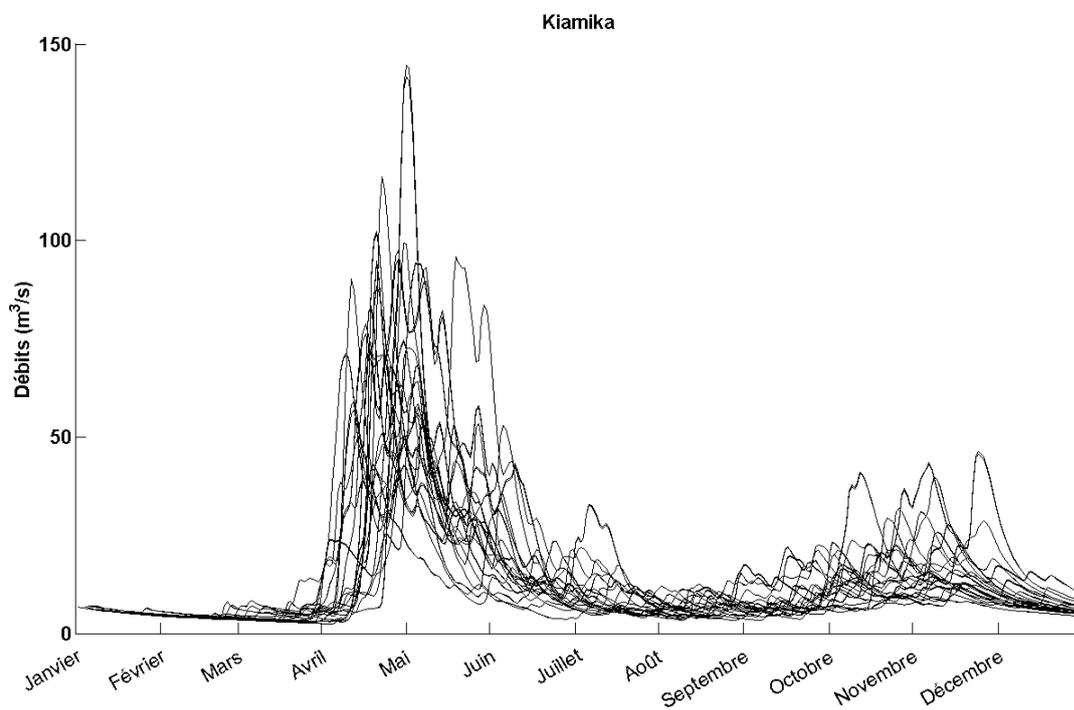


Figure 8. Exemple d'ensemble des débits simulés pour le réservoir Kiamika

Hydrotel Outaouais

Le modèle Hydrotel_Outouais a été fourni par le CEQH. Le calage Local réalisé par le CEQH est utilisé. Le modèle permet de simuler les débits naturels (non régulé) de la rivière des Outaouais en amont de la rivière du Lièvre (figure 9). Il permet aussi de déconnecter des portions du bassin versant afin de simuler les apports entre la rivière des Outaouais en amont de la rivière du Lièvre et l'embouchure (à Carillon).

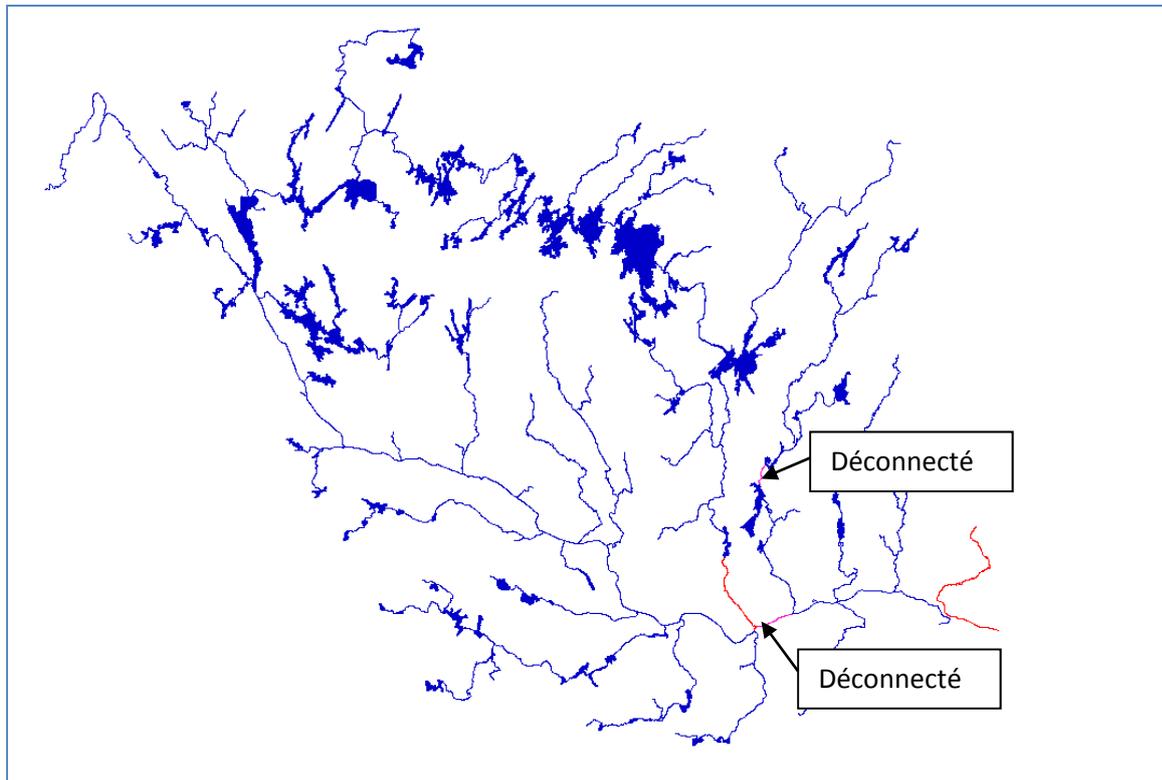


Figure 9. Modèle Hydrotel_Outouais

Hydrotel Lièvre

Le modèle Hydrotel_Lièvre (figure 10) a été fourni par le CEHQ. Un calage a été effectué avec les apports reconstitués afin de simuler les apports latéraux à chacun des réservoirs. Les coefficients de Nash obtenus lors du calage (2001-2005) et de la validation (1995-2001 et 2006-2010) pour les trois réservoirs sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 3. Coefficients de Nash – Calage et validation du modèle Hydrotel_Lièvre

	Calage (2001-2005)	Validation (1995-2001 et 2006-2010)
Kiamika	0.71	0.69
Mitchinamecus	0.73	0.62
Poisson Blanc	0.78	0.73

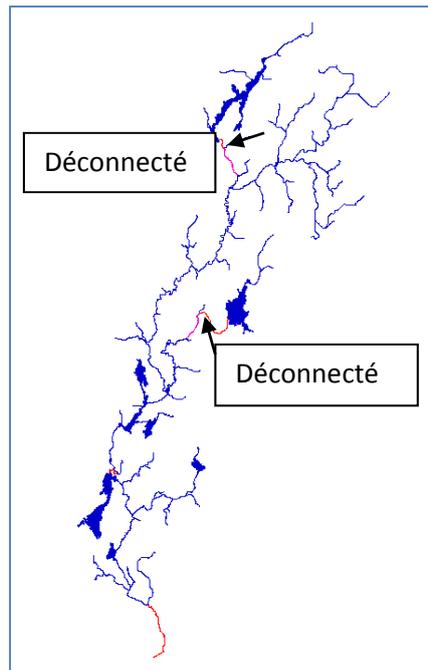


Figure 10. Modèle Hydrotel_Lièvre

4.4 Bilan de l'archipel de Montréal

La modélisation du bilan de l'archipel de Montréal a d'abord été réalisée à l'aide des relations niveau-volume et niveau-débit fournis par le CEHQ. Une simplification du bilan de l'archipel de Montréal est réalisée afin de ne tenir compte que de la partie nord de l'archipel. Cette simplification est faite afin de pouvoir effectuer des simulations en CC. En effet, les apports provenant du fleuve Saint-Laurent en condition de CC sont difficiles à évaluer car ils impliqueraient de modéliser du bassin versant du Fleuve St-Laurent à la hauteur de Beauharnois, ce qui inclurait les Grands Lacs et la gestion de ceux-ci. Le lien entre la partie nord et la partie sud de l'archipel réside dans les relations niveaux-débits à Vaudreuil et Ste-Anne-de-Bellevue qui dépendent à la fois du niveau du lac des Deux-Montagnes (N2M, voir Figure 6), et du niveau du lac Saint-Louis (NSTL, voir Figure 6). Ainsi, pour simuler uniquement la partie nord de l'archipel, de nouvelles relations niveaux-débits à Vaudreuil et à Ste-Anne-de-Bellevue ont été déterminées à partir des niveaux au lac des Deux-Montagnes uniquement. On suppose donc que l'incertitude sur les nouvelles relations niveaux-débits à Vaudreuil et Ste-Anne-de-Bellevue est inférieure à l'incertitude sur les débits en provenance du fleuve Saint-Laurent en condition de CC. Pour déterminer ces relations, les débits ont d'abord été calculés à l'aide des observations passées au lac des Deux-Montagnes ainsi qu'au lac Saint-Louis. Les débits ont ensuite été exprimés en fonction des débits au lac des Deux-Montagnes uniquement, voir la figure 11. Une relation quadratique a ensuite été calculée à Vaudreuil et à Ste-Anne-de-Bellevue voir les équations 1 et 2. Un coefficient de détermination (R^2) de 0.91 a été obtenu pour la relation à Ste-Anne-de Bellevue et de 0.95 pour celle à Vaudreuil.

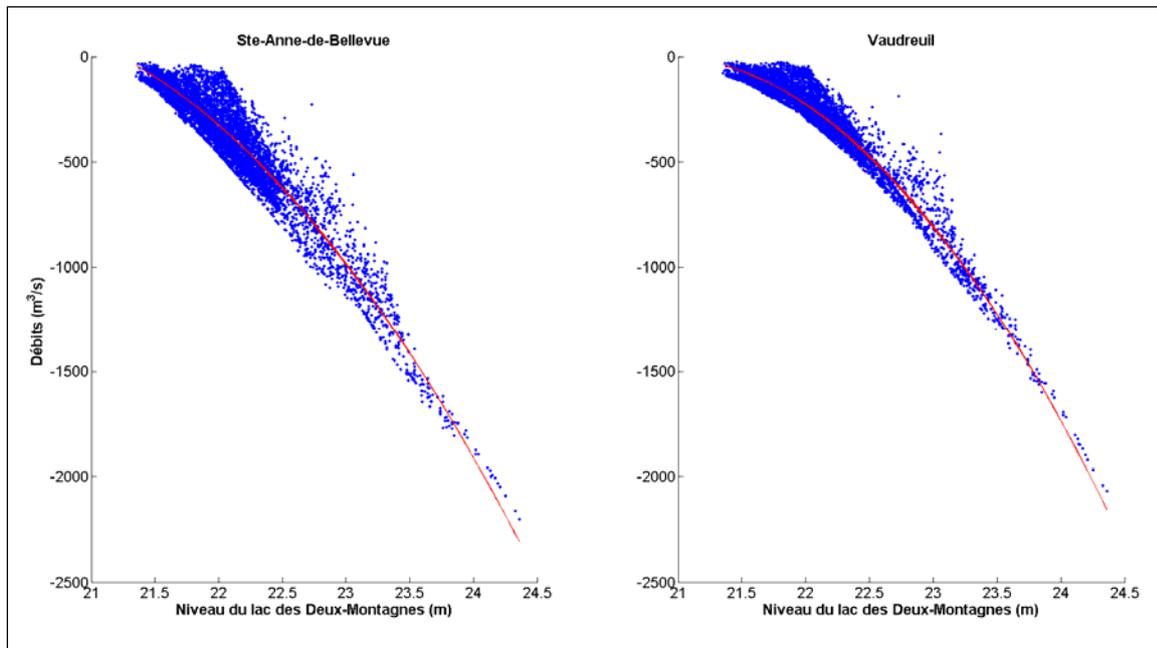


Figure 11. Relation entre les débits à a) Ste-Anne-de-Bellevue et b) Vaudreuil en fonction du niveau du lac des Deux Montagnes.

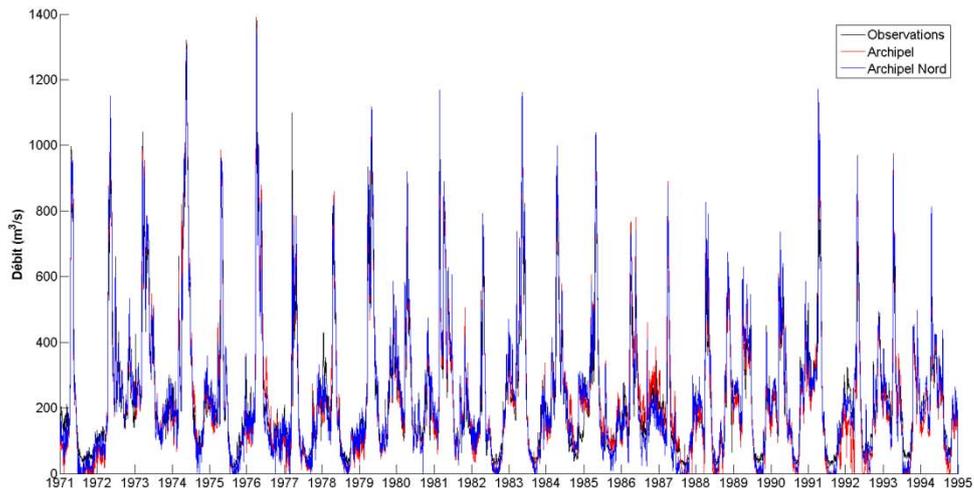
$$Q_{\text{Vaudreuil}} = -76859.181809 + 7367.731887 * N2M - 176.561175 * N2M^2 \quad (1)$$

$$Q_{\text{Ste-Anne}} = -54024.224457 + 5404.047550 * N2M - 134.687787 * N2M^2 \quad (2)$$

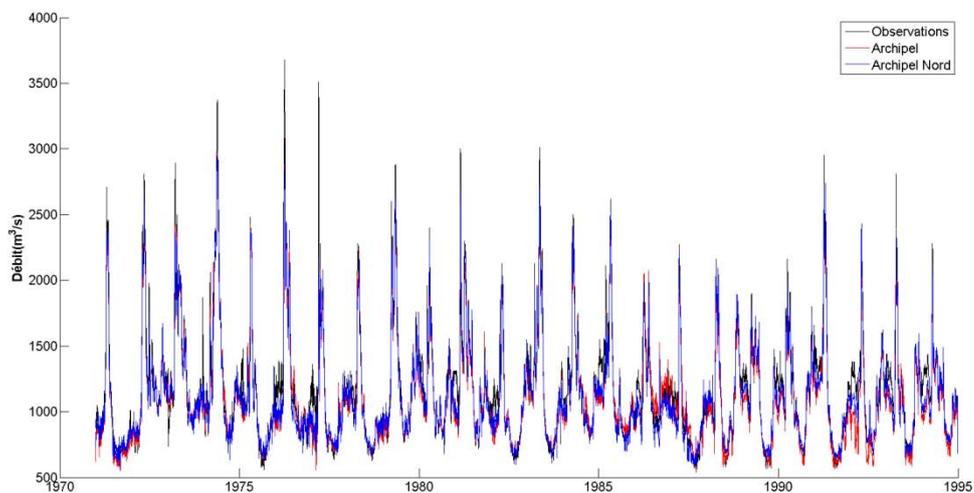
Les débits à la rivière de Mille-Îles et à la rivière des Prairies ont ensuite été simulés pour, et comparés avec, les observations disponibles, soit de 1971 à 1994. La figure 12 compare les résultats des simulations avec le modèle Archipel du CEHQ, et notre modèle simplifié, appelé Archipel Nord. Le tableau 4 montre les coefficients de Nash-Sutcliffe pour les différentes simulations. Les coefficients sont légèrement supérieurs avec le modèle Archipel Nord (aucun test statistique effectué pour évaluer si la différence est significative), ce qui indique que l'incertitude sur les nouvelles relations niveaux-débits à Vaudreuil et Ste-Anne-de-Bellevue serait similaire à l'incertitude sur les débits observés à l'entrée du Lac Saint-Louis.

Tableau 4. Coefficients de Nash des simulations Archipel et Archipel Nord

	Archipel	Archipel Nord
Rivière des Mille-Îles	0.897	0.907
Rivière des Prairies	0.893	0.915



a) Rivière des Mille-Îles



b) Rivières Des Prairies

Figure 12. Simulations avec le modèle Archipel et Archipel Nord pour a) la rivière Mille-Îles et b) la rivière Des Prairies

4.5 Simulation de la gestion du bassin de la rivière des Outaouais

La présence des réservoirs dans le bassin versant de la rivière des Outaouais influence significativement le régime hydrologique du bassin, comme on peut le voir à la figure 13, qui compare les débits naturels simulés en amont de la rivière du Lièvre avec Hydrotel et les observations de débits à ce même emplacement. Les débits simulés/mesurés incluent les apports de la rivière des Outaouais à la hauteur de Aylmer ($Q_{\text{Outaouais}}$, voir Figure 7), auxquels s'ajoutent les débits des rivières Gatineau (Q_{Gatineau}) et Rideau (Q_{Rideau}).

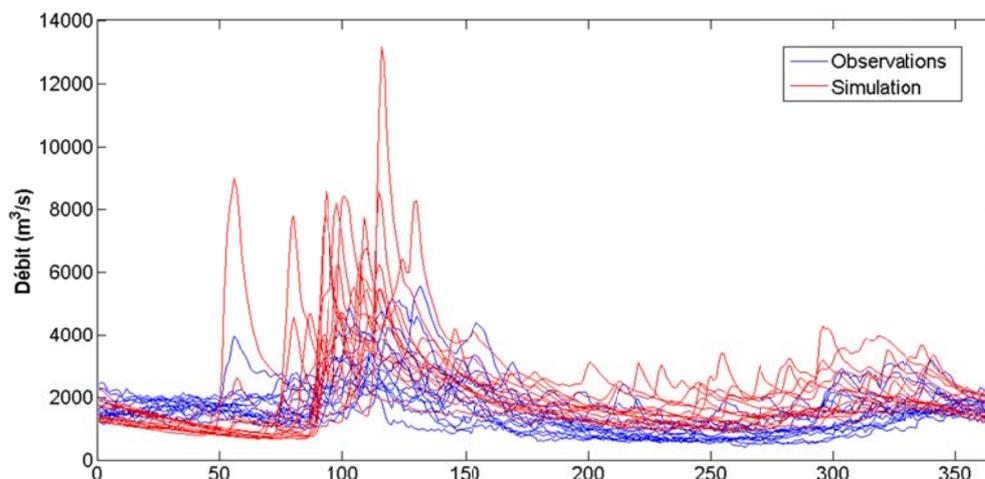


Figure 13. Comparaison des débits simulés avec Hydrotel (non régulé) et observés sur la rivière des Outaouais en amont de la rivière du Lièvre

Globalement, la gestion semble comporter trois périodes : Une période hivernale où les débits observés (régulés) sont supérieurs aux débits simulés (naturels), correspondant à une vidange des réservoirs ; une période de laminage de la crue où les débits observés sont inférieurs aux débits simulés, ce qui correspond à la période de remplissage des réservoirs ; et une période où les débits d'été-automne observés sont généralement inférieurs à ceux simulés, correspondant à une période où on cherche à maintenir une hauteur de chute pour la production hydroélectrique et pour les activités de villégiature.

La présence de nombreux réservoirs contrôlés, par opposition à des réservoirs avec de simples seuils déversant, fait que les relations entre les hydrogrammes naturels et atténués ne peuvent pas se ramener à une opération de laminage (routage) hydrologique. Pour cette raison, une représentation de la gestion du bassin versant de la rivière des Outaouais en amont de la rivière du Lièvre par réseaux de neurones a été adoptée.

Un réseau de neurones est une méthode de type 'boîte noire' qui permet de relier un ou plusieurs intrants avec une sortie. Le réseau de neurones comporte deux étapes, soit l'apprentissage, puis la simulation. La performance du réseau de neurones dépend donc de la qualité de l'apprentissage.

Dans un premier temps, les débits simulés par Hydrotel (non régulé) couvrant la période 1981-2008 (en fonction de la disponibilité des observations de débits, voir tableau 2) ont été utilisés comme intrants, alors que les débits observés en amont de la rivière du Lièvre ont été utilisés comme sorties pour l'apprentissage du réseau de neurones. La figure 14 montre que le réseau de neurones confond les faibles débits de la période hivernale avec ceux du reste de l'année. La période de 1981 à 1994 a été présentée dans le but d'alléger le graphique.

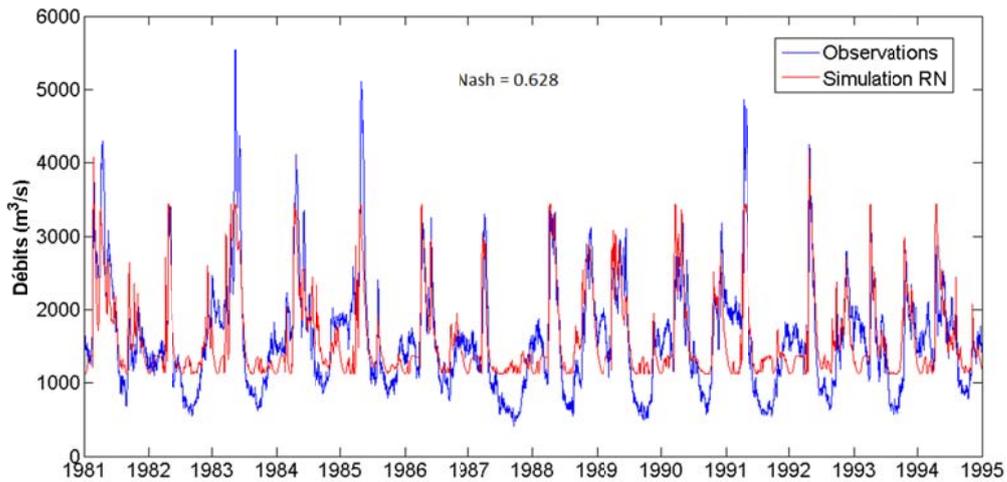


Figure 14. Résultats du réseau de neurones, intrant : débits simulés

Il a donc été nécessaire d'inclure un intrant permettant au réseau de neurones d'identifier la période et donc le type de régime. Les degrés jours des 10 derniers jours (somme des degrés au-dessus de 0°C sur 10 jours) permettent d'identifier la période. La performance du réseau de neurones s'en est trouvée améliorée (figure 15).

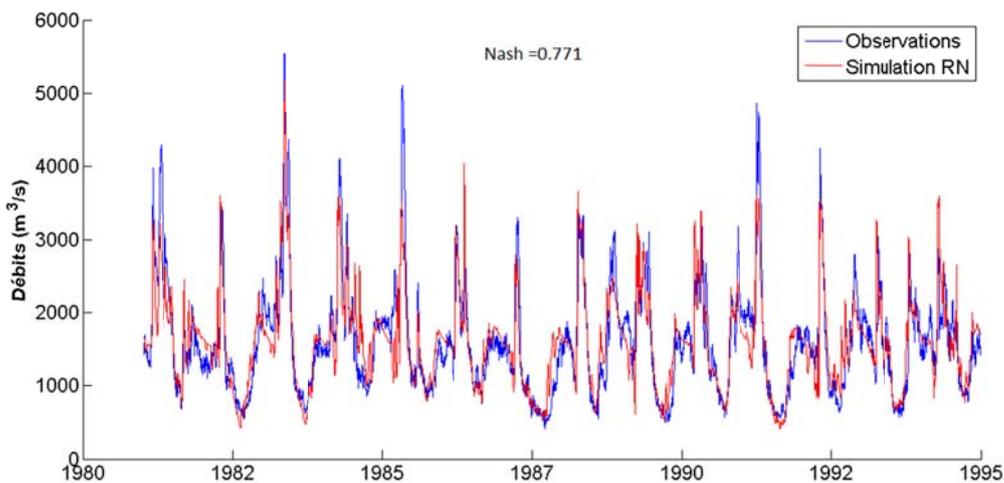


Figure 15. Résultats du réseau de neurones, intrants : débits simulés et degrés jours

Plusieurs intrants ont été testés. Les meilleurs résultats (figure 16) ont été obtenus en utilisant les débits simulés par Hydrotel, l'équivalent en eau (EEN) de la neige simulée par Hydrotel, les degrés jours des 10 derniers jours, et la somme des précipitations des 10 derniers jours.

