

Québec, le 13 décembre 2019

Objet : Demande d'accès n° 2019-11-088 – Lettre de réponse

---

Monsieur,

La présente fait suite à votre demande d'accès, reçue le 26 novembre dernier, concernant l' « Étude visant l'adaptation de la gestion des barrages du système hydrique du Haut-Saint-François à l'impact des changements climatiques dans le cadre du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques ».

Le document suivant est accessible. Il s'agit de :

- Étude visant l'adaptation de la gestion des barrages du système hydrique du Haut-Saint-François à l'impact des changements climatiques dans le cadre du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques, 37 pages.

Conformément à l'article 51 de la Loi sur l'accès aux documents des organismes publics et sur la protection des renseignements personnels (RLRQ, chapitre A-2.1), nous vous informons que vous pouvez demander la révision de cette décision auprès de la Commission d'accès à l'information. Vous trouverez, en pièce jointe, une note explicative concernant l'exercice de ce recours.

Pour obtenir des renseignements supplémentaires, vous pouvez communiquer avec M<sup>me</sup> Marie-Claude Laflamme, analyste responsable de votre dossier, à l'adresse courriel [marie-claude.laflamme@environnement.gouv.qc.ca](mailto:marie-claude.laflamme@environnement.gouv.qc.ca), en mentionnant le numéro de votre dossier en objet.

Veuillez agréer, Monsieur, l'expression de nos sentiments les meilleurs.

La directrice,

*(Original signé)*

Julie Samuël

p. j. 1

Étude visant l'adaptation de la gestion des  
barrages du système hydrique du Haut-Saint-  
François à l'impact des changements  
climatiques dans le cadre du Plan d'action  
2013-2020 sur les changements climatiques  
(PACC 2020)

Rapport Final

Septembre 2017

Préparé par :

Amaury Tilmant  
Thibaut Lachaut  
Alexandre Mercille  
Jean-Philippe Marceau  
Xavier Faucher



## Table des matières

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 1   | Introduction .....   | 3  |
| 2   | Objectifs du projet.....                                   | 3  |
| 3   | Le système hydrique du Haut-Saint-François (HSF) .....     | 3  |
| 4   | Méthodologie.....  | 5  |
| 4.1 | Le modèle de simulation.....                               | 5  |
| 4.2 | Les scénarios hydroclimatiques.....                        | 7  |
| 4.3 | Les indicateurs de performance .....                       | 9  |
| 4.4 | L'approche de modélisation.....                            | 11 |
| 5   | Résultats des simulations .....                            | 13 |
| 5.1 | Simulation de la période 2000-2014 .....                   | 13 |
| 5.2 | Simulation en climats de référence et futur .....          | 20 |
| 6   | Conclusions sur les règles actuelles de gestion .....      | 30 |
| 7   | Adaptation de la gestion aux changements climatiques ..... | 32 |
| 8   | Conclusions générales et recommandations.....              | 37 |

## 1 Introduction

La Direction des opérations du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) s'occupe de la gestion en temps réel de divers barrages publics situés pour l'essentiel dans le sud du Québec. Les plans de gestion mis en œuvre visent à concilier divers objectifs tels que le contrôle des inondations, la production d'énergie, le soutien des étiages, le maintien d'un niveau d'eau pour la villégiature et/ou l'alimentation en eau potable.

Selon les scénarios établis par le consortium Ouranos sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques, des changements sont à prévoir au niveau des températures et des précipitations au Québec. En plus des réchauffements anticipés, on s'attend à une hausse significative des précipitations abondantes et extrêmes, ainsi qu'à une augmentation de la quantité maximale annuelle de précipitations pour toutes les durées et pour toutes les périodes de retour (Ouranos, 2015). L'Atlas hydroclimatique du Québec méridional (CEHQ, 2015) évalue les impacts de ces changements sur le régime hydrique québécois. À l'horizon 2050, les principales conclusions de l'Atlas permettent entre autres de prévoir des étiages plus importants en été, des crues plus intenses à l'été et à l'automne, des débits plus forts à l'hiver et un devancement de la crue de printemps. Ces modifications au régime hydrique ne seront pas sans impact sur la gestion des barrages publics.