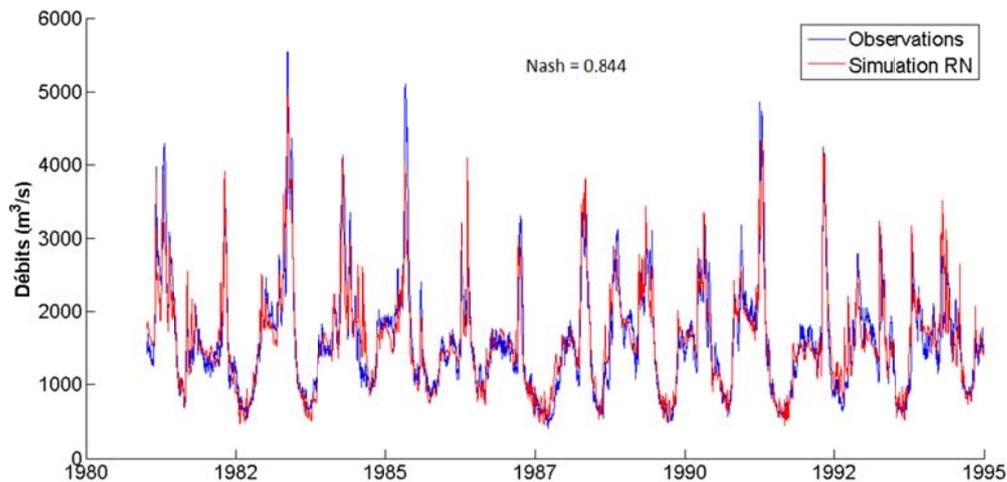


Figure 16. Résultats du réseau de neurones, intrant : débits simulés, degrés jours, EEN simulés, somme des précipitations

Il est important de noter que l'utilisation d'un réseau de neurones pour simuler la gestion du bassin versant de la rivière des Outaouais en amont de la rivière du Lièvre implique l'hypothèse que les règles de gestion, et donc les contraintes ne changent pas. L'étude en changement climatique se fera donc sous cette hypothèse.

Toujours pour tester la performance du réseau de neurones dans un contexte de changements climatiques, quatre apprentissages différents ont été réalisés. Ces apprentissages avaient pour but d'explorer la robustesse du modèle en mode 'extrapolation'. Les apprentissages suivants ont été testés : un apprentissage pendant toute la période disponible (1981-2008), un apprentissage pendant la période froide (1981-1996), un apprentissage pendant la période chaude (1997-2008) et un apprentissage pendant la période froide-chaude (1990-2003). Chacun d'eux a créé un réseau de neurones différent. Les résultats de cette étude sont présentés dans Huaranga et Leconte (2012). Les résultats indiquent des performances comparables pour les 4 réseaux de neurones. Le réseau de neurones avec apprentissage pendant toute la période disponible a donc été conservé pour la présente étude.

4.6 Assemblage des modèles dans l'outil de gestion

Un simulateur servant à reproduire la gestion du système hydrique de la rivière du Lièvre a été construit. Ce simulateur, appelé «Horizon roulant», est un programme de calcul créé dans l'environnement Matlab. Le simulateur relie les différents modèles et sorties de modèles présentés ci-dessus pour ultimement simuler les niveaux d'eau dans les réservoirs de la rivière du Lièvre. Le cœur du simulateur est le modèle de gestion, appelé 'pps'. La figure 17 présente l'organigramme du simulateur, en accord avec le schéma méthodologique de la figure 4.

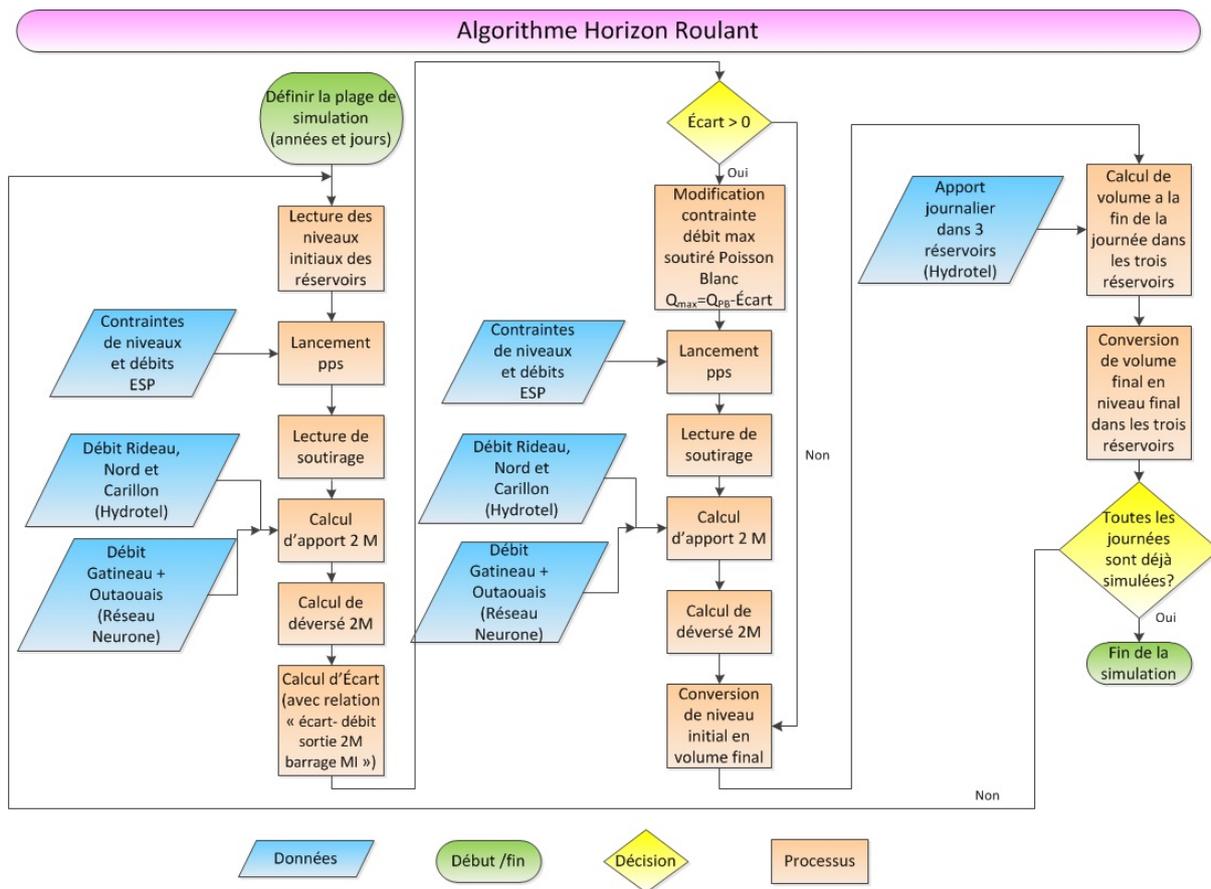


Figure 17. Organigramme du simulateur de la rivière du Lièvre

Les données requises pour faire tourner le simulateur sont les courbes d’emménagement (relation niveau-débit) des réservoirs Poisson Blanc, Kiamika et Mitchinamecus, les courbes de déversement du lac Deux-Montagnes (apport, volume, débit de sortie), la relation « écart vs débit sortie Deux Montagnes avec barrage Mille-Îles », les débits provenant du bassin versant de l’Outaouais et de ses tributaires, ainsi que les apports naturels aux réservoirs et les prévisions d’ensemble. Ces débits et prévisions d’ensemble ont été générés par le modèle Hydrotel et/ou par le réseau de neurones.

Le concept « d’écart » est ici introduit dans le contexte de la gestion du système hydrique de la Lièvre pour le contrôle des inondations dans l’archipel de Montréal. L’« écart » est défini comme étant 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. Le débit de sortie du Lac des Deux Montagnes correspond à la somme des débits des rivières des Mille-Îles, des Prairies et de l’écoulement transitant entre le Lac des Deux Montagnes et le lac St-Louis à la hauteur de Vaudreuil et Ste-Anne de Bellevue. Lorsque le débit est non contrôlé, le débit à l’entrée de la rivière des Mille-Îles est entièrement établi en fonction du niveau d’eau dans le Lac des Deux Montagnes. En condition contrôlée, le débit à l’entrée de la rivière des Mille-Îles est limité à $780 \text{ m}^3/\text{s}$ par un ouvrage de régulation et se trouve donc découplé du niveau du lac. Ce contrôle entraîne le niveau du lac à la hausse, influençant à son tour le débit à l’entrée de la rivière des Prairies et transitant vers le lac Saint-Louis. Une

relation entre le débit à la sortie du Lac des Deux Montagnes et l'écart a été établie. Cette relation permet d'estimer l'écart pour un débit de sortie donné.

Dans l'éventualité où un écart est généré dans une journée, en d'autres termes que le débit à l'entrée de la rivière des Mille-Îles atteint $780 \text{ m}^3/\text{s}$, le débit à soutirer pour cette journée à la sortie du réservoir Poisson Blanc est réduit par un certain pourcentage de l'écart, ce qui revient à conserver de l'eau dans le système hydrique de la Lièvre pour aider à contrôler les inondations dans l'archipel de Montréal. De nouveaux soutirages et niveaux d'eau sont calculés dans les réservoirs de la rivière du Lièvre pour respecter cette contrainte sur les débits. Ces opérations sont présentées dans la figure 17.

4.7 Simulations en climat actuel et en climat futur

Le simulateur «Horizon roulant» a été utilisé en mode 'climat actuel' et en mode 'climat futur'. Dans les deux cas, et pour être en mesure d'apprécier les effets des changements climatiques sur les régimes hydrologiques et la gestion de la rivière du Lièvre, les données météorologiques qui ont servi à construire les prévisions hydrologiques d'ensemble avec le modèle hydrologique Hydrotel ont été générées par modèle climatique, en l'occurrence le modèle régional canadien du climat (Caya et Laprise, 1999), MRCC, Version 4.2. Ces projections, fournies par le CEHQ, sont constituées de 5 membres du MRCC piloté par le modèle de climat global canadien CGCM3 avec le scénario d'émission de gaz à effet de serre SRES A2. Les 5 membres constituent des simulations où les conditions initiales du modèle ont été perturbées afin de représenter la variabilité naturelle du climat.

Une correction de biais sur les températures et précipitations a été effectuée afin d'ajuster les périodes de référence et future modélisées avec les observations de la période de référence. Cette méthode suppose que le biais relatif des modèles climatiques sera le même pour la période future que pour la période de référence.

Pour les températures, la différence entre la moyenne mensuelle des températures observées et la moyenne mensuelle des températures simulées en période de référence a été appliquée aux données journalières en période de référence et future.

Les précipitations ont été ajustées pour la fréquence moyenne mensuelle de précipitations (ratio du nombre de jours au-dessus d'un seuil de précipitation sur le nombre de jours dans le mois) et pour l'intensité moyenne mensuelle de précipitations (précipitation moyenne journalière) avec la méthode Local Intensity (LOCI) de Schmidli et al. (2006).

La période de référence de référence correspond à 1961-2000 et celle du futur à 2041-2070. Les prévisions hydrologiques d'ensemble ont été construites à partir de données climatiques historiques couvrant 15 années en climat actuel et en climat futur. Les expériences avec le simulateur s'étendent quant à elles de 1990 à 1999 en climat actuel et de 2059 à 2068 en climat futur. Les années ayant servi à construire les prévisions d'ensemble ne recourent pas celles ayant été utilisées par le simulateur.

5 Résultats et analyse

Cette section présente les résultats correspondant à la gestion du système hydrique de la rivière du Lièvre sous des conditions de climat actuel et futur. Les apports à chaque réservoir, les niveaux moyens de réservoirs, les niveaux et les débits soutirés pendant trois années représentatives, ainsi que les analyses associées à une contrainte de débit maximale à l'entrée de la rivière des Mille-Îles et quelques stratégies d'adaptation sont présentées. Les périodes analysées couvrent 1990 à 1999 pour la période de référence et 2059 à 2068 pour la période future, soit 10 années pour chaque horizon temporel. Sauf indication contraire, toutes les simulations ont été réalisées en supposant que le système de la Lièvre retient 30% de l'écart (voir la définition d'écart dans la section 4.6).

5.1 Les apports aux réservoirs

Les apports moyens annuels journaliers des cinq membres, en lignes foncées, ainsi que les apports minimums et maximums, en lignes pointillées, des 10 années sont montrés aux figures 18, 19 et 20. Ces figures représentent les apports des réservoirs Kiamika, Mitchinamecus et Poisson Blanc, respectivement. La moyenne des cinq membres a été réalisée parce que les apports de chaque membre sont très semblables. Les apports de la période de référence et de la période future sont mis un au-dessous de l'autre. On note tel que prévu un décalage des pics de crue de la période de référence par rapport à la période future. La période de crue printanière arrivera plus tôt en période future.

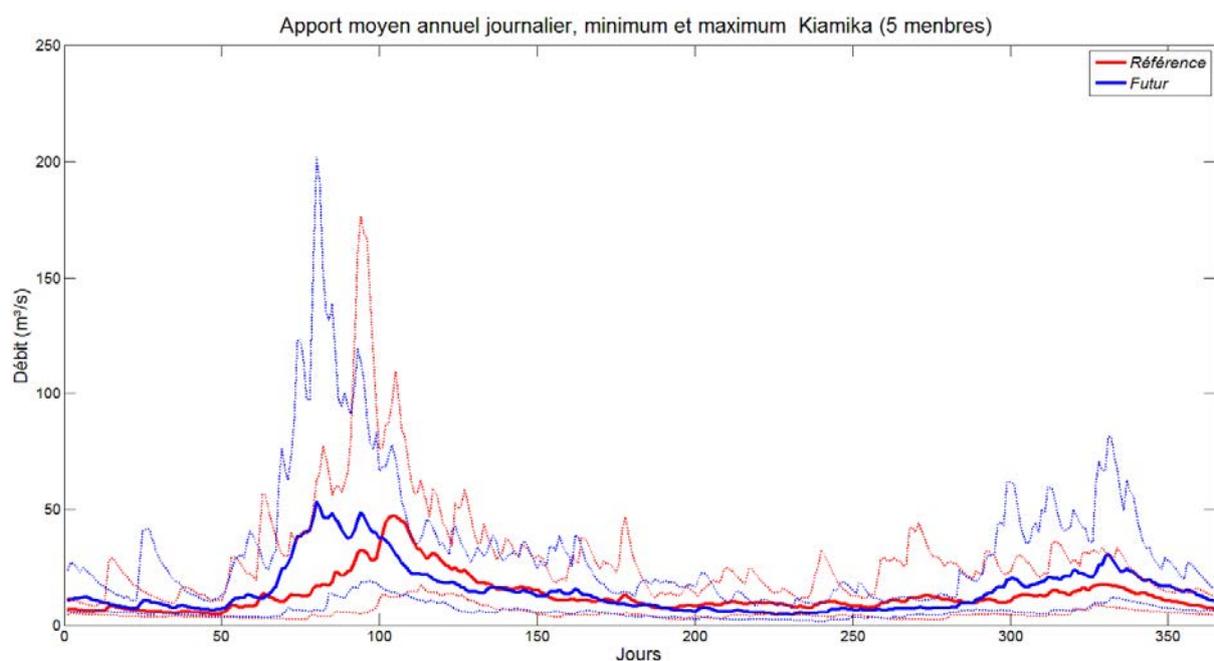


Figure 18. Apports journaliers moyens, maximum et minimum au réservoir Kiamika durant la période de référence (1961-2000) et futurs (2041-2070) (5 membres)

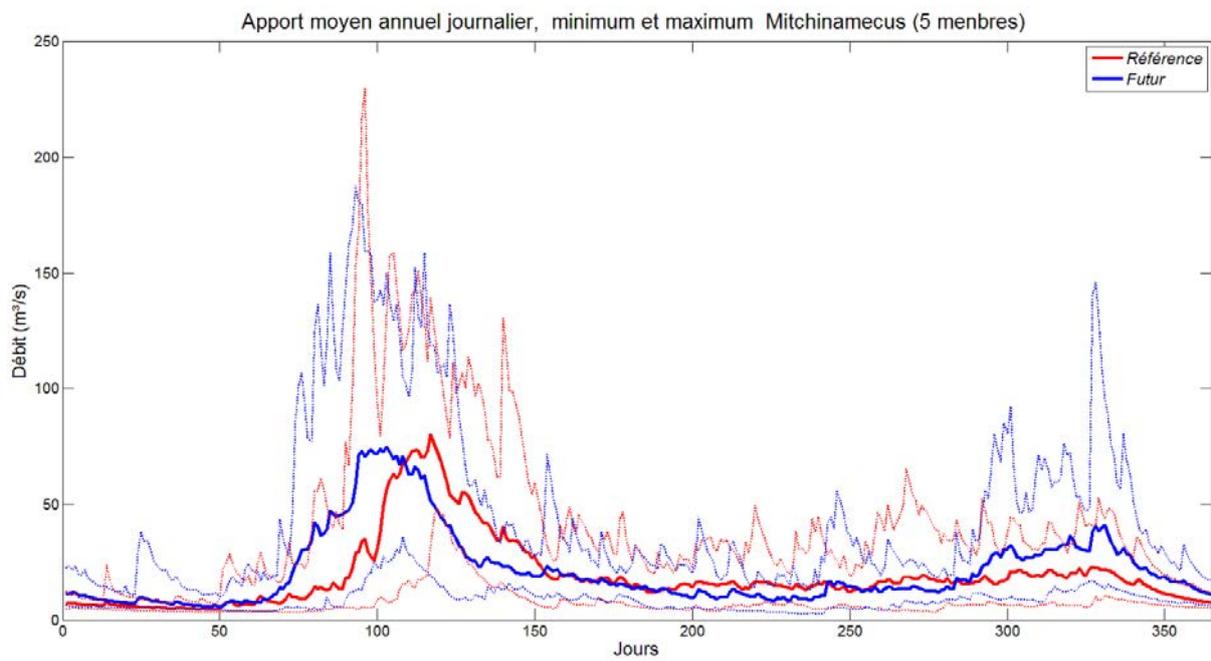


Figure 19. Apports journaliers moyens, maximum et minimum au réservoir Mitchinamecus durant la période de référence (1961-2000) et futurs (2041-2070) (5 membres)

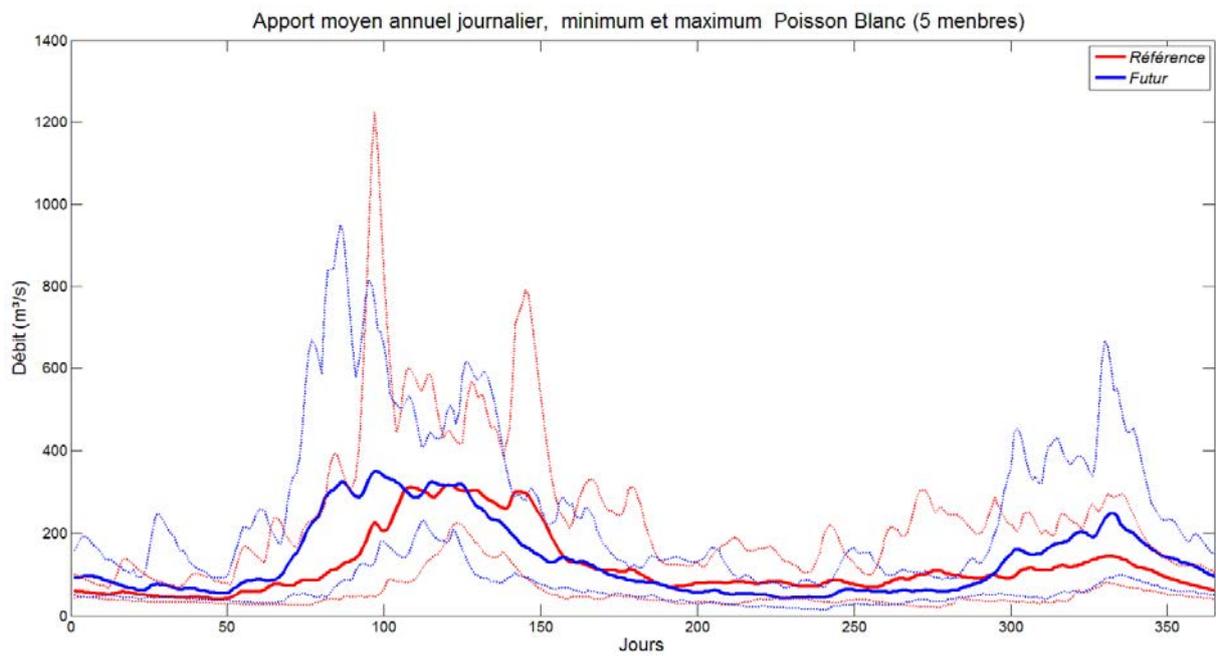


Figure 20. Apports journaliers moyens, maximum et minimum au réservoir Poisson Blanc durant la période de référence (1961-2000) et futurs (2041-2070) (5 membres)

5.2 Variations annuelles des niveaux dans les réservoirs

Les figures 21 à 26 représentent les niveaux journaliers moyen, minimum et maximum correspondant à 10 années de simulation pour les réservoirs Kiamika, Mitchinamecus et Poisson Blanc pour chacun des cinq membres du MRCC. Les niveaux moyens sont représentés par les lignes pleines et les niveaux minimum et maximum sont représentés par les lignes pointillées. Les traits noirs correspondent aux contraintes de niveau remises par le CEHQ. On constate que d'une manière générale, les niveaux moyens des trois réservoirs se tiennent à l'intérieur des contraintes de niveau inférieur et supérieur pour la période de référence et pour le climat futur. On note cependant que quelques niveaux maximaux dépassent la contrainte de niveau supérieur.

Les résultats pour le réservoir Kiamika, le plus petit réservoir du système hydrique de la rivière du Lièvre avec une capacité de 379 hm³, sont présentés aux figures 21 et 22 respectivement en conditions actuelles et futures du climat. Ces résultats couvrent une période de 10 années. On note que le réservoir est géré en moyenne à des niveaux plus élevés durant l'hiver en période de référence comparativement en période de changements climatiques. Par exemple, le niveau moyen au moment de l'amorce de la fonte printanière varie entre 264,5 et 266 m en climat actuel dépendamment des membres du MRCC employé dans les simulations, alors qu'il se situe entre 263,5 et 265,3 m en climat futur. Aussi, l'occurrence d'un printemps plus hâtif en climat futur se fait sentir par un rehaussement plus tôt en climat futur, en conformité avec la fonte printanière qui est devancée de plus de 3 semaines, voir la figure 18.

Un élément important qui ressort des simulations est la plus grande variabilité des niveaux du réservoir en climat futur, particulièrement durant la fin de l'automne et l'hiver, comme en font foi les niveaux maximum et minimum que l'on observe sur les figures 21 et 22. Cette variabilité accrue est en accord avec la plus grande variabilité des apports aux réservoirs, résultat de précipitations plus abondantes et surtout de la présence accrue de redoux hivernaux causés par la hausse des températures hivernales. Un dépassement notable du niveau supérieur associé à la simulation avec l'un des membres du MRCC, que l'on observe également au réservoir Poisson Blanc, est expliqué plus loin. Ce dépassement n'est pas étranger aux contraintes minimale et maximale de niveau estival imposées au réservoir, qui ne laissent que peu de marge de manœuvre (environ 2 mètres) pour la gestion. Un abaissement du niveau minimum d'exploitation durant la période estivale pourrait être rendue nécessaire. L'outil de gestion est en mesure d'effectuer de telles simulations.

Les niveaux journaliers moyen, minimum et maximum au réservoir Mitchinamecus, dont la capacité est de 554 hm³, sont présentés dans les figures 23 et 24. Le comportement de ce réservoir est très similaire à celui du réservoir Kiamika, soit une gestion du réservoir en climat futur en moyenne plus basse durant la saison d'hiver comparativement à la période de contrôle, une plus grande plage entre les niveaux maximum et minimum en toute saison et un rehaussement des niveaux plus hâtifs au printemps en réponse à la crue printanière

plus précoce. Malgré cette plus grande variabilité, les dépassements de niveaux sont absents, ce qui donne à penser que, sous les contraintes de gestion actuelles, le réservoir Mitchinémacus possède une marge de manœuvre face à l'augmentation de la variabilité hydrologique consécutive aux changements climatiques. Il faut comprendre que la contrainte de niveau minimum imposée durant la saison estivale, contrainte qui est destinée à maintenir les activités de villégiature, est suffisamment basse pour accorder la marge de manœuvre pour limiter les dépassements, et ce, malgré la plus grande hydraulité simulée en climat futur, voir la figure 19.

Les niveaux moyen, minimum et maximum au réservoir Poisson Blanc, dont la capacité est de 625 hm³, sont présentés dans les figures 25 et 26 respectivement pour la période de référence et pour l'horizon futur 2059-2068. Tout comme pour les réservoirs Mitchinamecus et Kiamika, l'influence des changements climatiques se fait sentir par une gestion à la baisse du réservoir durant l'hiver et une plus grande variabilité de la réponse du réservoir aux apports naturels. Ce réservoir est celui des trois qui est le plus contraint au chapitre des niveaux. En effet, la plage entre les niveaux minimum et maximum pour manœuvrer durant la saison estivale n'est que de 1,4 mètre pour des fins de villégiature. Aussi, une réserve de crue entre le début avril et le 1^{er} juin est prévue pour pouvoir gérer les crues jusqu'à Montréal. On note toutefois des dépassements significatifs en avril, mai et juin pour tous les membres du MRCC, alors que les niveaux maximum atteints dépassent d'environ 2 mètres le niveau maximal d'exploitation, fixé à 201,90 m.

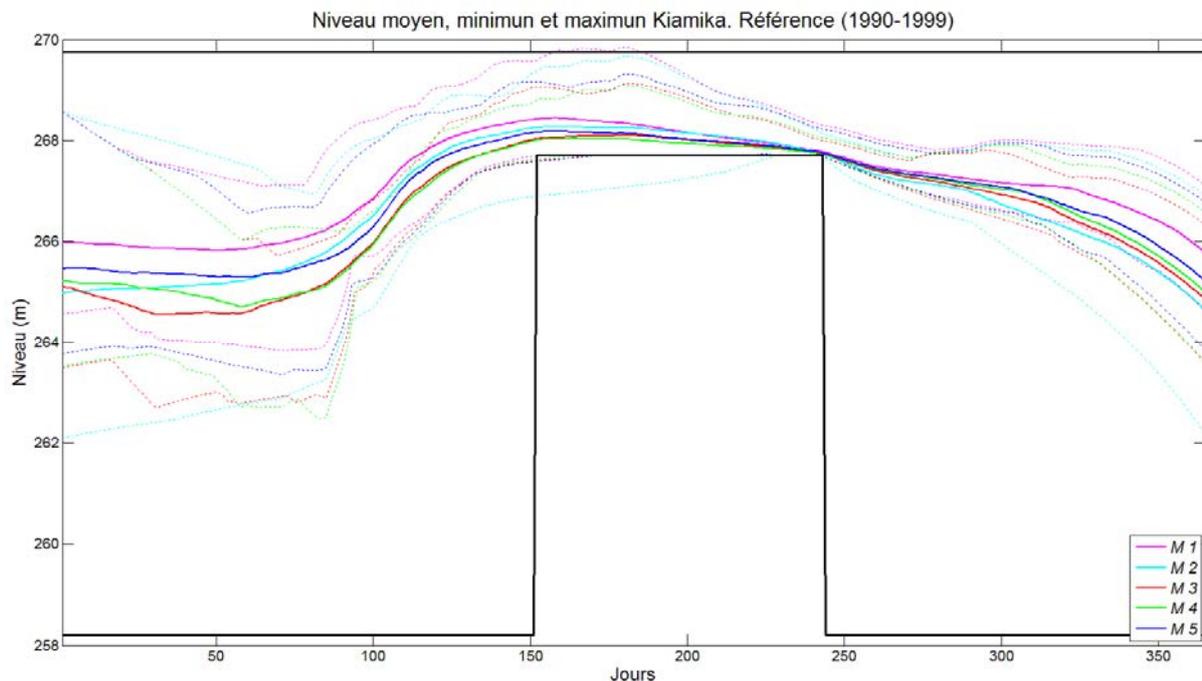


Figure 21. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au réservoir Kiamika en climat actuel (1990-1999)

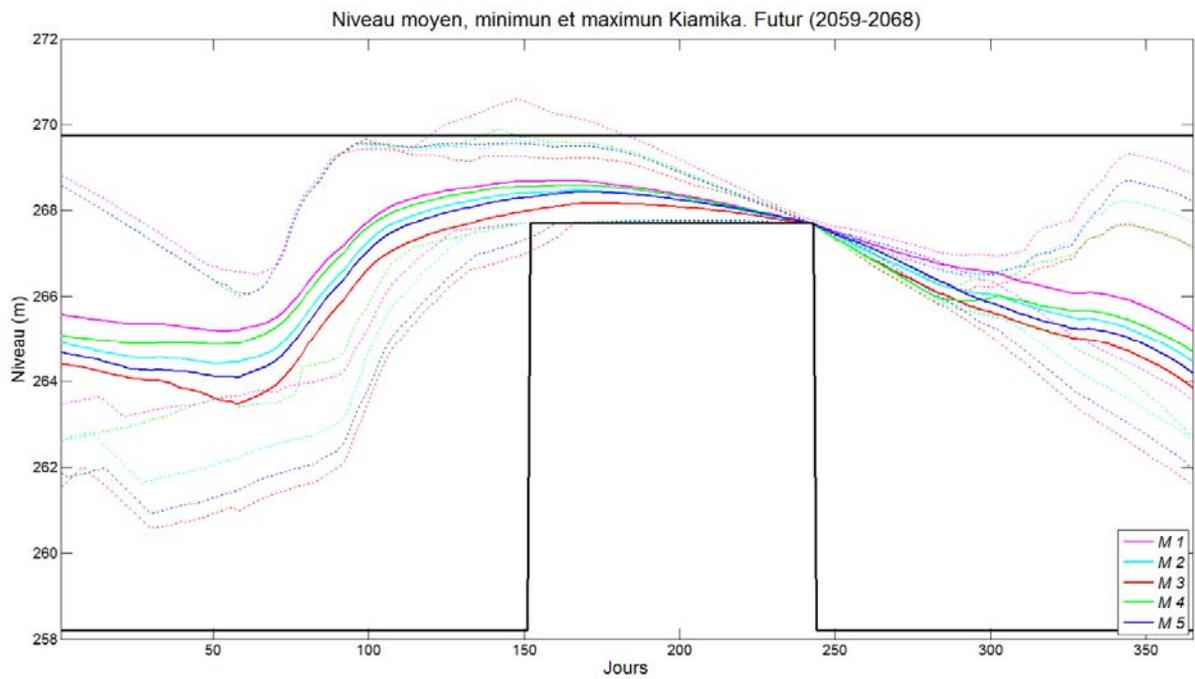


Figure 22. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au réservoir Kiamika en climat futur (2059-2068)

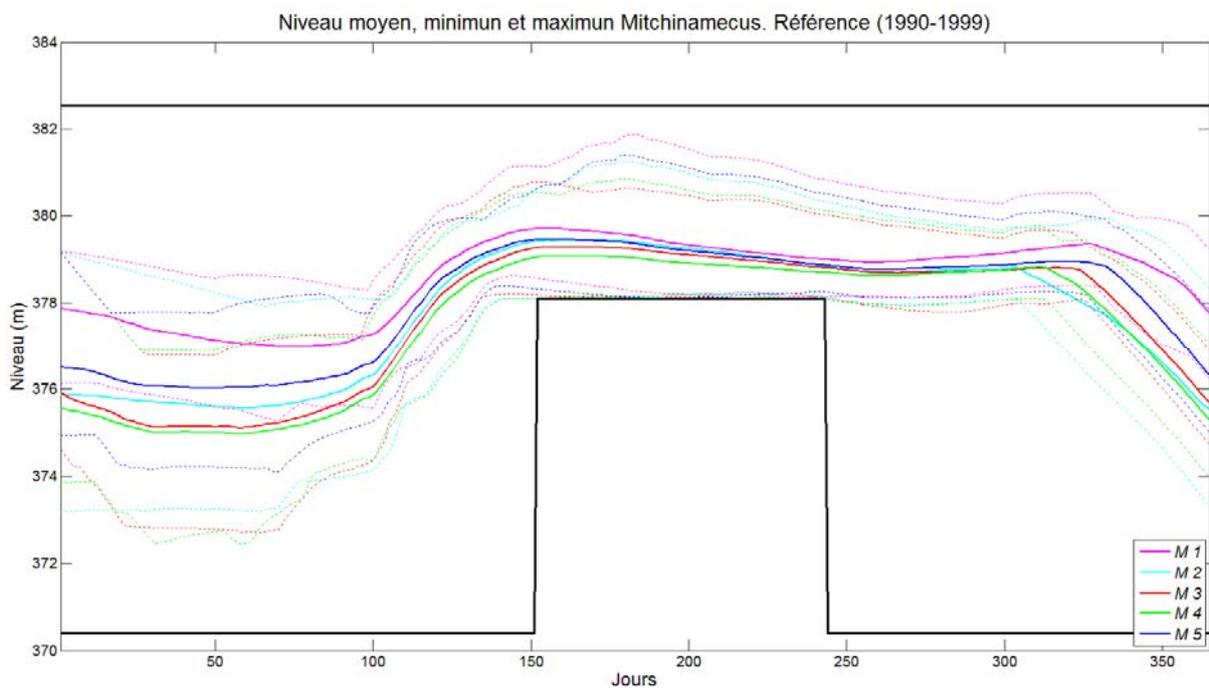


Figure 23. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au réservoir Mitchinamecus en climat actuel (1990-1999)

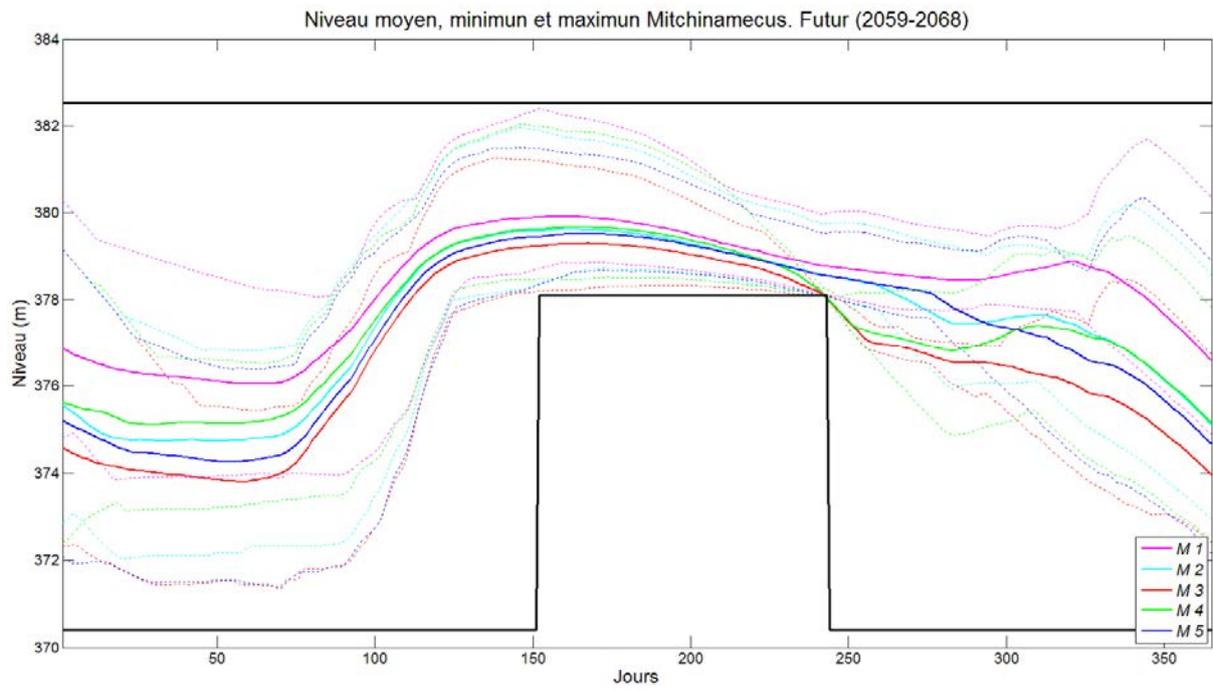


Figure 24. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au réservoir Mitchinamecus en climat futur (2059-2068)

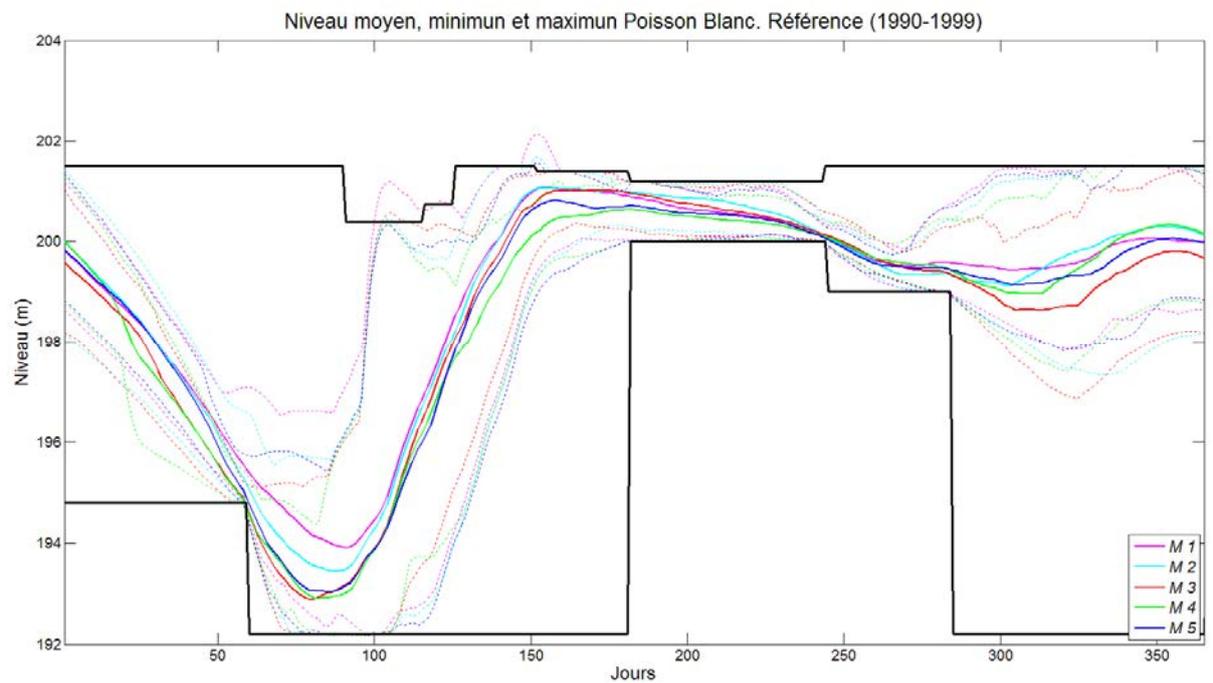


Figure 25. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au réservoir Poisson Blanc en climat actuel (1990-1999)

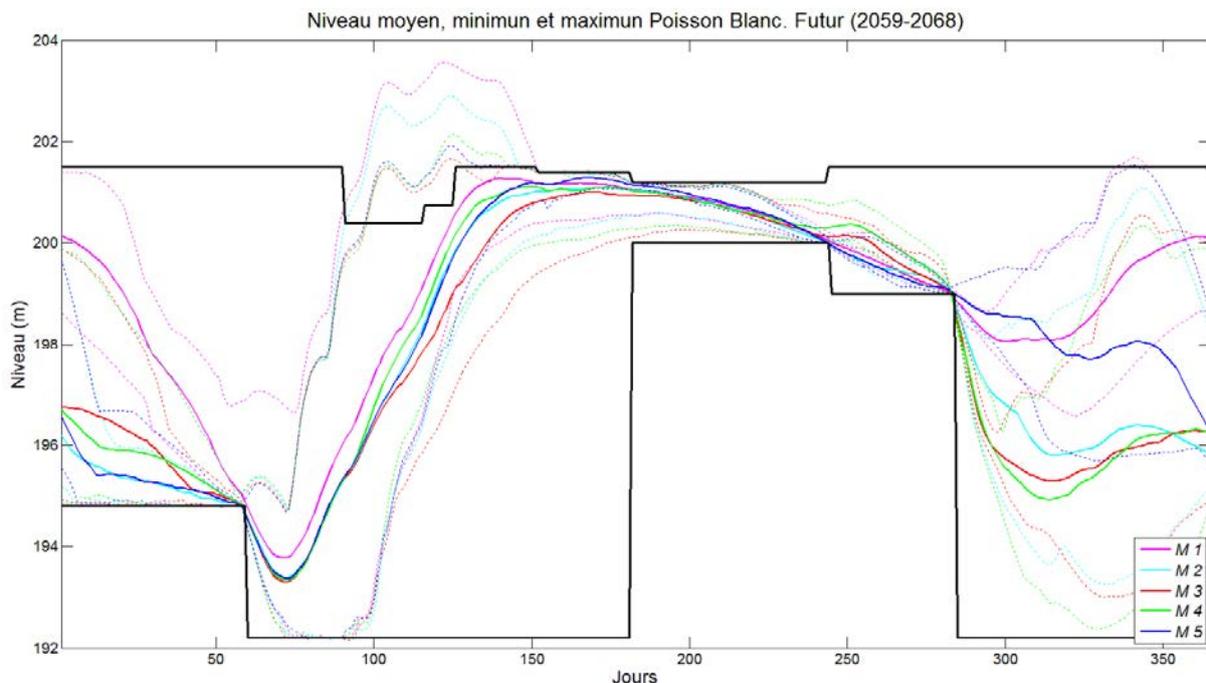


Figure 26. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au réservoir Poisson Blanc en climat futur (2059-2068)

Un examen des résultats des simulations indique que les dépassements simulés aux réservoirs Poisson Blanc et Kiamika en climat futur se sont produits lors d'une seule année, en l'occurrence l'année 2063. Les figures 27 et 28 présentent les prévisions d'ensemble hydrologiques utilisées aux journées 60 (1^{er} mars) et 70 (11 mars) avec le scénario hydrologique de l'année 2063 en trait foncé. On voit nettement que le scénario de l'année 2063 sort de la plage des prévisions hydrologiques d'ensemble. En effet, la crue de l'année 2063 est nettement plus hâtive que celles que constituant les prévisions, de sorte que l'optimisateur a généré de faibles soutirages pendant le passage de la crue. Aussi, on note que l'année 2063 a produit le pic de crue printanier le plus grand des dix années utilisées dans la simulation. L'effet combiné est responsable des dépassements simulés, ce qui a éliminé la réserve de crue. Une plage de prévisions d'ensemble plus large aurait selon toute vraisemblance permis d'atténuer le dépassement rencontré car des soutirages plus importants auraient alors été produits.

Les figures 29 et 30 présentent les variations de niveau journalier moyen, minimum et maximum au Lac des Deux Montagnes, respectivement pour les conditions de climat actuelles (1990-1999) et futures (2059-2068). En climat actuel, les niveaux moyens sont relativement stables en hiver, suivie par une montée progressive consécutive à la fonte printanière. Une décroissance du niveau s'amorce dans la seconde moitié du mois d'avril (jour 105) jusqu'à la fin du mois de septembre (jour 270). La remontée du niveau à l'automne est liée à l'augmentation des apports, résultat de l'augmentation de la précipitation et de la diminution de la température. La courbe de niveau moyen est peu sensible aux membres du MRCC. La variation entre les niveaux minimum et maximum au lac est généralement plus faible durant l'été (moins d'un mètre) et est maximale en période de fonte printanière (plus de 2 mètres).

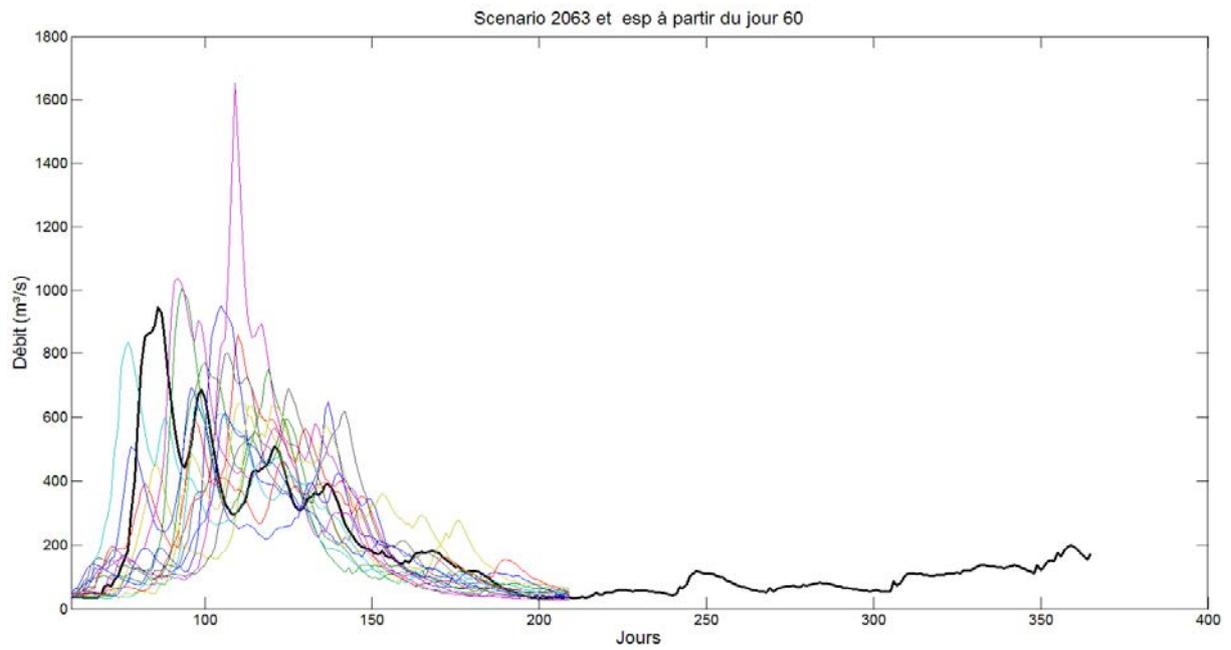


Figure 27. Scénario hydrologique de l'année 2063 (trait gras) et prévisions hydrologiques d'ensemble (traits colorés) au jour 60 (1er mars).

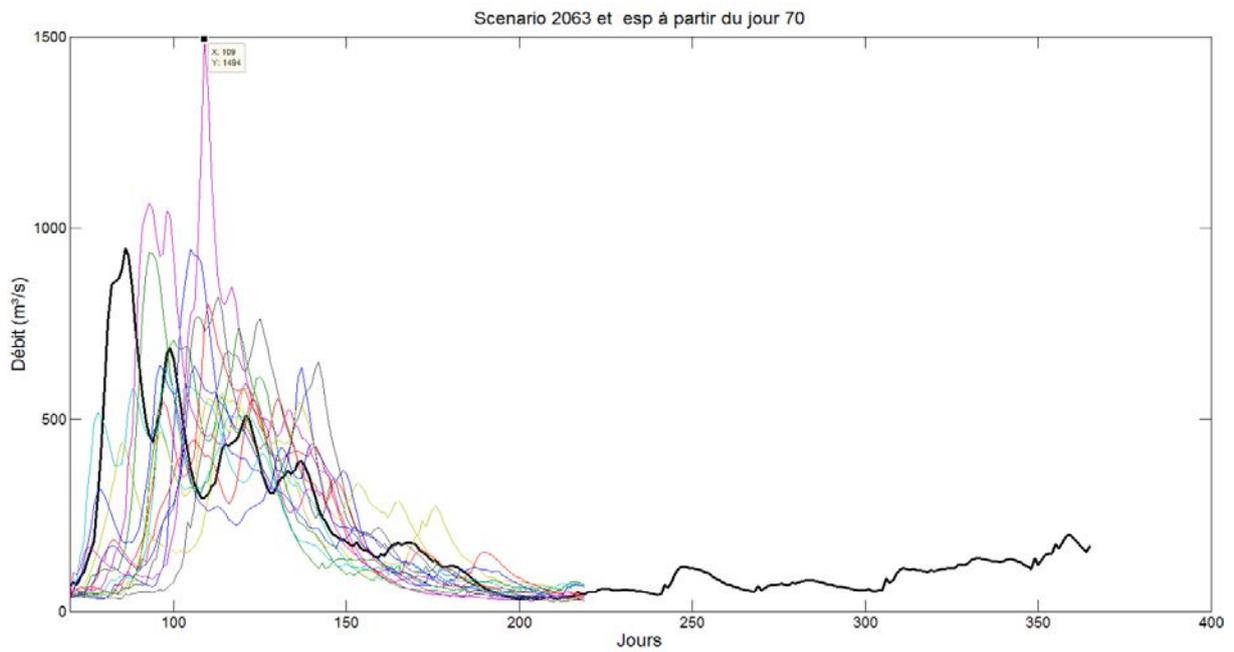


Figure 28. Scénario hydrologique de l'année 2063 (trait gras) et prévisions hydrologiques d'ensemble (traits colorés) au jour 70 (11 mars).