## 2 Objectifs du projet

Ce projet vise à implanter un modèle de gestion en vue de simuler les effets des projections hydrologiques futures sur les niveaux et soutirages des barrages du système hydrique du Haut-Saint-François (HSF). La comparaison des performances du système en climat actuel et futur par rapport aux objectifs de gestion révélera le degré avec lequel les règles actuelles de gestion sont robustes vis-à-vis des changements climatiques. Si cette analyse comparative indique un manque de robustesse, des mesures non-structurelles d'adaptation seront proposées et testées afin d'atténuer les impacts négatifs des changements climatiques. En résumé, les objectifs spécifiques sont :

- 1) D'implanter un modèle de gestion en vue de simuler les effets des projections hydrologiques futures sur les niveaux et soutirages des barrages du HSF.
- 2) D'analyser les performances de la gestion en climat actuel et futur par rapport aux objectifs de gestion.
- 3) D'adapter les règles de gestion des barrages pour limiter les impacts des changements climatiques

## 3 Le système hydrique du Haut-Saint-François (HSF)

Le système hydrique du Haut-Saint-François comprend les barrages Jules-Allard et Aylmer disposés en série et situés en tête de la rivière Saint-François, à 150 km de Québec (Figure 1). La superficie du bassin versant drainé par le barrage Jules Allard s'élève à 1230 km<sup>2</sup> contre 1730 km<sup>2</sup> pour Aylmer. Plus à l'aval, se trouvent le lac Louise, puis la confluence avec la rivière au Saumon, et, enfin, la centrale hydroélectrique au fil de l'eau de Weedon. Cette dernière reçoit les eaux drainées par un bassin versant de plus de 2940 km<sup>2</sup>.