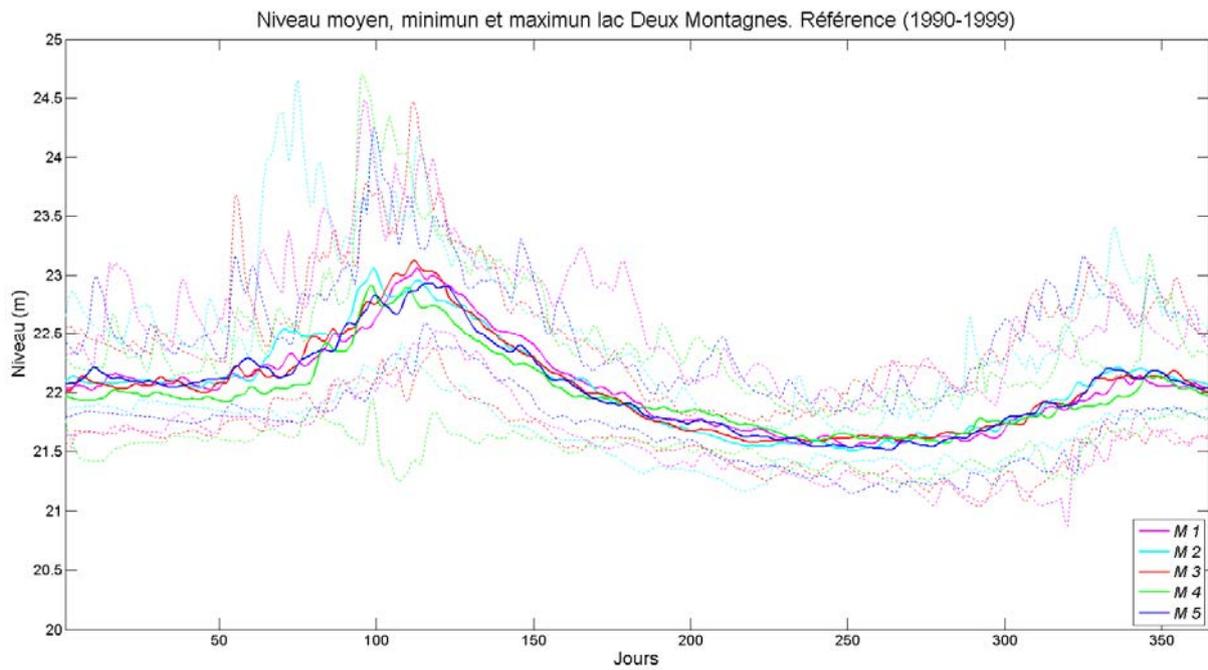


Figure 29. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au lac des Deux Montagnes en climat actuel (1990-1999)

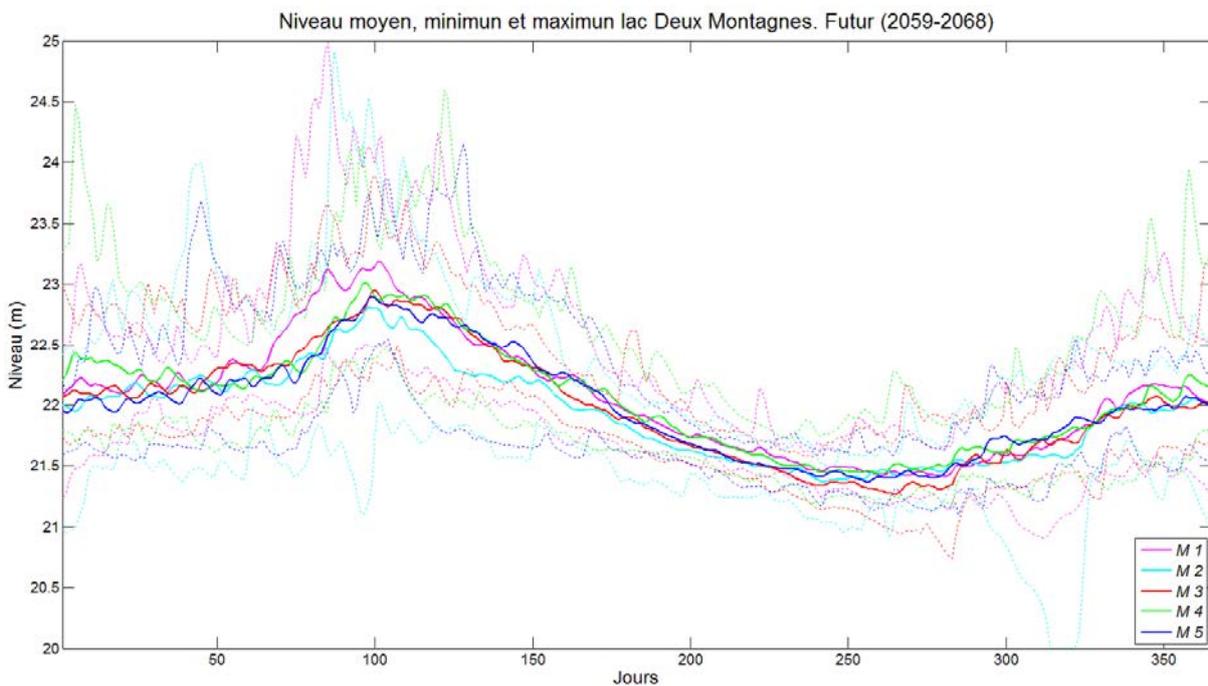


Figure 30. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au lac des Deux Montagnes en climat futur (2059-2068)

La variation temporelle du niveau du lac en climat futur suit un patron similaire à celle observée en climat actuel, avec toutefois des différences notables. D'une part, la pointe moyenne printanière survient environ 2 semaines plus tôt. D'autre part, la variabilité

observée, qui se manifeste par l'écart entre les niveaux maximum et minimum, est plus significative durant les saisons d'hiver et du printemps. La présence de redoux hivernaux et la plus grande variabilité des apports durant la fonte printanière expliquent les résultats obtenus. On note en particulier de plus faibles niveaux simulés par le second membre du MRCC. Cette baisse est attribuable aux faibles précipitations simulées durant l'année 2066 par le modèle de climat. Les apports naturels produits par Hydrotel sur l'ensemble du bassin versant de la rivière des Outaouais, ont par conséquent été en deçà de la moyenne. Aussi, le réseau de neurones a produit de faibles débits régularisés pour la rivière des Outaouais et Gatineau entre les jours 300 et 325, expliquant la baisse très marquée du niveau du Lac des Deux Montagnes durant cette période. Cette baisse localisée est probablement un artifice de la stratégie de modélisation employée.

5.3 Niveaux et débits soutirés aux réservoirs

Les figures 31 à 42 présentent les niveaux des réservoirs Kiamika, Mitchinamecus et Poisson Blanc et leurs débits soutirés respectifs pour trois années considérées représentatives des périodes de référence et futures, soient les années 1996 à 1998 et les années 2060 à 2062. Les contraintes de niveau sont représentées par les traits noirs.

Une première observation générale aux trois réservoirs est la variabilité des niveaux associée aux membres du MRCC qui connaît une augmentation notable en climat futur, particulièrement pour le réservoir du Poisson Blanc. Cette augmentation n'est pas une surprise puisque bon nombre d'études supportent la possibilité d'un changement dans la variabilité naturelle du climat sous des conditions de changements climatiques (ex : Appenzeller et al., 2000) anticipent une augmentation de la variabilité naturelle de la précipitation et de la température en climat futur. De récentes études confirment que les températures et précipitations simulées par le MRCC connaissent une augmentation de leur variabilité en climat futur (ex : Minville et al., 2009).

Les figures 31 et 33 montrent les niveaux du réservoir Kiamika en climat actuel et futur tandis que les figures 32 et 34 présentent les débits soutirés qui y sont associés. Les courbes de niveau montrent un comportement typique d'un réservoir destiné à la protection contre les inondations et au maintien des activités de villégiature, soit une augmentation du niveau durant la fonte printanière, un niveau situé entre les niveaux minimum et maximum d'exploitation durant la période estivale et une diminution progressive du niveau durant l'automne et l'hiver. Le comportement du réservoir en climat futur suggère que le réservoir possède la marge de manœuvre nécessaire pour une opération sécuritaire tout en respectant les différentes contraintes associées à son exploitation. En outre, le niveau de vidange complète, situé à 258,16 m n'a pas été atteint durant la période de simulation (10 années) de même que le niveau maximal d'exploitation, situé à 270,66 m. Il serait toutefois nécessaire de procéder à des simulations couvrant une période de temps plus étendue pour tirer des conclusions plus fermes sur la vulnérabilité de ce réservoir en conditions de changements climatiques.

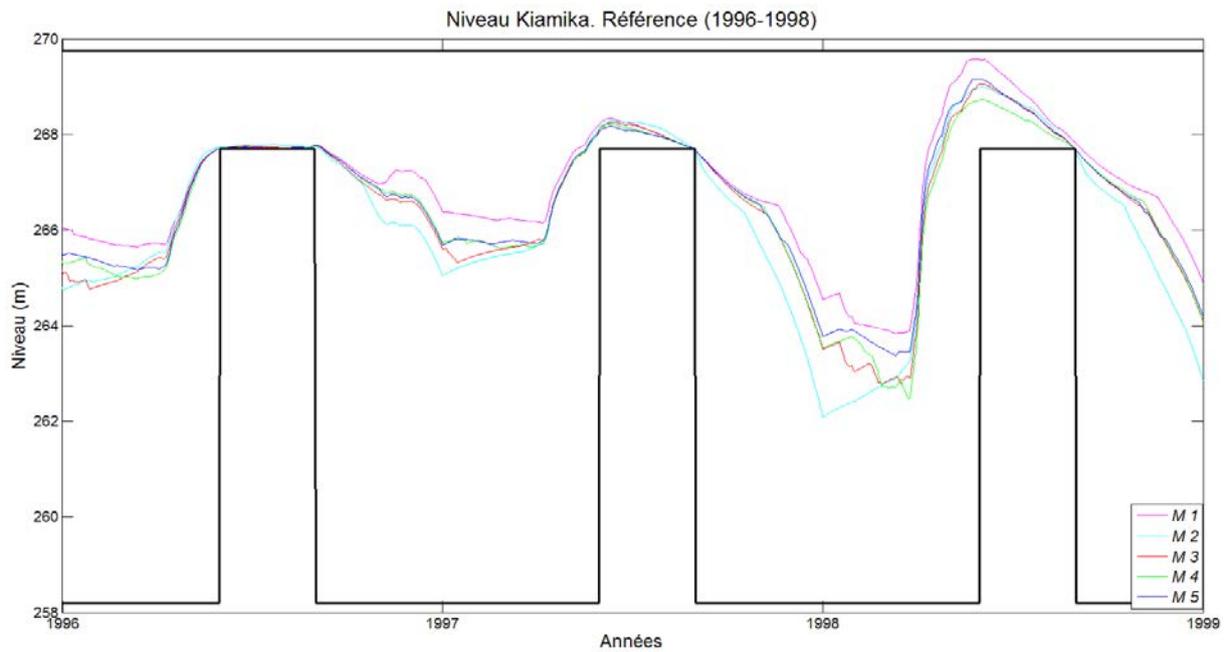


Figure 31. Niveaux au réservoir Kiamika en climat actuel de 1996 à 1998

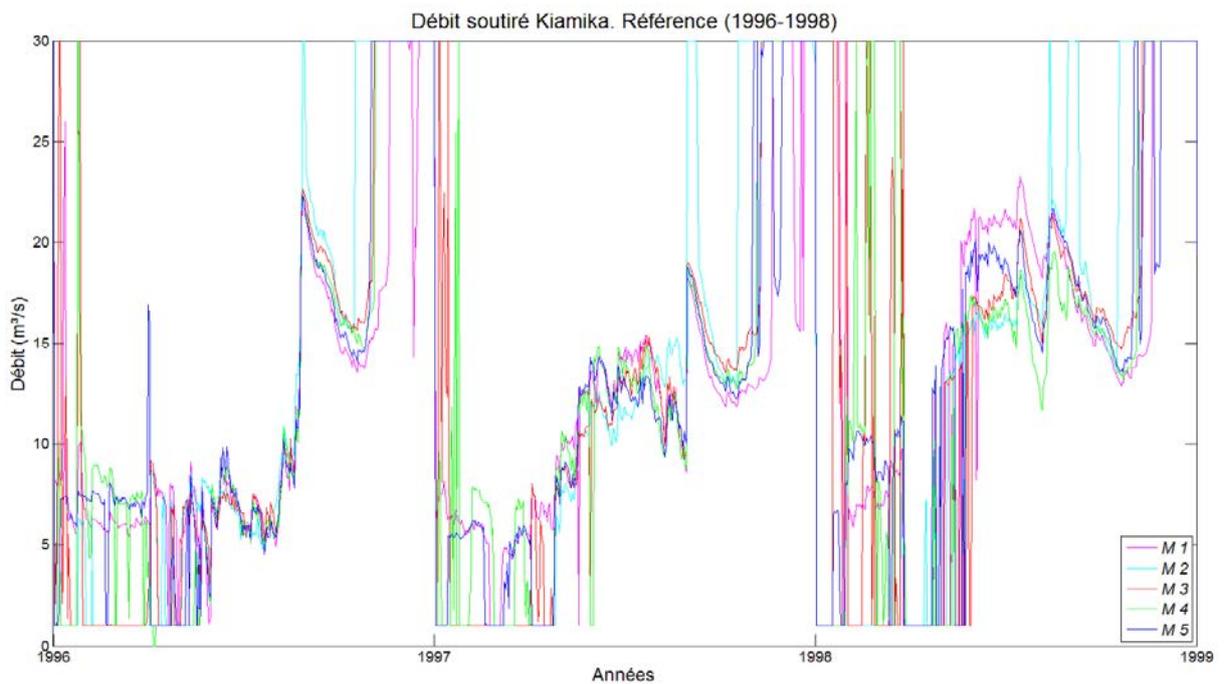


Figure 32. Soutirages au réservoir Kiamika en climat actuel de 1996 à 1998

Les figures 32 et 34 indiquent que les débits soutirés n'atteignent pas limite de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ où les premières propriétés commencent à être affectées. On note par contre que la période durant laquelle les débits atteignent $30 \text{ m}^3/\text{s}$, contrainte présentement imposée dans le modèle d'optimisation, augmente sensiblement sous des conditions de changement climatique. Ce résultat est conforme avec l'augmentation globale des apports au réservoir (voir la figure 18) simulés. Le fait que le réservoir Kiamika puisse être géré avec des soutirages significativement inférieurs au seuil d'inondation tout en se maintenant à

l'intérieur des contraintes de niveau imposées suggère que ce réservoir est peu vulnérable aux effets des changements climatiques. Des simulations sur un horizon de temps plus grand sont souhaitées pour en tirer des conclusions plus fermes. Ce constat s'applique également au réservoir Mitchinamecus, voir les figures 35 à 38.