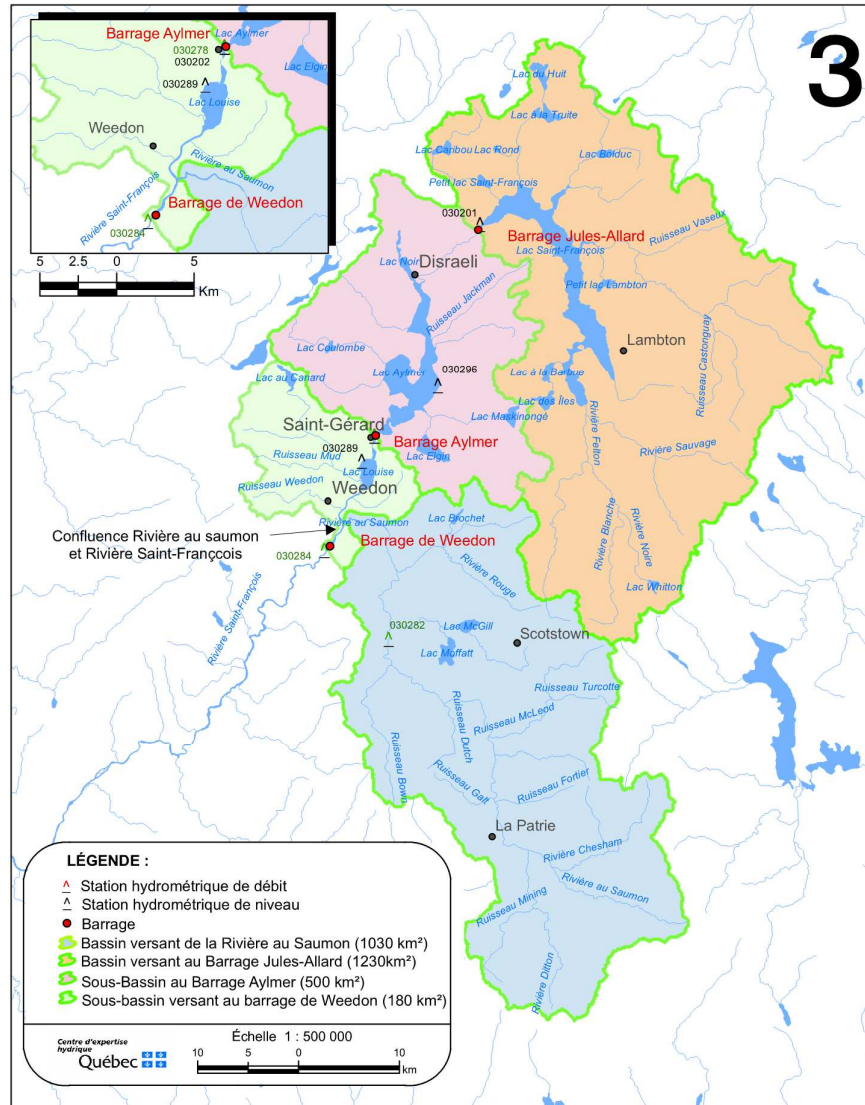


Figure 1. Le Haut Saint-François

La gestion des ouvrages cherche à concilier différents objectifs dont :

- 1) La protection contre les inondations, principalement autour des lacs Saint-François, Aylmer et Louise
- 2) Le maintien, en été, des niveaux dans les deux lacs en amont afin de favoriser les activités récréotouristiques
- 3) Le maintien d'un débit écologique minimum
- 4) La maximisation de la production d'énergie hydroélectrique à Weedon (ainsi qu'aux cinq autres centrales situées en aval).

Afin de concilier au mieux ces différents objectifs, la gestion de ces ouvrages en période estivale (mai-octobre) est réalisée de manière à maintenir des niveaux dans les deux retenues permettant de garantir des conditions propices aux activités récréotouristiques. La vidange des réservoirs débute au mois de décembre et les soutirages sont ajustés de façon à maximiser la production d'énergie à la centrale de Weedon. La vidange hivernale des réservoirs n'est pas toujours complète, elle dépend principalement du couvert de neige et

des redoux hivernaux. L'espace libéré durant la vidange est ensuite progressivement comblé lors de la crue printanière au cours de laquelle les soutirages sont limités et ce, afin d'éviter les inondations au Lac Louise pouvant être causées par le refoulement de la rivière au Saumon, également en crue. Les principaux paramètres d'exploitation ainsi que les caractéristiques principales des ouvrages sont présentés dans les tableaux ci-dessous:

Table 1. Paramètres d'exploitation

| Débit (m <sup>3</sup> /s) | Jules-Allard | Aylmer | Weedon |
|---------------------------|--------------|--------|--------|
| Inondation lac Louise     | -            | -      | 311    |
| Maximum turbinable        | -            | -      | 66     |
| Minimum écologique        | 5            | 8      | -      |

Table 2. Caractéristiques des retenues

| Niveau (m)                | Saint-François | Aylmer |
|---------------------------|----------------|--------|
| Max critique              | 291            | 249,66 |
| Max exploitation          | 290,18         | 248,75 |
| Max normal d'exploitation | 289,57         | 248,14 |
| Min estival               | 288,50         | 247,52 |
| Min exploitation          | 281,95         | 245,7  |

## 4 Méthodologie

Pour répondre aux trois objectifs spécifiques décrits à la section 2, une approche basée sur la simulation de la gestion du HSF et l'analyse de scénarios hydroclimatiques est proposée. L'outil de simulation retenu est HEC-ResSim développé par le Corps des ingénieurs de l'armée des États-Unis (United States Army Corps of Engineers ou USACE). Les scénarios hydroclimatiques, quant à eux, sont fournis par le Service de l'hydrologie et de l'hydraulique du MDDELCC et le Consortium Ouranos.

### 4.1 Le modèle de simulation

Le logiciel HEC-ResSim permet de simuler la gestion d'un système hydrique comprenant plusieurs barrages et devant satisfaire différents usages de l'eau : production d'énergie, approvisionnement des municipalités et industries, agriculture, usages récréotouristiques, etc. Le système hydrique y est représenté à l'aide d'un réseau composé d'arcs et de nœuds. Ces derniers peuvent représenter différentes zones de demande en eau, la confluence de

deux cours d'eau ou encore un point de prélèvement. Les arcs, quant à eux, se substituent aux tronçons de rivière, aux canalisations et autres infrastructures hydrauliques de transport ; ils permettent d'assurer la connectivité hydraulique des nœuds (Harou et al, 2009). La Figure 2 reprend les différents éléments du réseau constituant le système hydrique du Haut-Saint-François.