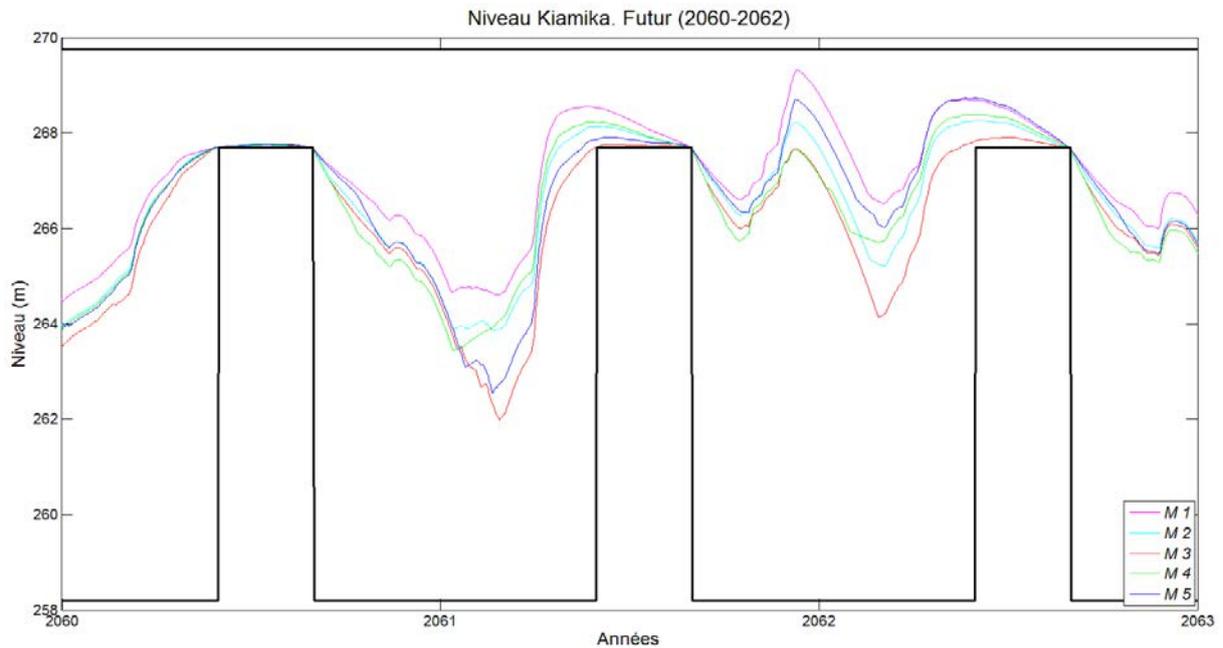


Figure 33. Niveaux au réservoir Kiamika en climat futur de 2060 à 2062

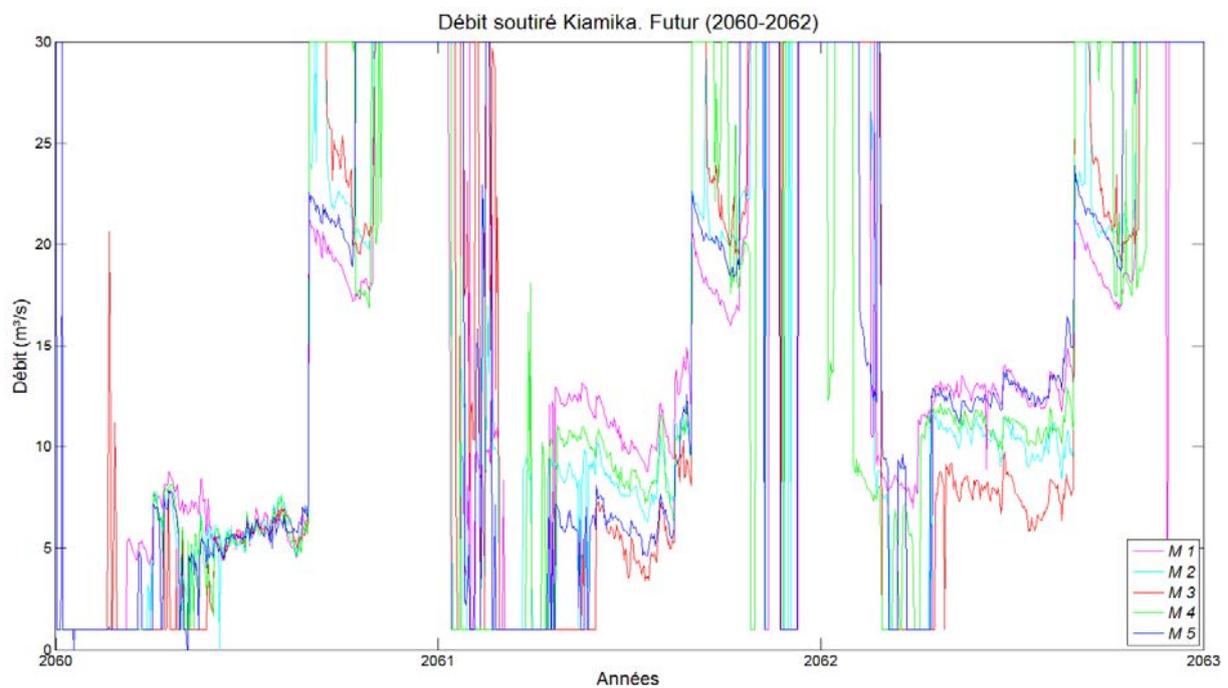


Figure 34. Soutirages au réservoir Kiamika en climat futur de 2060 à 2062

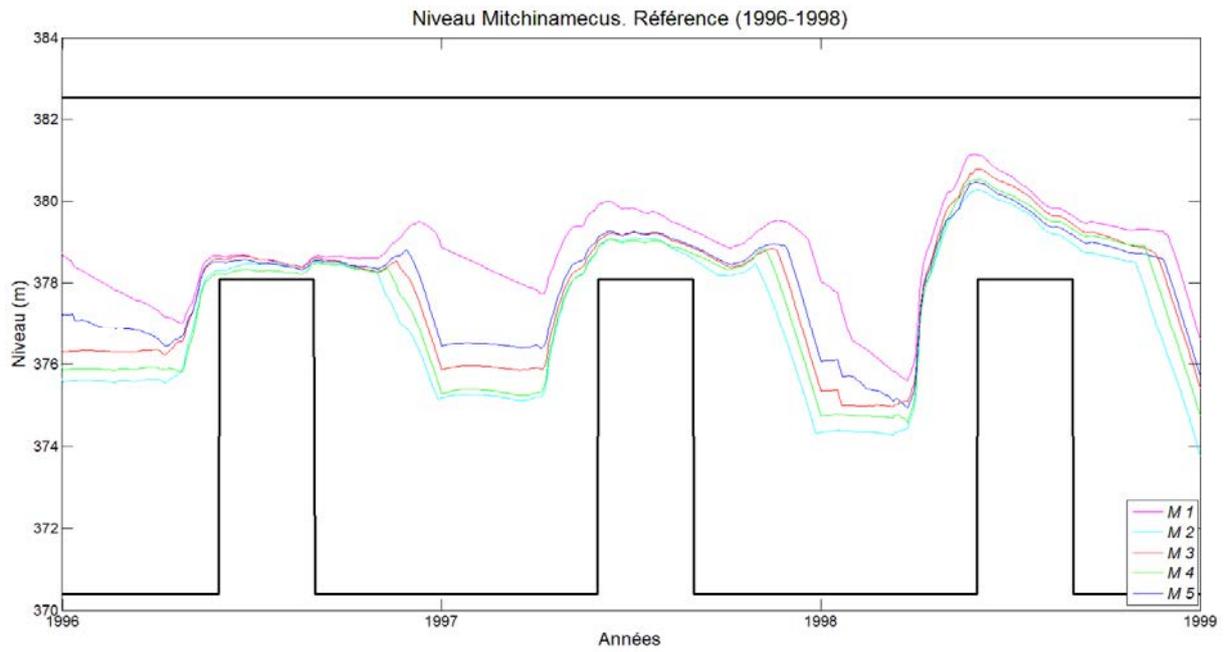


Figure 35. Niveaux au réservoir Mitchinamecus en climat actuel de 1996 à 1998

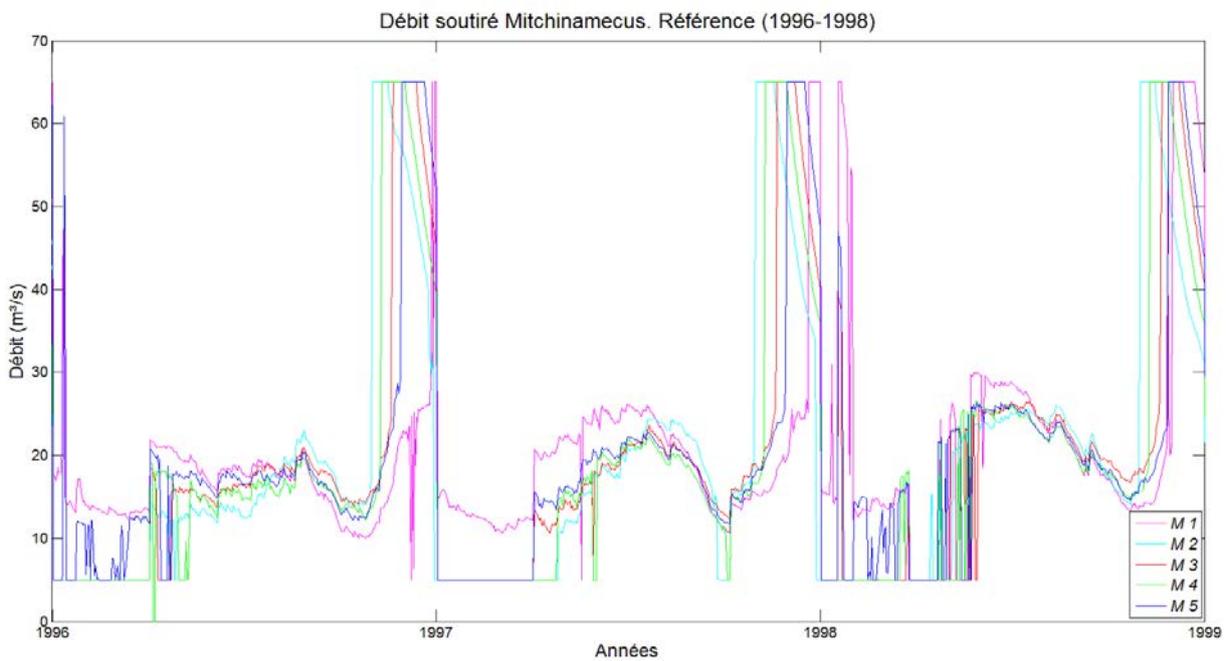


Figure 36 Soutirages au réservoir Mitchinamecus en climat actuel de 1996 à 1998

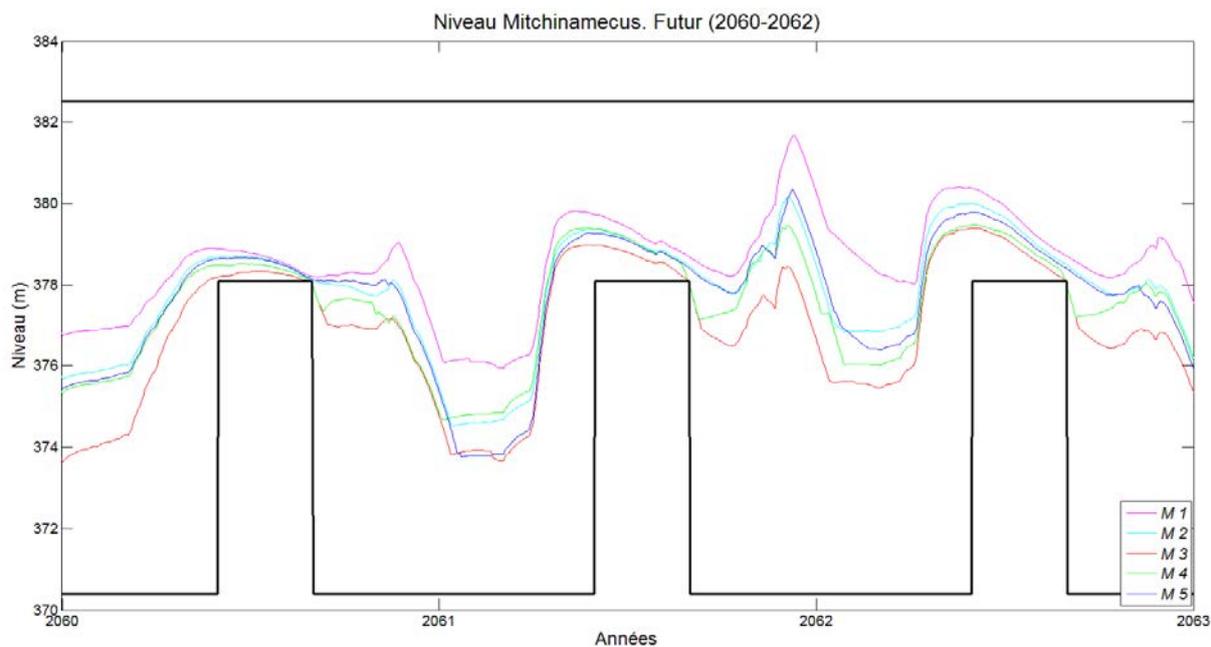


Figure 37. Niveaux au réservoir Mitchinamecus en climat futur de 2060 à 2062

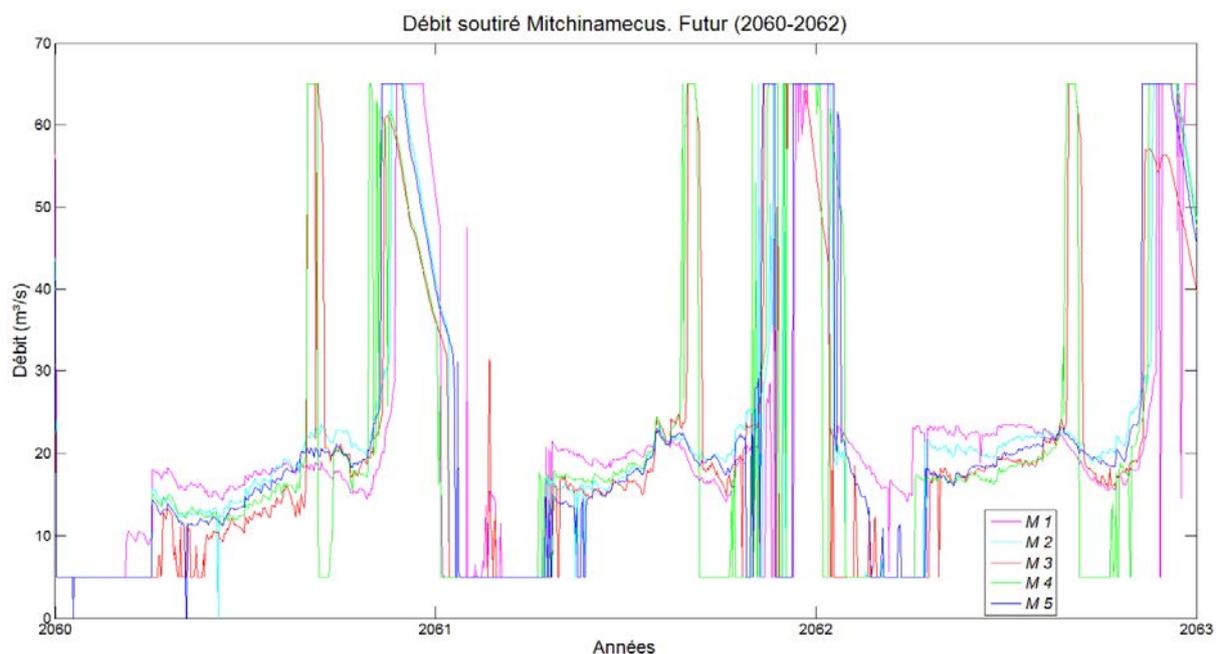


Figure 38. Soutirages au réservoir Mitchinamecus en climat futur de 2060 à 2062

Les courbes de niveau du réservoir Poisson Blanc et les soutirages associés sont présentés dans les figures 39 à 42. On y constate que les fluctuations de niveau y sont plus importantes lorsque comparées aux fluctuations observées dans les réservoirs Kiamika et Mitchinamecus. Ce comportement est anticipé étant donné que la capacité du réservoir

Poisson Blanc est inférieure à la somme des capacités des réservoirs Kiamika et Mitchinamecus, alors que les apports naturels y sont beaucoup plus importants.

Sur les trois années montrées dans les figures, le réservoir a atteint et s'est maintenu à sa cote maximale d'exploitation peu après la fonte printanière à deux reprises en climat actuel et sur trois années consécutives en conditions de changement climatique. Des apports soutenus à l'automne ont également haussé le niveau du réservoir à sa cote maximale de 201,50 m durant l'année 1996 et un léger dépassement a été obtenu en conditions de climat futur. Aussi, le niveau de vidange complète du réservoir, soit 192,14 m, a été atteint durant l'hiver à chacune des trois années en climat actuel et lors de deux années sur trois en changement climatique. De plus, la contrainte de niveau minimum de 194,50 m imposée durant les premiers mois de l'hiver (janvier et février, contrainte du CEHQ) a été atteinte et maintenue durant deux hivers sur trois en changement climatique. Un début plus hâtif du remplissage du réservoir en prévision d'une crue printanière précoce nécessite une vidange automnale plus rapide. C'est cette vidange plus brusque du réservoir qui est à l'origine de l'atteinte du niveau minimum simulé. Des descentes brusques du réservoir pouvant causer des inconvénients aux utilisateurs du réservoir, il convient de s'interroger sur le comportement anticipé du réservoir sous des conditions de changements climatiques. Des modifications sur les contraintes de niveau pourraient être nécessaires pour favoriser une descente plus graduelle.

Les débits maximums soutirés à Poisson Blanc ont atteint, mais n'ont pas dépassé 400 m³/s, valeur cible à partir de laquelle des problèmes peuvent survenir à Notre-Dame du Laus, village situé en aval du réservoir. On note cependant que le nombre de jours où les soutirages ont atteint cette valeur sont à la hausse en conditions de climat futur.

Par ailleurs, les soutirages ont été inférieurs au débit environnemental minimum de 31 m³/s (contrainte du CEHQ) durant 3 journées lors de l'année 2060. Cette réduction du soutirage s'est produite pour réduire les débits acheminés vers l'archipel de Montréal dans le but de limiter les inondations dans ce secteur. Tel que mentionné dans la section 4.6, l'outil de gestion réduit les débits soutirés à la sortie du réservoir Poisson Blanc lorsque le débit anticipé à l'entrée de la rivière des Mille-Îles excède 780 m³/s. Une correction à l'outil de gestion pourra être apportée pour que les débits soutirés corrigés soient maintenus au-dessus de 31 m³/s.

À la lumière des résultats obtenus, on peut conclure que la marge de manœuvre pour la gestion du réservoir Poisson Blanc est faible et que le risque de dépassement des contraintes sur les niveaux semble en augmentation en condition de changements climatiques. Une analyse approfondie sur une plus grande période de simulation est souhaitée pour en tirer des constats plus sûrs.

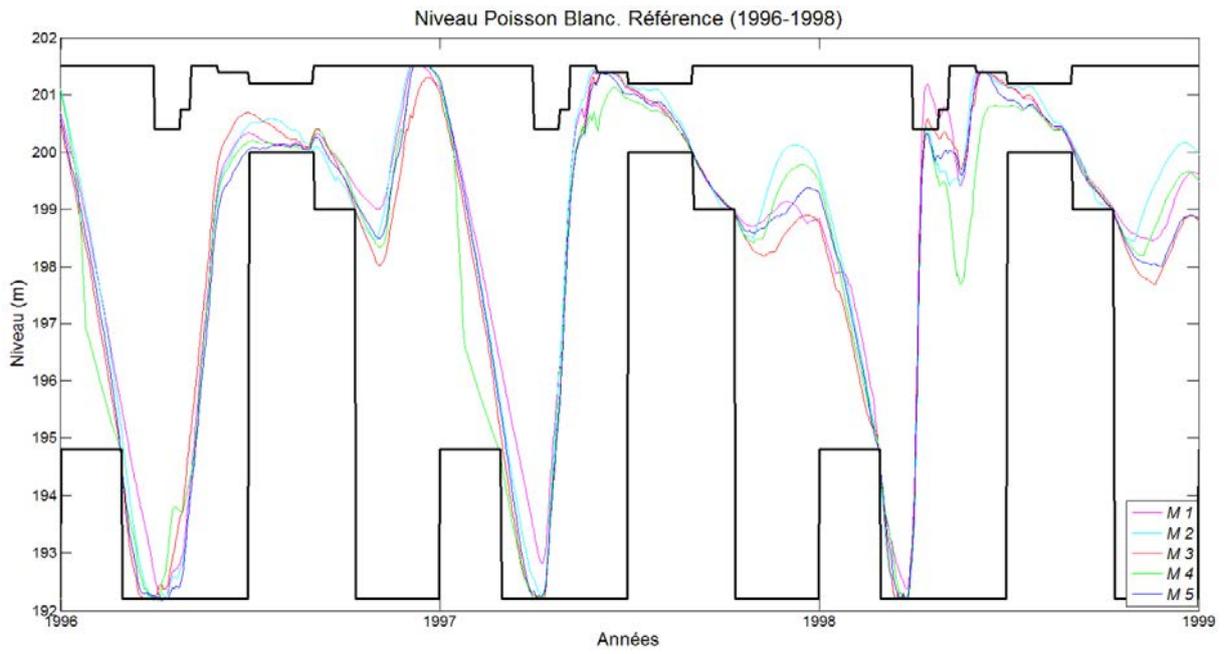


Figure 39. Niveaux au réservoir Poisson Blanc en climat actuel de 1996 à 1998

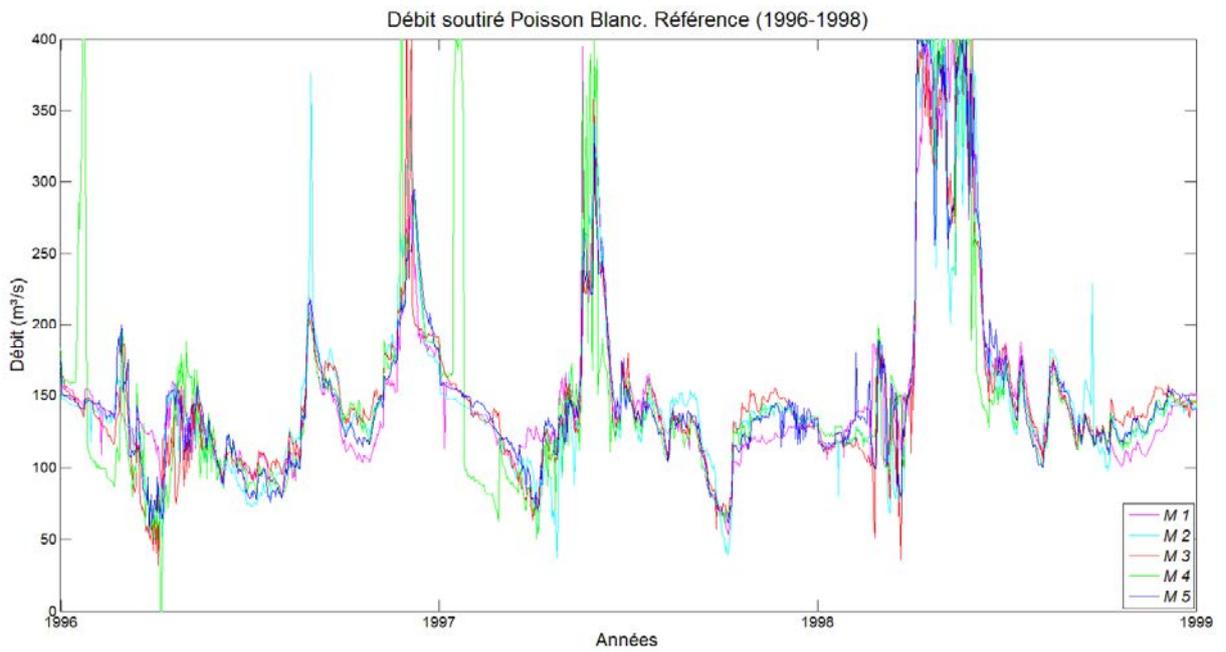


Figure 40. Soutirages au réservoir Poisson Blanc en climat actuel de 1996 à 1998

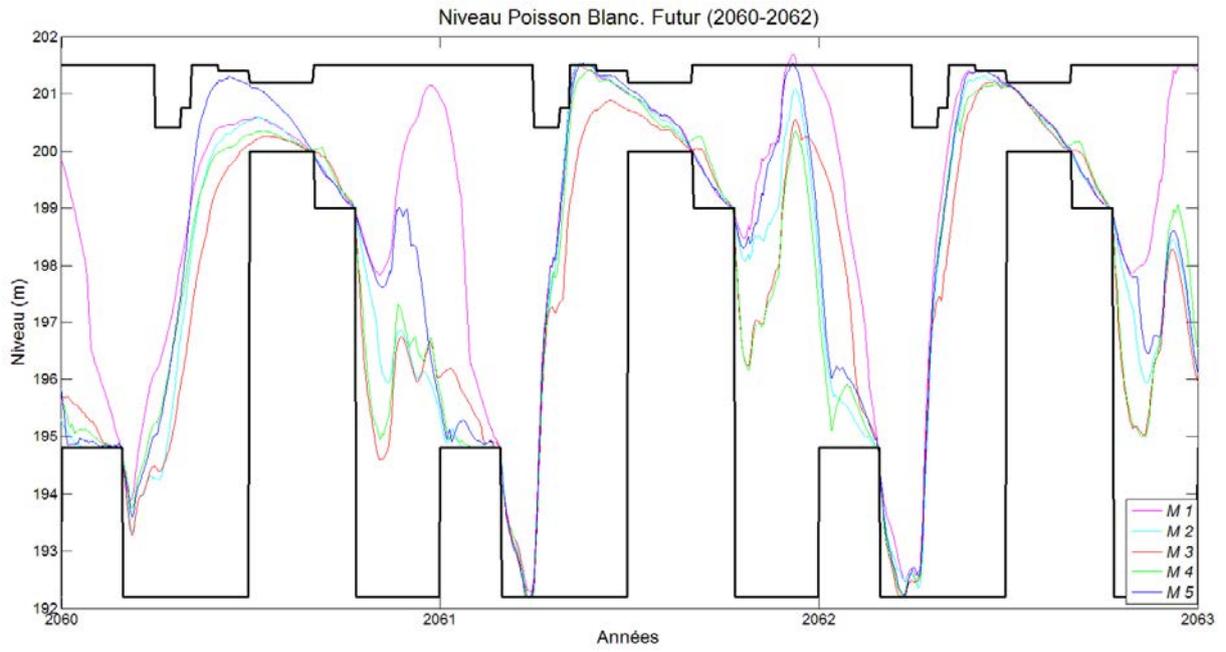


Figure 41. Niveaux au réservoir Poisson Blanc en climat futur de 2060 à 2062

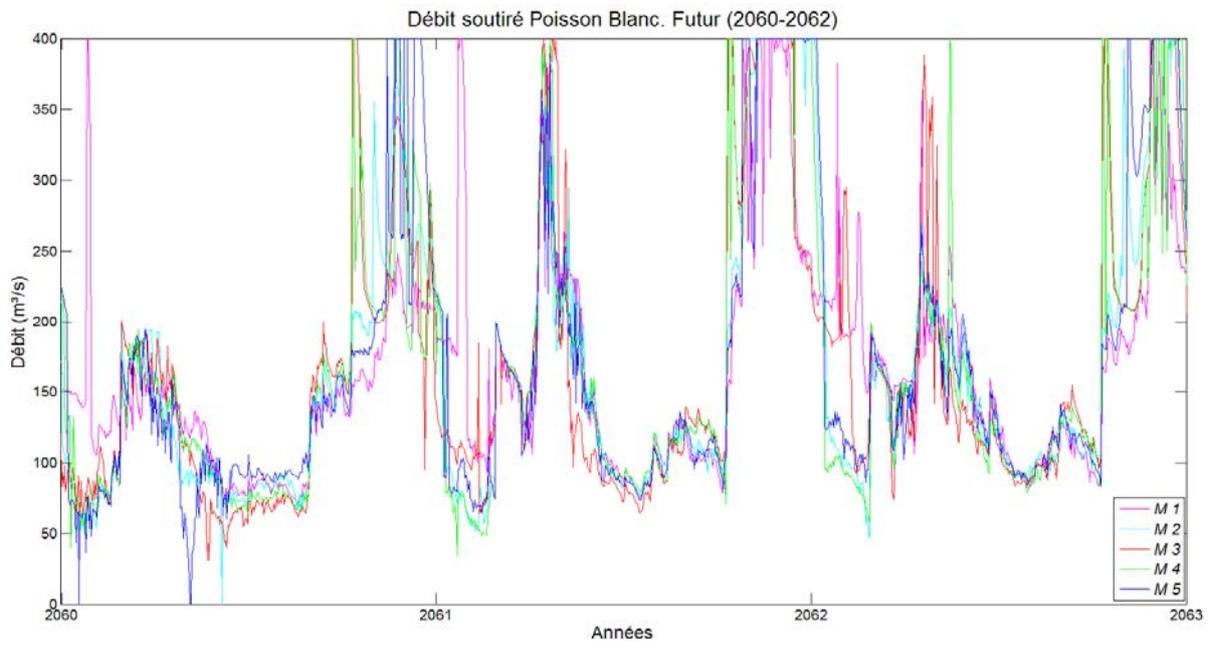


Figure 42. Soutirages au réservoir Poisson Blanc en climat futur de 2060 à 2062

5.4 Contrainte de débit à la rivière des Mille-Îles

Le simulateur «horizon roulant» tient compte d'une contrainte de débit maximal imposée à l'entrée de la rivière des Mille-Îles. Cette contrainte est fixée à $780 \text{ m}^3/\text{s}$. La description de la prise en compte de cette contrainte dans le simulateur est décrite à la section 4.6.

La présente section fait état de l'influence de l'imposition de cette contrainte sur les volumes d'eau retenus dans le lac des Deux Montagnes ainsi que du nombre de jours où la contrainte a été active. Enfin, on regardera la fréquence d'occurrence où on a fait appel au réservoir Poisson Blanc pour réduire les risques d'inondations dans l'archipel de Montréal.

Le nombre de jours où la contrainte est active a été établi de la manière suivante. Le débit de la rivière des Mille-Îles est obtenu à partir du niveau d'eau au lac des Deux Montagnes avec la courbe de tarage disponible. Le niveau du lac est ensuite calculé selon le bilan hydrologique Archipel Nord (voir section 4.4). Le nombre de jours où ce débit dépasse le seuil de $780 \text{ m}^3/\text{s}$ a par la suite été établi. La figure 43 montre un exemple d'hydrogramme calculé à l'entrée de la rivière des Mille-Îles avec et sans coupure de débit à $780 \text{ m}^3/\text{s}$. Le nombre de jours où il y aurait eu dépassement si une restriction sur le débit n'était pas en vigueur à l'entrée de la rivière est comptabilisé dans le tableau 5. Le tableau montre la quantité de jours avec risque de dépassement par année et par membre du MRCC pendant les 10 ans de simulation et la quantité de jours moyenne annuelle en période de référence et en période future. On note que le bilan hydrologique est calculé en utilisant le débit qui passe réellement dans la rivière des Mille-Îles, soit le débit avec restriction à $780 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le volume d'eau retenu dans le lac des Deux Montagnes résultant de la coupure de débit a été calculé à partir du débit sans restriction auquel on a soustrait la valeur de $780 \text{ m}^3/\text{s}$. Ce calcul tient compte de l'augmentation des débits sortant du lac des Deux Montagnes par la rivière des Prairies et vers le lac St-Louis résultant de la coupure à $780 \text{ m}^3/\text{s}$. Les volumes retenus par année et par membre du MRCC sont présentés au tableau 5. On peut constater sur ce tableau une augmentation du volume moyen annuel (5 membres) d'eau retenu dans le lac des Deux Montagnes en climat futur, soit 189 hm^3 , par rapport à la période de référence, 138 hm^3 . Cette augmentation est le reflet d'une plus forte hydraulicité des cours d'eau anticipée en climat futur par les modèles climatiques-hydrologiques (voir par exemple les figures 18-20). On note aussi une augmentation de la moyenne annuelle de journées de dépassement en climat futur (10 jours) par rapport à la période de référence (8.2 jours) cohérente avec l'augmentation des volumes retenus. Enfin, la variabilité du régime hydrologique est manifeste de par la présence d'années où il n'y a presque pas de dépassements (ex : année 8 en climat actuel et 10 en climat futur), alors que d'autres années présentent des dépassements largement au-dessus de la moyenne (ex : année 6 en climat actuel et futur).

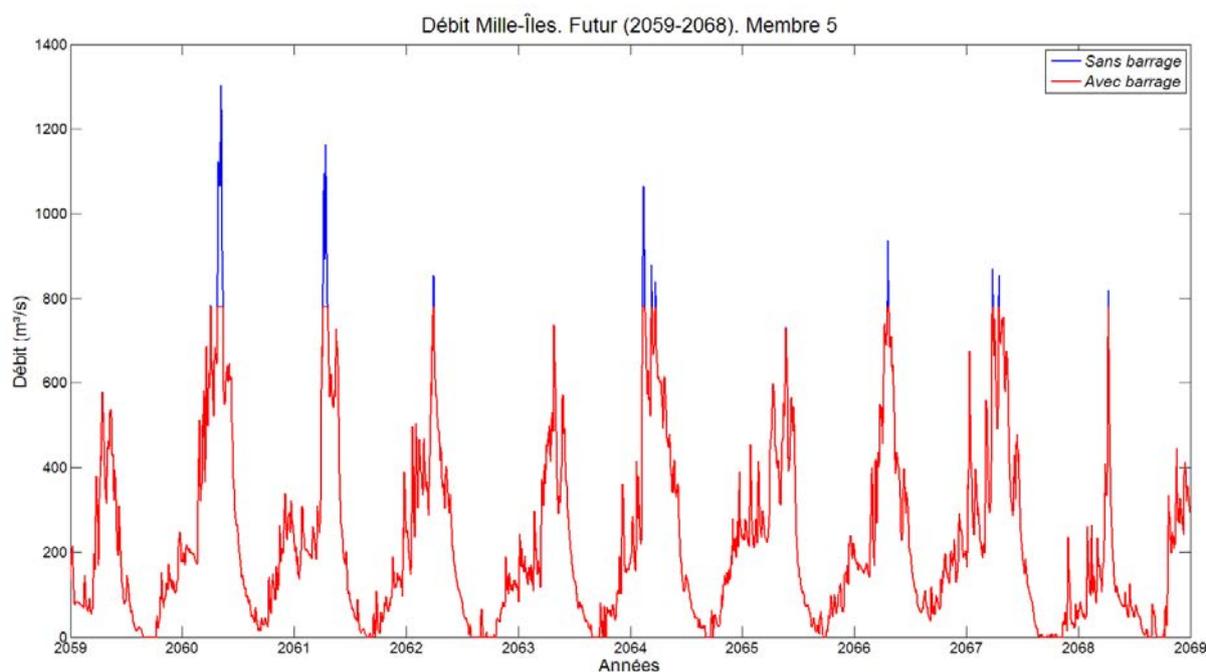


Figure 43. Hydrogramme de la rivière des Mille-Îles avec et sans contrainte sur le débit.