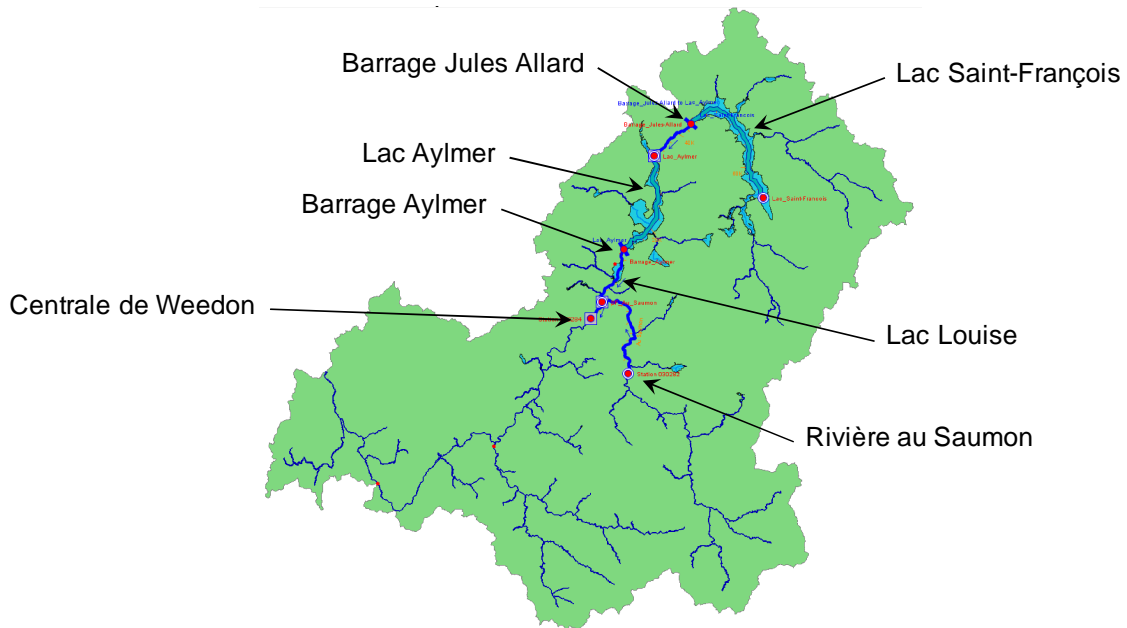


Figure 2. Les éléments du HSF dans HEC-ResSim

Les entrées du modèle sont typiquement des séries temporelles d'apports hydrologiques naturels au niveau de chaque nœud, les caractéristiques des infrastructures hydrauliques et les règles de gestion. Les sorties du modèle sont des séries temporelles avec les soutirages, les niveaux d'eau et débits au travers des arcs représentant le réseau hydrographique/hydraulique.

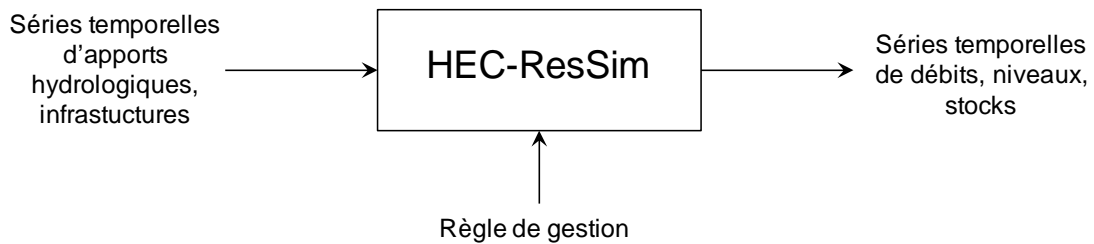


Figure 3. La simulation d'un système hydrique avec HEC-ResSim

À chaque pas de temps de la période de gestion, les décisions d'allocation (soutirages ou prélèvements) sont déterminées en fonction des apports hydrologiques, des niveaux de remplissage des réservoirs et des règles de gestion imposées par l'utilisateur. Dans HEC-ResSim, la capacité de stockage de chaque réservoir est subdivisée en au minimum trois tranches : la tranche morte inférieure qui ne comporte aucune règle puisqu'elle est