Le nombre de jours où le débit à l'entrée de la rivière des Mille-Îles aurait été supérieur à $780 \text{ m}^3/\text{s}$ s'il n'y avait pas eu des mesures de restriction ainsi que les volumes retenus correspondants ont également été calculés à partir de la simulation du système en mode 'historique', soit avec les débits modélisés à partir des observations météorologiques, et directement à partir des observations des niveaux du lac des Deux Montagnes. Ces valeurs apparaissent au tableau 5. Le nombre de jours où se produit un risque de dépassement en historique (15,8 jours) est plus grand que le nombre de jours produits avec le MRCC en période de référence (8,2 jours). Le même comportement est observé avec le volume historique annuel moyen qui est plus grand (307 hm^3) que le volume moyen produit par le MRCC (138 hm^3). Ces différences, qui semblent être reliées à la source de données météorologiques utilisées pour produire les apports, sont difficiles à expliquer. En effet, les données du MRCC ont été débiaisées. Il est possible que cette opération n'ait pas complètement éliminé les biais correspondants sur les régimes hydrologiques modélisés. Il est aussi possible que le réseau de neurones employé pour convertir les apports naturels en apports contrôlés soit en partie responsable des écarts notés. Des différences sont également notées entre les journées de dépassement et les volumes retenus en mode 'historique' et en mode 'observation'. On note à nouveau que les simulations ont été réalisées avec l'hypothèse d'une correction de débit à la sortie du réservoir Poisson Blanc correspondant à 30% de l'écart de débit sortant au lac des Deux Montagnes (voir la définition de l'écart à la section 4.6). Des simulations en historique ont été réalisées en changeant les pourcentages d'écart utilisés à 35%, 40%, 45% et 50% (voir la section 4.6) pour vérifier si en utilisant un pourcentage d'écart différent, le volume historique simulé se rapprochait au volume observé.

Tableau 5. Contrainte de débits de la rivière des Mille-Îles. Jours et volumes de dépassement.

	Membre	Années										Total	Moyenne annuelle	Écart Type	Années sans dépassement	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10					
Quantité de jours où il y a risque de dépassement du débit 780 m ³ /s sur la rivière des Mille-Îles.	Référence (1990-1999)	1	9	17	6	2	0	25	0	0	31	1	91	9.1	11.4	3
		2	17	5	4	0	40	22	0	0	3	10	101	10.1	12.9	3
		3	7	3	23	3	0	1	26	0	27	2	92	9.2	11.4	2
		4	0	8	0	2	11	21	19	3	0	0	64	6.4	8.1	4
		5	5	4	15	12	5	17	0	0	5	0	63	6.3	6.3	3
	Futur (2059-2068)	1	19	0	24	14	52	23	0	18	14	0	164	16.4	15.6	3
		2	15	0	4	3	18	32	11	0	0	0	83	8.3	10.7	4
		3	31	0	1	6	0	8	0	15	0	8	69	6.9	9.9	4
		4	11	9	0	0	14	17	21	39	9	0	120	12.0	12.0	3
		5	0	20	15	3	0	15	0	5	5	1	64	6.4	7.5	3
	Historique (1990-1999)		7	24	19	13	14	0	33	36	12	0	158.0	15.8	12.4	2
	Observation (1990-1999)		0	26	8	12	4	0	24	37	17	6	134.0	13.4	12.4	2
Volume d'eau engendré par débit supérieur à 780 m ³ /s sur la rivière des Mille-Îles (Volume retenu au lac Deux-Montagnes) (hm ³)	Référence (1990-1999)	1	137	118	32	2	0	456	0	0	724	0	1470	147	247	
		2	228	63	28	0	883	437	0	0	11	202	1853	185	284	
		3	60	4	84	20	0	1	661	0	518	2	1350	135	244	
		4	0	41	0	2	466	375	600	9	0	0	1491	149	235	
		5	21	65	152	323	10	147	0	0	15	0	733	73	105	
	Futur (2059-2068)	1	351	0	476	243	1592	528	0	280	52	0	3522	352	479	
		2	308	0	22	18	714	668	252	0	0	0	1982	198	283	
		3	364	0	1	36	0	36	0	195	0	82	713	71	120	
		4	188	291	0	0	178	192	396	887	187	0	2320	232	264	
		5	0	451	263	14	0	144	0	34	26	4	936	94	152	
	Historique (1990-1999)		90	647	283	78	96	0	797	877	206	0	3073	307	337	
	Observation (1990-1999)		0	442	67	115	8	0	297	568	471	48	2015	202	221	
Capacité de retenue à Poisson Blanc		910 hm ³														
Quantité de jours où il y a modification du débit soutiré à Poisson Blanc entre février et mai	Référence (1990-1999)	1	42	92	37	62	19	70	41	37	69	36	505.0	50.5	21.9	
		2	71	68	58	35	78	77	16	51	47	43	544.0	54.4	20.0	
		3	35	51	85	53	50	45	53	11	72	58	513.0	51.3	19.8	
		4	2	49	53	33	50	52	81	56	24	23	423.0	42.3	22.2	
		5	54	42	61	48	75	43	37	28	78	13	479.0	47.9	20.1	
	Futur (2059-2068)	1	82	42	81	52	80	54	39	58	63	47	598.0	59.8	16.2	
		2	68	35	52	24	62	61	65	13	1	47	428.0	42.8	23.5	
		3	63	62	50	49	45	78	38	80	50	81	596.0	59.6	15.7	
		4	62	50	39	18	70	68	62	91	71	27	558.0	55.8	22.3	
		5	38	84	58	65	45	91	47	59	71	8	566.0	56.6	23.9	

Enfin, la quantité de jours où il y a eu une modification du débit soutiré à Poisson Blanc entre les mois de février à mai a aussi été comptabilisée par année et par membre. Les résultats sont présentés au tableau 5. Une comparaison de la moyenne annuelle de journées où il y a eu correction de débits au réservoir Poisson Blanc (49,3 et 54,9 jours en climat actuel et futur) par rapport à la moyenne annuelle des jours où il y a risque de dépassement de la contrainte de débit (8,2 et 10 jours) indique un ‘taux de succès’ de 83% dans la gestion du réservoir pour ramener les débits excédentaires sous la valeur de 780 m³/s. En d’autres termes, il a été possible de gérer le système hydrique de la rivière du Lièvre pour ramener le nombre de jours excédentaires de 49,3 à 8,2 en climat actuel et de 54,9 à 10 en climat futur.

5.5 Volume retenu dans le système de la rivière du Lièvre

Les volumes d’eau que le système hydrique de la rivière du Lièvre retient pour atténuer les inondations dans l’archipel de Montréal sont maintenant présentés.

Le concept d’«écart» a été défini dans la section 4.6. On l’a présenté comme une différence entre les débits de sortie du lac des Deux Montagnes sous deux conditions, avec et sans ouvrage de régulation à l’entrée de la rivière des Mille-Îles. Dans l’éventualité où un écart se produit suite à un calcul des soutirages dans les réservoirs Poisson Blanc, Mitchinamecus et Kiamika, le modèle d’optimisation recalcule de nouveaux débits à soutirer en considérant que le débit maximal à soutirer du réservoir Poisson Blanc est égal au soutirage préalablement calculé auquel on soustrait un pourcentage de l’écart, le pourcentage étant défini a priori. Le bilan hydrique au lac des Deux Montagnes est ensuite recalculé.

La figure 44 présente un exemple de soutirages calculés au réservoir Poisson Blanc quand une correction sur les débits à soutirer est effectuée pour limiter les risques d’inondation dans l’archipel de Montréal. La ligne rouge montre le débit véritablement soutiré et la ligne bleue représente le débit soutiré avant la correction. Le débit soutiré après correction est toujours inférieur à celui produit lors de la première optimisation. La différence entre les soutirages avant et après la correction correspond au volume retenu dans le système hydrique de la rivière du Lièvre. La répartition de ce volume entre les trois réservoirs dépendra des soutirages calculés de chacun des réservoirs tels qu’établi par l’optimisateur.

Le tableau 6 montre le volume d’eau retenu dans le système du Lièvre par année et par membre du MRCC pendant les 10 ans de simulation et le volume d’eau moyen annuel en période de référence et future. Les valeurs en bleu correspondent aux années où il n’y a aucun risque de dépassement de la contrainte de débit sur la rivière des Mille-Îles. On remarquera que les volumes retenus dans le système de la Lièvre sont faibles. Par ailleurs, les années où volumes retenus sont particulièrement élevés, par exemple l’année 6 en climats actuel et futur, coïncident avec celles où les dépassements dans la rivière des Mille-Îles seraient les plus fréquents en absence de contrôles sur les débits. On note aussi que les volumes retenus dans le système de la Lièvre augmentent en climat futur, avec une moyenne annuelle de 97,6 hm³, comparativement à 89,6 hm³ en période de référence. Il

serait opportun de reprendre les simulations, cette fois ci avec une période plus grande que 10 années, pour tirer des conclusions plus définitives sur les tendances observées. On note que les volumes retenus en mode 'historique' sont considérablement plus élevés que ceux calculés à partir des projections du MRCC. Un examen minutieux de l'effet de la correction de biais des sorties du MRCC sur les régimes hydrologiques simulés est recommandé.

Enfin, on notera que les volumes annuels d'eau retenus dans le système de la Lièvre sont du même ordre de grandeur que ceux retenus dans le lac des Deux Montagnes liés à la coupure de débit à 780 m³/s dans la rivière des Mille-Îles (138 et 189 hm³ en climat actuel et futur, voir section 4.4). Ces valeurs témoignent de l'importance de la gestion du système pour le contrôle des inondations dans l'archipel de Montréal.

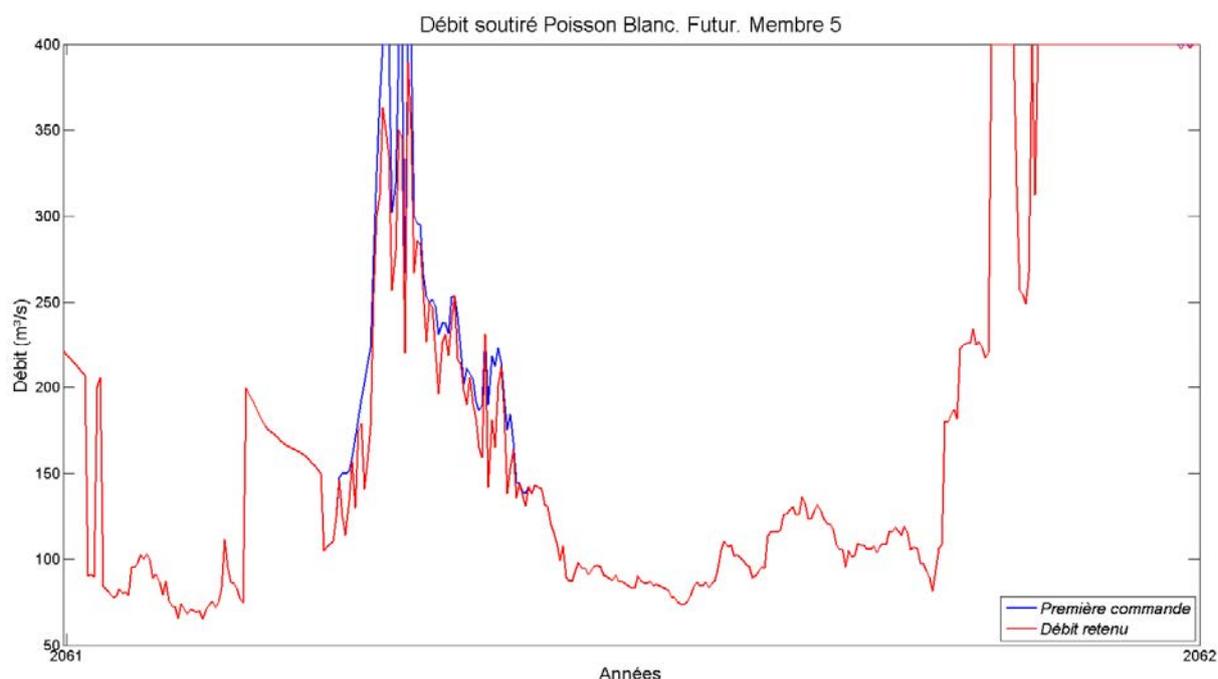


Figure 44. Exemple de soutirages calculés par l'optimisateur avant et après correction pour le contrôle des crues à l'archipel de Montréal

Tableau 6. Volumes d'eau retenu dans le système de la rivière du Lièvre.

	Membre	Années										Total	Moyenne annuelle	Écart Type	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10				
Volume d'eau retenu dans le système du Lièvre (hm ³)	Référence (1990-1999)	1	83	195	52	93	8	209	63	41	195	27	967	97	75
		2	143	105	127	24	240	190	19	55	60	87	1050	105	72
		3	49	54	232	69	69	73	167	3	173	56	946	95	71
		4	13	79	50	45	118	133	193	113	14	16	774	77	61
		5	54	51	111	139	89	104	32	43	95	17	735	74	40
	Futur (2059-2068)	1	146	46	170	127	331	132	40	119	139	35	1285	128	86
		2	125	29	77	44	145	197	138	3	1	24	784	78	69
		3	162	76	54	88	30	110	19	133	35	110	817	82	48
		4	104	95	36	15	163	132	166	265	159	15	1149	115	79
		5	25	191	126	60	39	146	47	84	122	13	853	85	59
	Historique (1990-1999)		155	330	210	167	178	67	444	498	145	27	2219	222	154
	Capacité de retenue à Poisson Blanc						910		hm ³						

5.6 Stratégies d'adaptation

Le simulateur «Horizon roulant» développé dans le cadre de ce projet possède la flexibilité voulue pour investiguer diverses stratégies d'adaptation destinées à améliorer le rendement, la fiabilité et la résilience des réservoirs du système de la rivière du Lièvre face aux changements climatiques. Le cœur du simulateur, soit l'optimisateur 'pps', permet notamment de modifier les contraintes locales de gestion sur les niveaux et débits cibles.

Les exemples présentés ici ont pour objectif de montrer la flexibilité et la robustesse de l'outil de gestion. Ils n'ont pas pour but de d'investiguer en détail les stratégies de gestion les plus prometteuses pour le système de la rivière du Lièvre, bien que ces exemples constituent des stratégies potentielles. Notons qu'une telle étude est présentement en cours dans le cadre d'un projet de maîtrise à l'université de Sherbrooke et sera terminée au printemps 2013. Les résultats de ce travail seront transmis au CEHQ, à la CPRRO et au consortium Ouranos, partenaires du présent projet.

Un premier exemple de stratégie d'adaptation présenté dans cette section consiste à étudier l'effet d'une augmentation du pourcentage de l'écart des débits au lac des Deux Montagnes (voir la section 4.6) sur l'atténuation de la crue dans l'archipel de Montréal et sur la capacité du système de la Lièvre à retenir les volumes correspondants. Un second exemple vise une modification des contraintes de niveau relatives à la réserve de crue et à l'approvisionnement en eau dans le réservoir Poisson Blanc.

5.6.1 Simulation avec 50% et 100% de l'écart

Les figures 45 à 48 montrent les niveaux moyens à Poisson Blanc et les niveaux minimum et maximum pendant les 10 années de simulation de la période de référence et de la période future en retenant 50% et 100 % de l'écart entre les débits sortant du lac des Deux Montagnes avec et sans contrôle à la rivière des Mille-Îles. Les quatre figures montrent que les niveaux moyens se trouvent à l'intérieur des contraintes de niveau supérieur et inférieur, cependant les niveaux maximums dépassent la contrainte supérieure de niveau.

Tel que prévu, on peut observer que le dépassement des contraintes sur les niveaux supérieurs augmente à mesure que le % de l'écart retenu dans le système de la rivière du Lièvre augmente. En d'autres termes, on augmente la vulnérabilité du réservoir avec une augmentation du volume stocké pour soulager les risques d'inondation dans l'archipel de Montréal. La situation est particulièrement préoccupante en climat futur, alors que le niveau du réservoir dépasse le dessus des poutrelles du barrage du Poisson Blanc pour chacun des 5 membres des projections MRCC utilisées. Il faut cependant souligner que cette performance pourra être améliorée en élargissant l'enveloppe des prévisions hydrologiques d'ensemble utilisées dans l'étude. Malgré tout, les premières simulations suggèrent fortement qu'il sera difficile de solliciter davantage le système de la Lièvre pour soulager les crues dans l'archipel de Montréal.

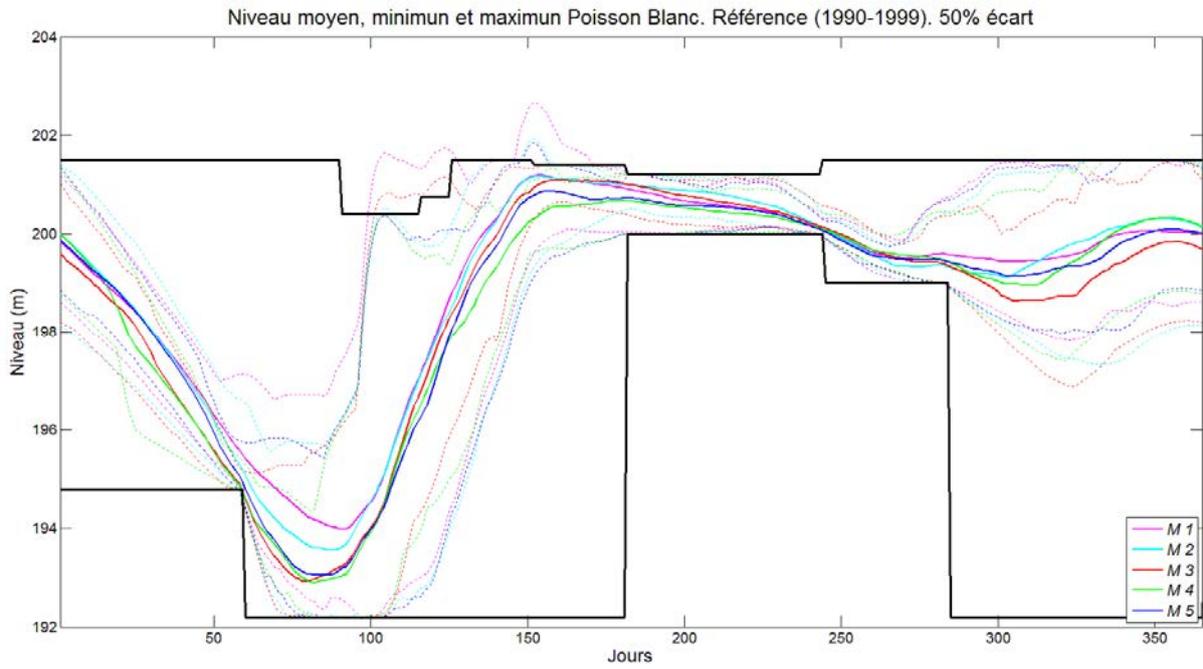


Figure 45. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au réservoir Poisson Blanc en climat actuel (1990-1999), 50% de l'écart retenu

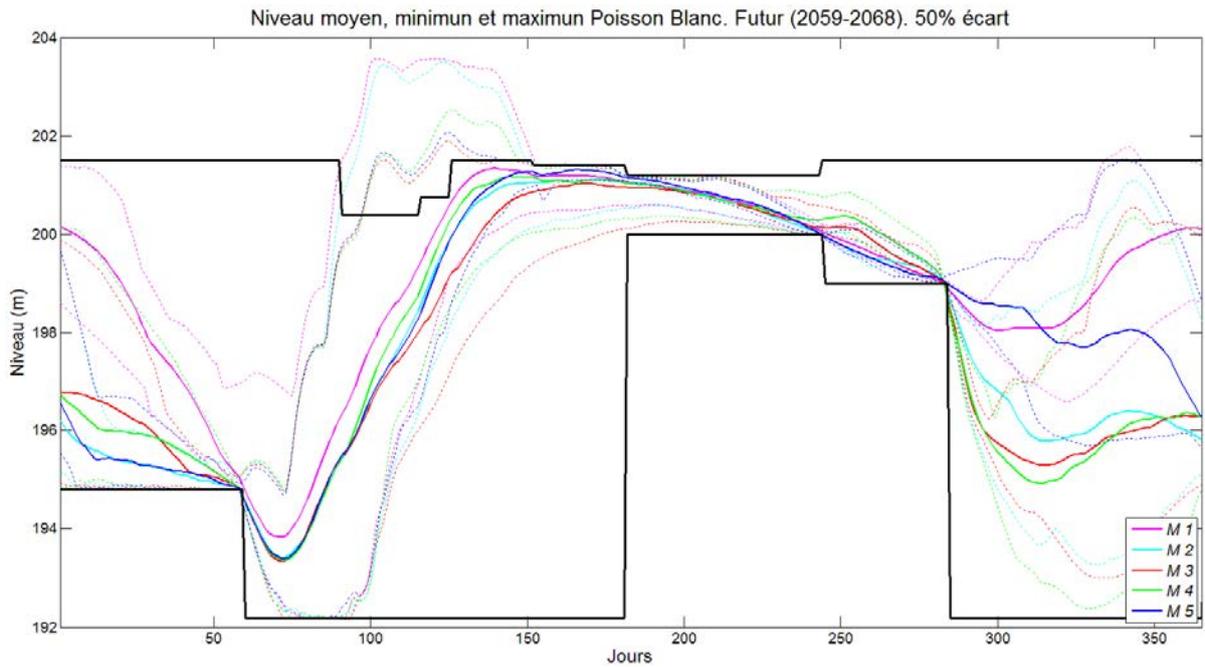


Figure 46. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au réservoir Poisson Blanc en climat futur (2059-2068), 50% de l'écart retenu

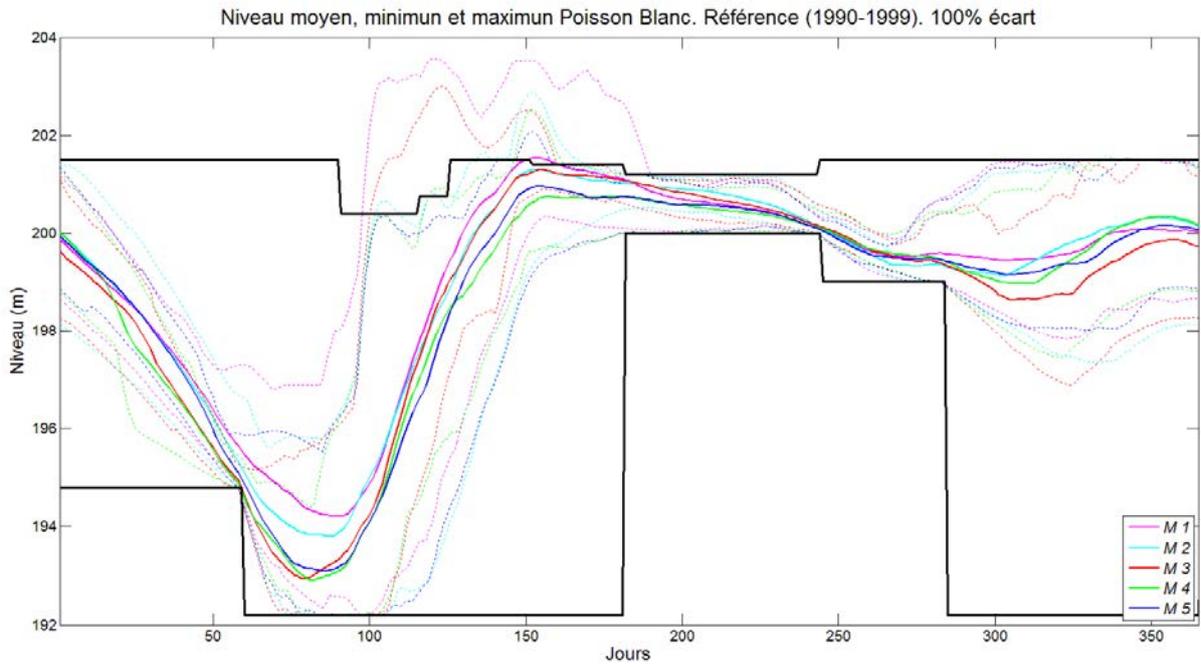


Figure 47. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au réservoir Poisson Blanc en climat actuel (1990-1999), 100% de l'écart retenu

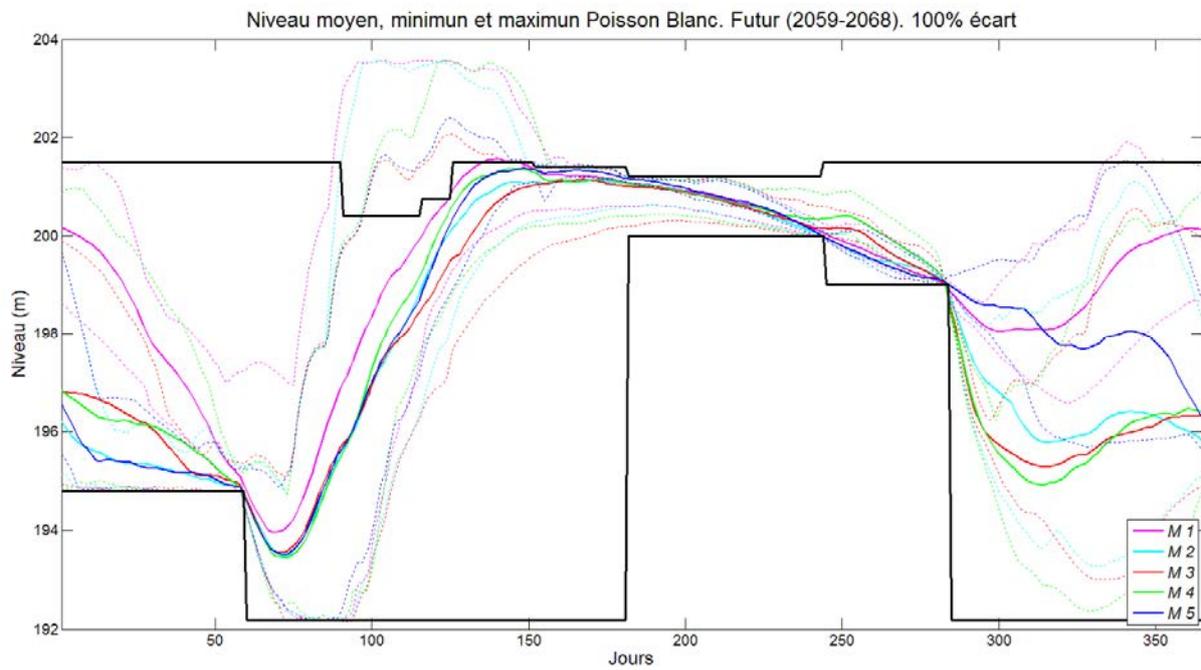


Figure 48. Niveaux journaliers moyen, maximum et minimum au réservoir Poisson Blanc en climat futur (2059-2068), 100% de l'écart retenu

Le tableau 7 compare les simulations à 30%, 50% et 100% d'écart en relation avec le nombre de jours où il y a risque de dépassement du débit de 780 m³/s en la rivière des Mille-Îles et les volumes d'eau engendrés par ces dépassement. On note que le nombre de jours avec risque de dépassement est très similaire pour les trois simulations. Cependant les volumes engendrés par les dépassements montrent une diminution au fur et à mesure que le pourcentage d'écart utilisé augmente. C'est un résultat attendu puisque davantage d'eau est stockée dans le système de la rivière du Lièvre avec une augmentation du pourcentage de l'écart.

Le tableau 8 présente les volumes retenus dans le système hydrique de la rivière du Lièvre en fonction de l'augmentation du pourcentage d'écart. Tel que prévu, on observe une augmentation du volume retenu. On note que l'augmentation du volume stocké dans le système de la Lièvre est beaucoup plus grande que la diminution correspondante des volumes retenus dans le lac des Deux Montagnes, voir le tableau 7. Cette situation confirme que la capacité du système à réduire les risques d'inondations autour du lac des Deux Montagnes demeure limitée. En d'autres termes, la restriction du débit à l'entrée de la rivière des Mille-Îles ne pourra pas être totalement compensée par le stockage dans le système de la rivière du Lièvre et une hausse des niveaux du lac des Deux Montagnes est inévitable. La situation sera accentuée dans un climat futur.

5.6.2 Modification des contraintes de niveau du réservoir Poisson Blanc

Les figures 49 et 50 présentent les courbes de niveau du réservoir Poisson Blanc lorsque la contrainte de niveau de 194,50m sur l'approvisionnement en eau (contrainte du CEHQ) a été étendue du mois de janvier jusqu'à la fin du mois de juin et où la contrainte imposée pour créer la réserve de crue a été enlevée.

On note les observations suivantes. D'une part, l'enlèvement de la contrainte sur la réserve de crue a apparemment peu changé la gestion du réservoir, comparer les figures 49 et 50 avec les figures 25 et 26. Il appert que l'outil de gestion, couplé avec des prévisions hydrologiques d'ensemble, permet de gérer efficacement le système de la Lièvre par une anticipation des apports hydrologiques, créant de ce fait une réserve de crue sans avoir à recourir à l'imposition de contraintes de niveaux particulières. D'autre part, l'imposition de la contrainte de niveau d'approvisionnement en eau sur une plus grande plage de temps a eu comme effet bénéfique de causer une baisse de niveau du réservoir plus graduelle durant les mois d'hiver, en particulier dans un climat futur. Par contre cette même contrainte a entraîné un certain rehaussement du niveau au-delà du seuil maximal d'exploitation tôt en été.

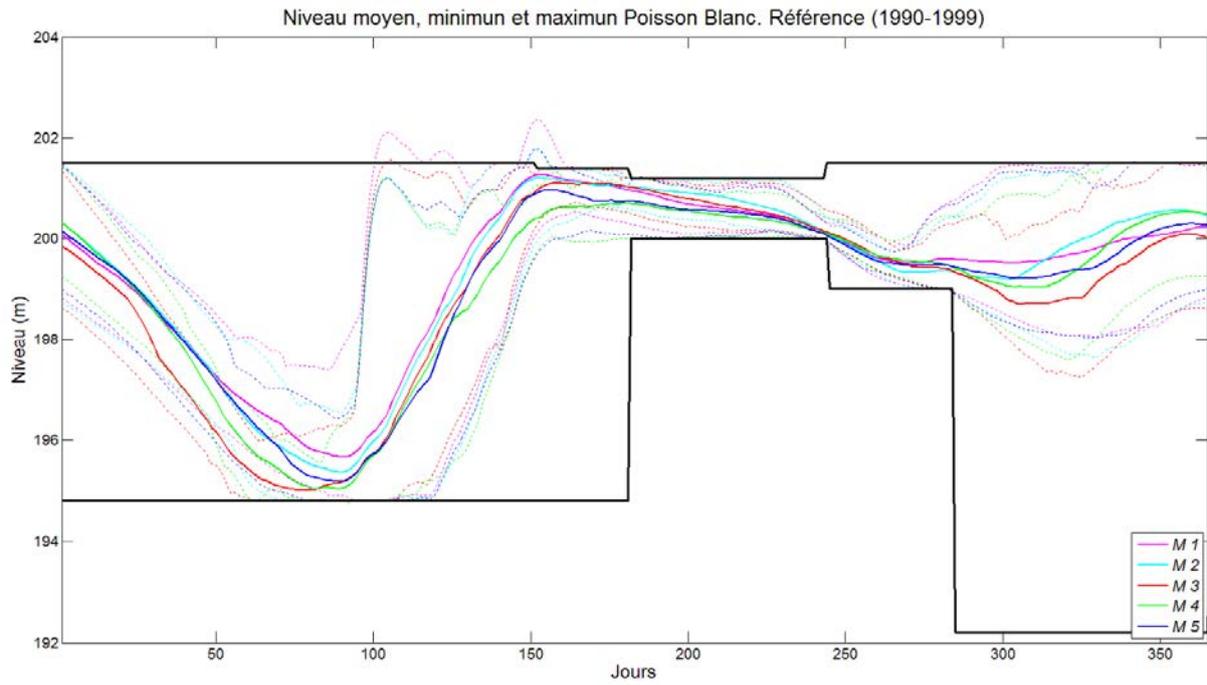


Figure 49. Niveau moyen au réservoir Poisson Blanc avec modifications des contraintes de niveau en climat actuel

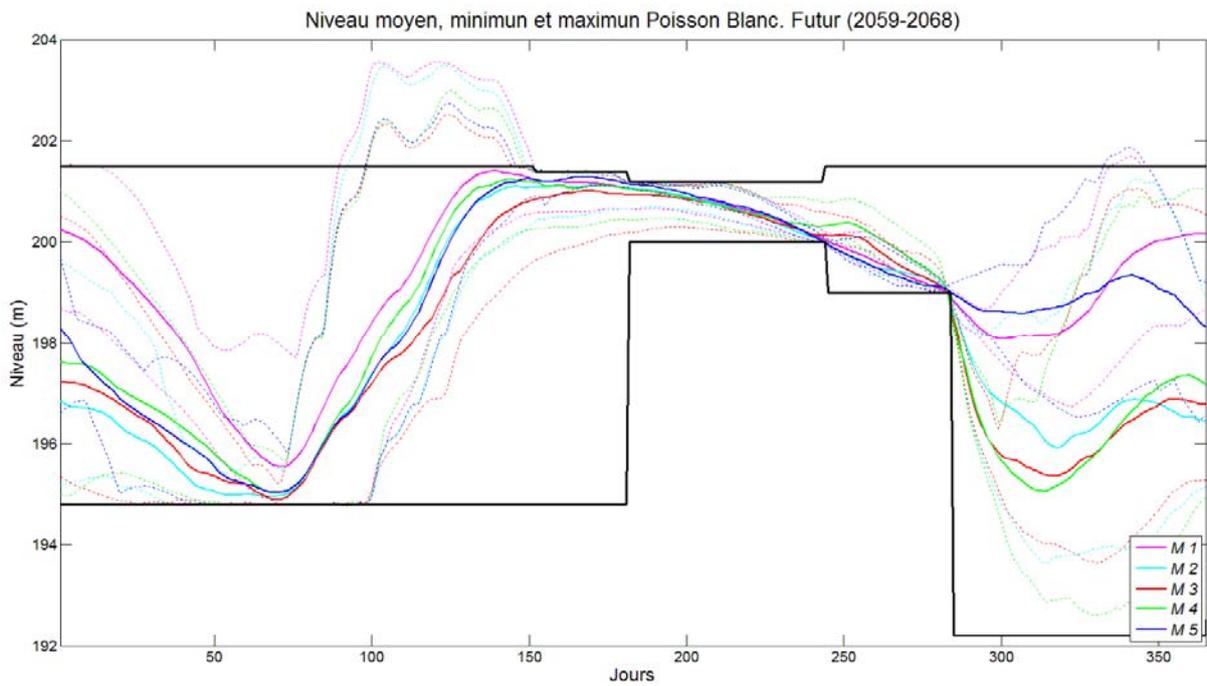


Figure 50. Niveau moyen au réservoir Poisson Blanc avec modifications des contraintes de niveau en climat futur

Tableau 7. Contrainte de débits de la rivière des Mille-Îles. Jours et volumes de dépassement. 30%, 50% et 100% de l'écart

		ÉCART 30%					ÉCART 50%				ÉCART 100%			
		Membre	Total	Moyenne annuelle	Écart Type	Années sans dépassement	Total	Moyenne annuelle	Écart Type	Années sans dépassement	Total	Moyenne annuelle	Écart Type	Années sans dépassement
Quantité de jours où il y a risque de dépassement du débit 780 m ³ /s sur la rivière des Mille-Îles.	Référence (1990-1999)	1	91	9	11.4	3	89.0	8.9	11.2	3	86.0	8.6	11.0	3
		2	101	10	12.9	3	100.0	10.0	12.9	3	100.0	10.0	12.6	3
		3	92	9	11.4	2	91.0	9.1	11.8	2	87.0	8.7	11.5	3
		4	64	6	8.1	4	63.0	6.3	8.1	4	62.0	6.2	8.0	4
		5	63	6	6.3	3	61.0	6.1	6.0	3	60.0	6.0	6.2	3
	Futur (2059-2068)	1	164	16	15.6	3	162.0	16.2	15.6	3	159.0	15.9	15.6	3
		2	83	8	10.7	4	82.0	8.2	10.7	4	87.0	8.7	11.3	4
		3	69	7	9.9	4	68.0	6.8	9.5	5	65.0	6.5	9.2	5
		4	120	12	12.0	3	120.0	12.0	11.8	3	115.0	11.5	11.8	3
		5	64	6	7.5	3	63.0	6.3	7.3	3	62.0	6.2	7.1	3
Volume d'eau engendré par débit supérieur à 780 m ³ /s sur la rivière des Mille-Îles (Volume retenu au lac Deux-Montagnes) (hm ³)	Référence (1990-1999)	1	1469.6	147	247.1		1438.3	143.8	241.1		1356.5	135.6	228.8	
		2	1852.6	185	284.0		1825.5	182.5	281.2		1756.1	175.6	274.9	
		3	1349.5	135	243.5		1322.5	132.2	239.4		1264.8	126.5	230.6	
		4	1491.2	149	234.7		1468.6	146.9	231.4		1418.1	141.8	226.0	
		5	733.5	73	105.4		709.2	70.9	103.1		673.8	67.4	101.4	
	Futur (2059-2068)	1	3522.1	352	478.8		3458.1	345.8	469.1		3294.0	329.4	448.0	
		2	1981.9	198	283.3		1959.1	195.9	280.5		1872.4	187.2	268.2	
		3	713.4	71	119.7		705.5	70.6	119.1		661.7	66.2	114.4	
		4	2319.6	232	264.4		2288.4	228.8	263.2		2202.8	220.3	261.9	
		5	936.4	94	152.0		916.8	91.7	149.1		882.2	88.2	147.4	
Capacité de retenue à Poisson Blanc						910	hm ³							

Tableau 8. Volume d'eau retenu dans le système hydrique de la rivière du Lièvre, 30%, 50% et 100% de l'écart

		ÉCART 30%			ÉCART 50%			ÉCART 100%			
		Membre	Total	Moyenne annuelle	Écart Type	Total	Moyenne annuelle	Écart Type	Total	Moyenne annuelle	Écart Type
Volume d'eau retenu dans le système du Lièvre (hm ³)	Référence (1990-1999)	1	967	97	75	1571	157	126	3252	325	244
		2	1050	105	72	1781	178	116	3053	305	197
		3	946	95	71	1562	156	122	2949	295	213
		4	774	77	61	1187	119	94	2334	233	179
		5	735	74	40	1242	124	72	2199	220	124
	Futur (2059-2068)	1	1285	128	86	2136	214	142	4275	428	273
		2	784	78	69	1219	122	112	2488	249	232
		3	817	82	48	1379	138	81	2770	277	167
		4	1149	115	79	1866	187	128	3633	363	254
		5	853	85	59	1365	136	96	2666	267	167
Capacité de retenue à Poisson Blanc						910	hm ³				

6 Conclusion et recommandations

6.1 Conclusion

Un outil d'aide à la décision a été développé pour effectuer la gestion du système hydrique de la rivière du Lièvre. Cet outil permet de modifier localement les différentes contraintes sur les niveaux et soutirages des réservoirs du système hydrique et sur les débits cible pour satisfaire la production hydroélectrique dans le bassin versant. De plus, le système a été conçu pour gérer le système pour aider au contrôle des inondations dans l'archipel de Montréal.

Le cœur de l'outil de gestion est un modèle d'optimisation basé sur l'approche de programmation non linéaire avec recours. Cette approche se prête bien à l'utilisation de prévisions hydrologiques d'ensemble pour gérer des systèmes hydriques. Aussi, cette approche ne souffre pas du problème de la 'malédiction de la dimension', que l'on retrouve avec la programmation dynamique stochastique. Elle est donc appropriée pour simuler des systèmes de gestion comportant plusieurs réservoirs et pourrait éventuellement être implantée pour l'ensemble du système hydrique de la rivière des Outaouais.

Outre le modèle d'optimisation, l'outil de gestion incorpore un réseau de neurones pour simuler le comportement de l'ensemble des réservoirs de la rivière des Outaouais en amont de la rivière du Lièvre ainsi que modèle calculant le bilan hydrologique de la partie nord de l'archipel de Montréal.

L'outil de gestion a été utilisé pour simuler la gestion des réservoirs du système hydrique de la rivière du Lièvre conditions actuelle et projetée du climat. Des prévisions hydrologiques d'ensemble ont été produites à partir du modèle hydrologique Hydrotel alimenté par des séries de température et de précipitation journalières produites par le Modèle régional canadien du climat. L'horizon futur étudié couvre la période de 2041 à 2070. La période de référence couvre les années 1961-2000. Des simulations couvrant une période de 10 années à l'intérieur des périodes de référence et future ont été réalisées.

De cette analyse, il ressort que les apports naturels dans le bassin versant de la rivière du Lièvre se manifesteront par une crue printanière plus hâtive et comparable en magnitude à la crue observée en période de référence. On note aussi une augmentation du volume annuel d'écoulement et des débits automnaux plus importants dans le futur.

Il ressort également que les réservoirs Michinamecus et Kiamika, situés en tête du système hydrique de la rivière du Lièvre, possèdent une marge de manœuvre adéquate pour gérer les

inondations dans le bassin versant de la Lièvre et pour aider à la gestion des inondations dans l'archipel de Montréal. Par contre, une gestion plus serrée du réservoir Poisson Blanc doit être effectuée, les contraintes de niveau étant atteintes en climat actuel et même dépassées en climat futur. En particulier, des dépassements de niveau significatifs, largement supérieurs au niveau maximal d'exploitation, ont été simulés pour une année (sr 10) et pour les cinq projections (membres) climatiques du MRCC utilisées pour simuler le régime hydrologique. Par contre, la raison de ces dépassements pourrait être en bonne partie liée au fait que le scénario hydrologique de l'année fautive sort de la plage de prévisions hydrologiques d'ensemble. Une plage de prévisions d'ensemble plus large aurait sans doute permis d'atténuer le dépassement rencontré.

Il a été montré que l'outil d'aide à la décision permet de produire des soutirages dans le bassin de la Lièvre qui aideront au contrôle des inondations dans l'archipel de Montréal. Les simulations effectuées ont permis de réduire de manière significative le nombre de jours où les débits à l'entrée de la rivière des Mille-Îles excèderaient le seuil de 780 m³/s en absence d'ouvrage de contrôle. Les simulations ont également montré que le risque de dépassements du seuil, de même que le volume d'eau accumulé dans le Lac des Deux Montagnes consécutif au contrôle des débits à l'entrée de la Rivière des Mille-Îles augmenteraient en climat futur. Enfin, il a été montré que les volumes d'eau retenus dans le système de la rivière du Lièvre pour le contrôle des inondations dans l'archipel de Montréal étaient d'un ordre de grandeur comparable avec les volumes retenus dans le Lac des Deux Montagnes et que ces volumes augmenteraient en climat futur.

L'outil de gestion a été employé pour analyser quelques stratégies d'adaptation, le but étant ici de confirmer la flexibilité et la robustesse de l'outil développé, plutôt que de faire une analyse en profondeur de stratégies prometteuses. Cette tâche pourra être dévolue aux futurs usagers de l'outil.

Les stratégies investiguées incluaient l'augmentation du volume retenu dans le système de la Lièvre en vue du contrôle des inondations dans l'archipel de Montréal, ainsi que des modifications aux contraintes de niveau dans le réservoir du Poisson Blanc pour évaluer sa marge de manœuvre pour le contrôle des crues dans le bassin de la Lièvre. Une analyse préliminaire indique qu'il pourrait être difficile d'augmenter le volume retenu dans le système hydrique de la Lièvre sans causer des inondations supplémentaires au réservoir Poisson Blanc. Par contre, ces résultats doivent être interprétés avec prudence dans le contexte où les prévisions hydrologiques d'ensemble couvrent une plage de régime hydrologique limitée. L'abolition des contraintes de niveau dans le réservoir Poisson Blanc relatives à la création d'une réserve de crues n'a pas eu d'effets marqués sur les soutirages calculés. Il appert que le modèle d'optimisation permet de créer cette réserve par une gestion optimale des soutirages.

6.2 Recommandations

L'outil d'aide à la décision développé a montré qu'il peut aider à la gestion du système hydrique de la rivière du Lièvre pour le contrôle des inondations dans le bassin versant et en aval de celui-ci. Toutefois, certains résultats obtenus invitent à poursuivre l'évaluation et le développement de l'outil. En l'occurrence, il est recommandé de :

- 1- Reprendre les simulations, cette fois-ci en utilisant un plus grand nombre de membres de la prévision hydrologique d'ensemble. Les ensembles utilisés ne comportaient que 15 membres. L'élargissement à 25 – 30 membres permettrait de couvrir une plus grande plage de la variabilité hydrologique – un aspect important compte tenu de l'augmentation appréhendée de la variabilité climatique dans le futur. Il serait alors possible d'établir plus clairement si les dépassements de niveaux obtenus au réservoir du Poisson Blanc sont effectivement causés par les prévisions d'ensemble comme tel, ou plutôt le reflet d'une réelle vulnérabilité du réservoir face à la variabilité et au changement climatique;
- 2- Utiliser l'outil de gestion pour analyser en détail la vulnérabilité véritable du système hydrique de la rivière du Lièvre face aux changements climatiques et pour proposer des stratégies d'adaptation les plus prometteuses à cet égard. L'outil, qui a été développé dans le contexte de contrôle des inondations, pourrait être facilement adapté pour analyser les risques d'étiages dans l'archipel de Montréal et pour étudier les options de soutien à l'étiage par des soutirages accrus des réservoirs de la Lièvre;
- 3- Modifier l'outil de gestion actuel, qui comporte 3 réservoirs, en y incluant de manière explicite un quatrième réservoir représentant le lac des Deux Montagnes, ce qui permettrait une gestion plus intégrée et proactive des inondations dans l'archipel de Montréal. Il serait alors possible de produire des soutirages des réservoirs du système hydrique de la Lièvre plusieurs jours avant même que les débits à l'entrée de la rivière des Mille-Îles n'atteignent le seuil d'inondation. Une version bêta de cet outil a été développée et est présentement en phase d'évaluation et de rodage à l'Université de Sherbrooke.
- 4- Inclure progressivement et de manière explicite d'autres systèmes hydriques du bassin versant de la rivière des Outaouais. L'approche d'optimisation retenue permet cette expansion. Aussi, l'inclusion d'autres systèmes permettrait de réduire progressivement l'influence du réseau de neurones utilisé présentement pour simuler la gestion des réservoirs de l'Outaouais. Or, une limitation du réseau de neurones est que les règles de gestion des réservoirs sont fixes, une condition peu probable dans un climat futur. Outre une plus grande flexibilité dans l'établissement des soutirages optimaux, un outil élargi augmenterait la fiabilité des résultats obtenus, particulièrement pour des analyses sous des conditions de changements climatiques.

7 Références

- Andreu, J., J. Capilla, et E. Sanchis. 1996. AQUATOOL, a generalised decision-support system for water-resources planning and operational management, *Journal of Hydrology*, 177(3-4): 269-291.
- Appenzeller, C., Stockler, T.F and Schmittner, A. 2000. Natural climate variability and climate change in the North-Atlantic European region: Chance for surprise? *Integrated Assessment*, 1: 301-306.
- Archibald, T. W., K. I. M. McKinnon, et L. C. Thomas 1997. An aggregate stochastic dynamic programming model of multiple reservoir systems, *Water Resources Research*, vol. 33,(2): 333-340.
- Bertsekas, D. P. 2007. *Dynamic Programming and Optimal Control*: Athena Scientific.
- Brige, J. R. 1985. Decomposition and partitioning methods for multistage stochastic linear programs, *Operation Research*, vol. 33, no. 5, pp. 989-1007.
- Castellotti, A. a. G., S. and Restelli, M. and Soncini-Sessa R. 2010. Tree-Based reinforcement learning for optimal water reservoir operation, *Water Resources Research*, vol. wr008898.
- Caya, D., et R. Laprise. 1999. A semi-implicit semi-Lagrangian regional climate model: The Canadian RCM. *Mon. Wea. Rev.* 127 (3), 341-362.
- Chandramouli, V. et H. Raman. 2001. Multireservoir Modeling with Dynamic Programming and Neural Networks, *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 127, no. 2, pp. 89-98.
- Commission de planification et de régularisation de la rivière des Outaouais. 1984. Gestion des eaux de la rivière des Outaouais.
- Delft Hydraulics. 2006. River Basin Planning and Management Simulation Program, Proceedings of the iEMSs Third Biennial Meeting: "Summit on Environmental Modelling and Software", Voinov, A., A.J. Jakeman and A.E. Rizzoli (eds), International Environmental Modelling and Software Society, Burlington, Vermont, USA.
- Faber, B. A. et J. R. Stedinger. 2001. Reservoir optimization using sampling SDP with ensemble streamflow prediction (ESP) forecasts, *J. Hydrol.*, vol. 249, no. 4, pp. 113-133.
- Fortin J.P., Turcotte R., Massicotte S., Moussa R. et Fitzback J. 2001. 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.
- HPS Inc, 2001. Tutorial and technical documentation STELLA_ II. HPS Inc, Hanover, NH.

- Huaranga, U., Leconte, R. 2012. Changements climatiques sur le système hydrique de la Rivière des Outaouais : débit de la rivière des Prairies et de la rivière des Mille-Îles. Département de génie civil, Faculté de génie, Université de Sherbrooke., 36 p.
- Hydrologics Inc. 2009. User Manual for OASIS with OCL, moel version 3.10.8, 339 p.
- Jacobs, J., G. Freeman, J. Grygier, D. Morton, G. Schultz, K. Staschus, et J. Stedinger. 1985. in vol., Vladimirou et al. ed.: Baltzer Science.
- Karamouz, M. et H. Houck. 1982. Annual and monthly reservoir operating rules, *Water Resources Research*, vol. 18, no. 5, pp. 1337-1344.
- Kellman, J., R. J. Stedinger, L. A. Cooper, E. Hsu, et S. Q. Tuan. 1990. Sampling stochastic dynamique programming applied to reservoir operation, *Water Resources Research*, vol. 26, no. 3, pp. 447-454.
- Klipsch, J.D., Hurst, M.B. 2007. HEC-ResSim Reservoir System Simulation User's manual Version 3.0. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center.
- Kouwen, N. 1988. WATFLOOD: a Micro-computer based flood forecasting system based on real-time weather radar. *Revue canadienne des ressources hydriques*, 13(1): 62-77.
- Labadie, J. W. 2004. Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review, *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 130, no. 2, pp. 93-111.
- Labadie J., et Larson R. 2007. MODSIM 8.1: River Basin Management Decision Support System. User Manual and Documentation.
- Lee, J.-H. et J. W. Labadie. 2007. Stochastic optimization of multireservoir systems via reinforcement learning," *Water Resources Research*, no. W11408.
- Minville, M., Brissette, F., Krau, S. and Leconte, R. 2009. Adaptation to climate change in the management of a Canadian water-resources system exploited for hydropower. *Water Res. Mgt*, 23(14): 2965-2986.
- Minville, M., Krau, S., Brissette, F. and Leconte, R. 2010. Behaviour and Performance of a Water Resources System in Québec (Canada) Under Adapted Operating Policies in a Climate Change Context, *Water Resources Management*, 4(7), 1333-1352.
- Momtahn S. et A. B. Darlane. 2007. Direct search approaches using genetic algorithms for optimization of water reservoir operating policies, *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 133, no. 3, pp. 202-209.
- Murray D. M. et S. J. Yakowitz. 1979. Constrained differential dynamic programming and its application to multireservoir control, *Water Resources Research*, vol. 15, no. 5, pp. 1017-1027.

- Pereira, M. 1989. Optimal stochastic operations of a large hydroelectric system," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 11, pp. 161-169.
- Saad, M. et A. Turgeon. 1992. Application of principal component analysis to long-term reservoir management, *Water Resources Research*, vol. 24, no. 7, pp. 907-912.
- Saad, M., A. Turgeon, P. Bigras, et R. Duquette. 1994. Learning disaggregation technique for operation of long-term hydroelectric power systems, *Water resources research*, vol. 30, no. 11, pp. 3195-3202.
- SEI Stockholm Environment Institute. 2005. WEAP: Water Evaluation And Planning System, User Guide, Somerville, MA.
- Seifi A. et K. W. Hipel. 2001. Interior-point method for reservoir operation with stochastic inflows, *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 127, no. 1, pp. 48-57.
- Schmidli, J., C. Frei, and P. L. Vidale. 2006. Downscaling from GCM precipitation: A benchmark for dynamical and statistical downscaling methods, *Int. J. Climatol.* 26: 679-689.
- Shourian M., Mousavi S.J., Tahershamsi A. 2008. Basin-wide water resources planning by integrating PSO Algorithm and MODSIM. *Water Resources Management*, 22:1347-1366.
- Turgeon, A. 1981. A decomposition method for long-term scheduling of reservoirs in series, *Water Resources Research*, vol. 17, no. 6, pp. 1565-1570.
- Turgeon, A. 2006. Solving daily reservoir management problems with dynamic programming, *Les Cahiers du GERAD*, no. G-2006-22.
- Turgeon, A. et R. Charbonneau. 1998. An aggregation-disaggregation approach to long-term reservoir management, *Water Resources Research*, vol. 34, no. 12, pp. 3585-3594.
- Vicuna, S. 2007. Adaptation to Climate Change Impacts on California Water Resources, PhD Dissertation, Univ. of California at Berkeley, Berkeley.
- Zagona, E.A., T. J. Fulp, R.Shane, T.Magee, et H. M. Goranflo. 2001. RiverWare: A Generalized Tool for Complex Reservoir Systems Modeling, *Journal of the American Water Resources Association*, AWRA 37(4):913-929.

Annexe

Manuel d'utilisation du logiciel d'aide à la décision pour la gestion de la rivière du Lièvre

Manuel d'utilisation du logiciel d'aide à décision pour la gestion de la Lièvre

1. Présentation générale de l'outil d'aide à la décision

1. Approche mathématique

L'outil d'aide à la décision est dédié à la gestion journalière de la rivière la Lièvre. Il sert, au début de chaque journée, à décider des soutirages à effectuer aux réservoirs Kiamika, Mitchinamecus et Poisson Blanc durant la journée. Son objectif est de proposer des soutirages pour satisfaire, le mieux possible, aux contraintes d'exploitations à court et moyen terme, en positionnant le mieux possible les niveaux des réservoirs au cours du temps. Pour ce faire, l'outil utilise une prévision des apports sur un horizon de temps donné. Les apports sont supposés connus parfaitement durant la première journée, et représentés par un ensemble de scénarios d'apports disjoints à partir de la seconde journée.

L'exigence d'une gestion journalière, couplée à la complexité du système la Lièvre nous a amené à choisir l'approche par programmation mathématique non linéaire stochastique. Elle est adaptée aux problèmes avec des données qui ne sont pas déterministes (ici l'aléa des apports) mais qui peuvent être décrites par une distribution. Cette approche approxime l'aléa des apports par des scénarios.

Le problème d'optimisation peut alors s'écrire comme un problème d'optimisation avec recours. Il s'agit de trouver la décision (les soutirages aux réservoirs durant la journée courante) avant que l'on connaisse la réalisation de l'aléa (les apports futurs). Il est bien connu que ce problème stochastique peut se formuler comme un problème déterministe équivalent ayant 2 ensembles de contraintes :

- Un ensemble de contraintes qui ne contient que les variables (soutirages et niveaux des réservoirs) de la journée courante
- Pour chaque scénario d'apport, un ensemble de contraintes qui relie les variables des autres journées, les unes aux autres, et avec les variables de la première journée.

La structure des contraintes permet à ce que toute variable associée à une journée donnée et à un scénario d'apports donné puisse agir sur la valeur des soutirages durant la journée courante. En effet, chaque violation d'une contrainte d'exploitation (dépassement de bornes de soutirages ou de niveaux de réservoirs) durant l'horizon d'optimisation induit un coût dans la fonction objectif. L'utilisateur de l'outil peut d'ailleurs prioriser une contrainte plutôt qu'une autre, en augmentant la pénalité relative à sa violation.

Cette approche surclasse l'approche mathématique du modèle déterministe MORRO. Ce dernier ne peut en effet traiter qu'un scénario d'apports futur à la fois en supposant qu'il va se réaliser. Avec une approche déterministe, les valeurs des soutirages aux réservoirs lors de la première journée sont calculées en sous estimant le risque futur de violer telle ou telle contrainte d'exploitation. De plus, un modèle déterministe donne autant de décisions de soutirages aux réservoirs la journée courante qu'il y a de scénarios d'apports. Il est bien connu que prendre la moyenne des décisions (soutirages aux réservoirs durant la première journée) d'un modèle déterministe ne donne pas une solution optimale.

Les équations décrivant le modèle d'optimisation sont présentées dans la page suivante.

$$\text{Max } F_1(S_1, R_1) + \sum_{n=1}^N p_n \sum_{t=2}^T F_t(S_t^n, R_t^n)$$

$$S_2^n - S_1 - AR_1 = Q_1 \quad \forall n = 1 \dots S$$

$$S_{t+1}^n - S_t^n - AR_t^n = Q_t^n \quad \forall t = 2 \dots T, n = 1 \dots N$$

$$l_t \leq R_1 \leq f(S_1, S_2^n)$$

$$l_t \leq R_t^n \leq f(S_t^n, S_{t+1}^n)$$

$$\underline{S}_1 \leq S_1 \leq \bar{S}_1$$

$$\underline{S}_1 \leq S_t^n \leq \bar{S}_1 \quad \forall n = 1 \dots T-1$$

$$\underline{S}_T \leq S_t^n \leq \bar{S}_T$$

S_1, R_1, Q_1 : Vecteur des volumes initiaux des réservoirs, vecteur des soutirages aux réservoirs durant la première journée, vecteur d'apports aux réservoirs durant la première journée.

$\underline{S}_1, \bar{S}_1$: Bornes physiques des réservoirs

S_t^n, R_t^n, Q_t^n : Vecteur de volumes des réservoirs au début du jour t et associé au scénario d'apports n , vecteur des soutirages durant le pas de temps t et associé au scénario d'apports n , vecteur d'apports aux réservoirs durant la journée t et associé au scénario n

A : Matrice de connectivité des réservoirs

p_n : Probabilité d'occurrence du scénario d'apports n

$$F_t(S_t^n, R_t^n) = \alpha(R_t^n - D)^2 + \beta \text{MAX}(0, S_t^n - \bar{v}_t) + \beta \text{MAX}(0, -S_t^n + \underline{v}_t)$$

$f(S_t^n, S_{t+1}^n)$: Fonction non linéaire et non dérivable

D : Vecteur de soutirages cibles

α, β : Paramètres

T : Fin de l'horizon d'optimisation

2. Approche informatique

L'outil d'aide à la décision consiste en un exécutable alimenté par un ensemble de fichiers textes ayant leurs propres formats. L'exécutable fournit ses résultats sous la forme de fichiers textes. La construction et la résolution du modèle mathématique sont effectuées en utilisant les bibliothèques mathématiques IPOPT (<https://projects.coin-or.org/Ipopt/>) et MA57 (<http://www.cse.clrc.ac.uk/nag/hsl/>) qui résolvent des programmes mathématiques non linéaires par la méthode des points intérieurs. Il n'est pas nécessaire d'installer ces bibliothèques puisque le logiciel est fourni sous la forme d'un exécutable (.exe). L'utilisateur du logiciel n'a donc besoin que d'initialiser les fichiers d'entrées, lancer l'exécutable et consulter les fichiers résultats. Le code est en langage C et est structuré pour le système de la Lièvre. L'étendre à plus que 3 réservoirs ou changer sa configuration nécessite un travail de codage. Le temps de résolution du problème d'optimisation est de moins d'une dizaine de secondes sur un processeur de 2 GHz, par conséquent l'adaptation de l'outil à tous les réservoirs de l'Outaouais est pensable dans le contexte d'une gestion journalière.

3. Les 2 modes de fonctionnement de l'outil

Le premier mode de fonctionnement « sans archipel » est dédié à la gestion exclusive des 3 réservoirs de la Lièvre, sans prendre en compte les contraintes de débit associées à la rivière des Milles-îles. L'outil de gestion cherche alors à faire respecter dans le temps les contraintes d'exploitations des 3 réservoirs (Kiamika, Mitchnamecus et Poisson-Blanc) en essayant de satisfaire le mieux possible le débit optimal à la centrale de Brookfield située en aval de Poisson-Blanc.

Le second mode de fonctionnement inclut les contraintes d'exploitations à la rivière des Milles-îles. L'outil va chercher, par une approche itérative, les valeurs de débit de la journée courante à attribuer à la sortie de Poisson Blanc et des 2 autres réservoirs, afin d'engendrer à court et moyen terme le moins de violations de contraintes d'exploitation à 2 montagnes. Pour ce faire, les capacités des 3 réservoirs du système la Lièvre sont utilisées pleinement pour limiter la crue ou l'étiage aux Milles-îles, en les positionnant suffisamment tôt par rapport à des événements futurs probables au lac des 2 montagnes. Ce second mode de fonctionnement nécessite plusieurs résolutions (2 ou 3) du modèle d'optimisation et est donc plus coûteux en temps de calcul que le premier.

2. La structure du modèle d'optimisation

1. Les contraintes de conservation de l'eau dans les réservoirs

Elles forment la structure du modèle d'optimisation. On suppose que pour la première journée de l'horizon, les apports aux 3 réservoirs sont identiques pour tous les scénarios d'apports. De la seconde journée jusque la fin de l'horizon d'optimisation, pour chaque scénario d'apports, un ensemble de contraintes assure d'une journée à l'autre la conservation de l'eau dans les réservoirs. Ces ensembles de contraintes de conservation de l'eau sont liés dans le modèle d'optimisation par leurs conditions initiales, les niveaux des 3 réservoirs au début de la deuxième journée, eux-mêmes liés aux soutirages de la première journée. Cette structure des contraintes de conservation de l'eau impose que, dans le calcul des soutirages de la première journée, toutes les conséquences (violations de contraintes d'exploitation) de ces soutirages sur les variables présentes sur les contraintes de conservation de l'eau du second stade soient prises en compte.

2. Les limites supérieures et inférieures sur les niveaux de réservoirs et les soutirages

Les variables de volumes et de débits sur les contraintes de conservation de l'eau dans les réservoirs ont toutes des bornes souples. C'est-à-dire qu'elles ne génèrent pas de pénalités si leurs valeurs sont entre leurs bornes inférieures et supérieures. Au-delà, elles engendrent un coût dans la fonction objectif, proportionnel (linéaire) à l'écart avec la borne la plus proche. Les facteurs multiplicatifs des variables pour le calcul des coûts sont des données que l'utilisateur peut modifier pour prioriser telles ou telles violations. Les courbes de soutirages maximum versus les niveaux des réservoirs, sont prises en compte dans le modèle d'optimisation. Ces courbes induisent de la non-linéarité dans les contraintes du modèle d'optimisation.

3. Le respect du débit optimal à la centrale hydroélectrique en aval de Poisson Blanc

Les gestionnaires de la rivière La Lièvre essaient de satisfaire le plus possible le débit optimal de la centrale en aval du réservoir Poisson Blanc. Cet élément de gestion est modélisé par une fonction quadratique qui pénalise, dans la fonction objectif, les écarts des soutirages au réservoir Poisson-Blanc relatif à ce débit. Cette pénalisation est suffisamment petite pour ne pas être du même ordre de grandeur que les pénalités sur les violations des contraintes d'exploitation des volumes et des débits. Concernant les soutirages aux réservoirs Kiamika et Mitchinamecus, des

fonctions de pénalités de même type sont utilisées en prenant les écarts aux soutirages milieux des intervalles des soutirages.

4. Fonction objectif

L'objectif du modèle d'optimisation est de minimiser la somme des fonctions de pénalités associées aux journées de l'horizon d'optimisation. Il y a autant de fonctions de pénalités associées à chacune des journées du second stade qu'il y a de scénarios d'apports. Chacune de ces fonctions est pondérée par la probabilité d'occurrence du scénario. Une fonction de pénalité est la somme de la pénalité sur les écarts aux soutirages cibles des 3 réservoirs et des pénalités sur les violations des contraintes d'exploitations sur les niveaux des réservoirs et les soutirages.

3. Les fichiers d'entrées du modèle d'optimisation

1. Le fichier d'initialisation : « entrees.txt »

Ce fichier est le premier lu par le logiciel d'optimisation. C'est le fichier que l'utilisateur du système hydrique initialise, au besoin, avant chaque passe. Il y a plusieurs champs :

1. Les répertoires d'entrée et de sortie dont l'outil a besoin pour initialiser le modèle d'optimisation et écrire ses résultats.
2. La période actuelle est la journée calendaire (1-365), c'est-à-dire le numéro de la journée de l'année associée à la première journée de l'horizon d'optimisation.
3. Le délai (en jours) pour le changement de débit à Poisson-Blanc signifie que l'on demande au modèle de retenir si possible l'eau du système de la Lièvre, un certain nombre de jour avant une éventuelle violation du débit aux Milles-îles, afin par exemple de ne pas trop faire monter le niveau du réservoir à 2 montagnes (dans le cas d'un évènement de crue) et engendrer par la suite davantage de déversement. Le modèle de gestion dans cet exemple fait le compromis entre retenir une quantité suffisante d'eau sur la Lièvre et laisser de la place de stockage afin de pouvoir couper le débit à Poisson-Blanc à l'arrivée de la crue pour limiter les apports au lac de 2 montagnes.
4. Le champ suivant (0) ou (1) demande au modèle d'optimisation de prendre en compte ou pas la contrainte d'exploitation des Mille-Îles pour la gestion de la Lièvre.

5. Le nom du fichier contenant les scénarios prévisionnels (Kiamika, Mitchinamecus, Poisson- Blanc et le réservoir 2 montagnes).
6. Le débit maximum que l'on autorise à la sortie de Poisson-Blanc.
7. Les pénalités aux 3 réservoirs pour des dépassements de bornes de volumes.
8. Les multiplicateurs des pénalités précédentes seulement effectives pour la première journée.

```

# Nombre de réservoirs (ne pas modifier)
3

# Chemin accès fichier données
P:\Donnees\lievre\entree\

# Chemin accès fichier sortie
P:\Donnees\lievre\sortie\

# Période actuelle
100

# Rétention (jours) de l'eau à Poisson blanc avant la crue à # 2
montagnes
7

# (1) tenir compte de 2 montagnes, 0 sinon
0

# Nom fichier ESP
esp\esp1990_100.txt

# Soutirage maximum à Poisson Blanc hormis la période où
# l'on retient l'eau à Poisson Blanc
400

# La de pénalité sur le volume à Kiamika
10

# La pénalité sur le volume à Mitchinamecus
10

# La pénalité sur le volume à Poisson-Blanc
10

# Les coefficients multiplicateur des pénalités pour le
# premier jour
# Kiamika
1

# Mitchi

```

1

```
# Poisson blanc  
1
```

2. Le fichier de configuration du système hydrique : « installations.txt »

C'est le fichier relatif aux caractéristiques physiques du système hydrique. Pour chaque site du système « la Lièvre », on retrouve les champs suivants (exemple Kiamika):

```
#Nom de l'installation :  
Kiamika
```

```
#Capacite du deversoir  
30.0
```

```
#Y a-t-il un reservoir 1=oui, 0=non  
1
```

```
#Capacite du reservoir (hm3) :  
470.00
```

```
# Ne pas modifier  
1.00
```

```
# Ne pas modifier  
0.00
```

```
# Courbe d'emmagasinement  
# Nombre de points de la courbe suivi des paires de points  
#Volume Niveau  
55  
0.00 258.181  
...(53 lignes de même format)  
470.00 271.622
```

```
#Y a-t-il une centrale 1=oui, 0=non  
1
```

```
#Capacité de soutirage maximum  
30
```

```
#Nombre de courbes quadratiques  
1
```

```
#Periodes  
1-365
```

```
#Courbe quadratique (Débit Pénalité) centrée sur le débit #cible  
8  
1.0000 0.04000
```

```

... (6 lignes de même format)
30.0000      0.04000

#Nombre de contraintes de débit (no de jour. Deb Min Deb Max)
365
1      1      30
... (363 lignes de même format)
365  1      30

# Ne pas modifier
0

```

3. Le fichier de configuration du système hydrique: « niveaux_exploitations.txt »

Ce sont les bornes d'exploitations des niveaux des 3 réservoirs. Le format est illustré ci-dessous

1	258.16	258.2	258.24	270.66	269.75	269.7
2	258.16	258.2	258.24	270.66	269.75	269.7
3	258.16	258.2	258.24	270.66	269.75	269.7
4	258.16	258.2	258.24	270.66	269.75	269.7
5	258.16	258.2	258.24	270.66	269.75	269.7
6	258.16	258.2	258.24	270.66	269.75	269.7
7	258.16	258.2	258.24	270.66	269.75	269.7
8	258.16	258.2	258.24	270.66	269.75	269.7
9	258.16	258.2	258.24	270.66	269.75	269.7
...						

Seuls les champs en rouge sont lus par le modèle d'optimisation. Il s'agit du numéro de la journée, de la borne minimum puis maximum des niveaux des réservoirs. Il y a 3 fois 365 lignes dans ce fichier correspondant aux 3 réservoirs Kiamika, Mitchinamecus et Poisson-Blanc.

4. Les fichiers de courbes maximum d'évacuation des réservoirs: « courbes_evac_Kiamika.txt », « courbes_evac_Mitchi.txt », « courbes_evac_Poisson.txt »

Il s'agit de fichiers de même format. La première ligne donne le nombre de lignes dans le fichier. Les autres lignes donnent les paires de niveaux vs déversés maximums. L'exemple ci-dessous donne la première et la dernière paire de points dans le cas de Kiamika

```

481
259  5.7552768
...
271  394.9417812

```

Les fichiers de courbes maximum d'évacuation des réservoirs: « courbes_evac_Kiamika.txt », « courbes_evac_Mitchi.txt », « courbes_evac_Poisson.txt »

5. Le fichier de la courbe de déversé du lac des 2 montagnes « courbes_dever_2montagnes.txt »

C'est un fichier avec 3 champs, construit à partir des caractéristiques des courbes de déversés instantanés des sorties du lac de 2 montagnes. Les 2 premières lignes donnent le nombre de points de discrétisation des niveaux de 2 montagnes utilisés et le nombre de points de discrétisation de débit moyen journalier. Les lignes subséquentes représentent les triplets de points. Le premier champ est le niveau du réservoir, le second champ est l'apport moyen journalier. Le troisième champ donne le débit moyen journalier de sortie du lac des 2 montagnes pour un niveau initial et un débit entrant (débit Outaouais et apport naturels) égaux aux 2 premiers champs. Ces données permettent à l'outil de faire le bilan hydrique au réservoir de 2 montagnes d'un pas de temps à l'autre.

```
41
96
459 500 463.1
...
1146 10000 10504.6
```

6. Les fichiers des courbes de niveaux max et min du lac des 2 montagnes en fonction des apports entrants au lac : « courbes_max_2m.txt » et « courbes_min_2m.txt »

Ces fichiers sont les traductions des contraintes de débits instantanés de la rivière des milles îles en des niveaux journaliers initiaux du réservoir de 2 montagnes, en fonction de valeurs d'apports au réservoir durant la journée. Ainsi, dans le fichier « courbe_max_2m.txt », se trouvent les niveaux maximums que doit avoir le lac des 2 montagnes, pour des valeurs d'apports durant le pas de temps, afin de ne pas violer la contrainte de débit maximum instantané aux milles îles. Le fichier « courbe_min_2m.txt » renferme les données de même type mais associés à la contrainte de débit minimum aux Mille-Îles.

7. Le fichier des niveaux initiaux réservoirs de la Lièvre et de 2 montagnes:« cni.txt »

Les 4 niveaux des réservoirs se succèdent sur les lignes

```
# Niveau Kiamika
264.851434162151180
# Niveau Mitchinamecus
378.101685413584850
# Niveau Poisson-Blanc
191.953142394683080
# Niveau 2 montagnes
763.0178
```

8. Le fichier scénarios d'apports prévisionnels : « nom donné dans le fichier entree.txt »

Dans le cas où l'on choisit de traiter l'archipel (**1** dans le fichier d'entrée), le logiciel lit le fichier des scénarios prévisionnels. Ce fichier comprend dans ce cas 4 colonnes (seulement 3 si l'archipel n'est pas traité, i.e (0) dans le champ du fichier d'entrée) correspondant respectivement aux réservoirs Kiamika, Mitchinamecus, Poisson-Blanc et 2 montagnes. Les 3 premiers champs du fichier renseignent le logiciel sur la structure des apports prévisionnels (nombre de sites, nombre de scénarios et longueur des scénarios prévisionnels, i.e la durée de l'horizon d'optimisation).

```
# Nombre d'apports intermediaires a traiter
3
#Nombre d'annees de donnees JOURNALIERE :
15
#Longueur des ESP :
150
4.94504 5.89655 33.20176 1713.08936
...
20.99680 24.67882 179.35004 3793.32121
```

4. Les fichiers de sortie du modèle d'optimisation : « resultats_pnlr_esp.txt » et « commande.txt »

Le logiciel écrit dans le fichier « resultats_pnlr_esp.txt » les soutirages calculés pour les 3 réservoirs, pour chacun des scénarios d'apports et chacune des journées d'optimisation. On retrouve sur la première ligne les soutirages aux 3 réservoirs pour la journée courante. Ces 3 soutirages sont également écrits dans le fichier « commande.txt ».