inaccessible, la tranche de conservation qui se trouve sous la courbe guide, et la tranche de contrôle des crues au-dessus de la courbe guide (Figure 4). Pour les zones de conservation et de contrôle des crues, des règles de gestion encadrent, à chaque pas de temps, l'arbitrage entre les soutirages et les niveaux à maintenir selon les objectifs de gestion. Les règles sont du type « SI une condition est remplie, ALORS telle décision de gestion est mise en œuvre ». Elles sont hiérarchisées de manière à refléter l'importance relative des objectifs de gestion et leur évolution au cours de l'année.

Dans le cas du HSF, ces règles sont conditionnées en fonction :

- De la période de l'année : printemps, été-automne et hiver
- Du niveau d'eau dans les lacs Saint-François et Aylmer
- Des apports hydrologiques naturels aux lacs Saint-François et Aylmer, ainsi qu'à la rivière au Saumon
- Des débits à l'aval des barrages Jules Allard et Aylmer, ainsi qu'à Weedon

Les règles sont détaillées en annexe I du présent rapport.

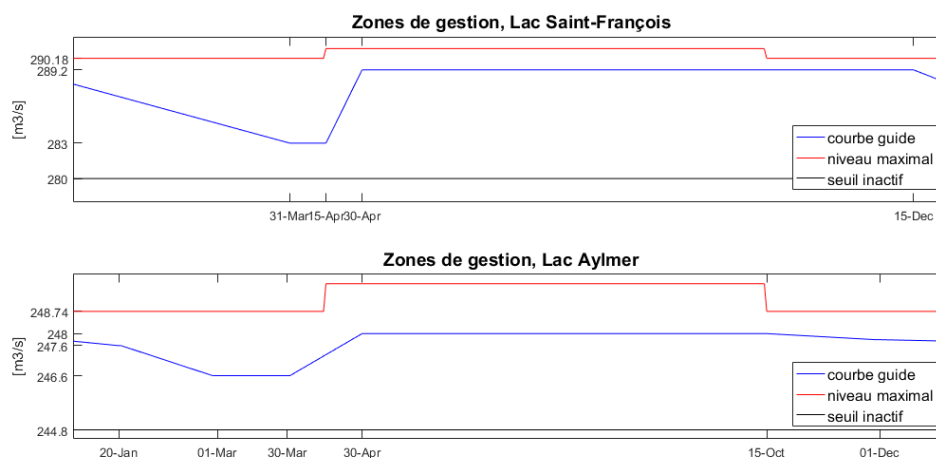


Figure 4. Les zones de gestion des réservoirs du HSF

## 4.2 Les scénarios hydroclimatiques

Les scénarios hydrologiques de référence sont construits à partir du modèle Hydrotel et de la base de données produite par Ressources naturelles Canada agrégée à l'échelle spatiale des modèles climatiques globaux de l'ensemble CMIP5 (Atlas Hydroclimatique, 2015). Les apports aux lacs Saint-François et Aylmer sont extrapolés à partir des simulations de la rivière au Saumon et du rapport des superficies des bassins versants. Chaque scénario comprend les apports journaliers sur une période de 30 ans en chaque nœud du système schématisé sur la Figure 2.

Trois familles distinctes de projections hydroclimatiques sont fournies par le MDDELCC: les projections générées sans post-traitement (DIR), les projections générées après correction de biais (CQM) et celles générées par perturbation des observations (PQM). D'un commun accord avec le MDDELCC, il est convenu de concentrer l'analyse sur les deux premières familles puisque les propriétés statistiques de la troisième sont jugées insatisfaisantes.



La figure 5 reprend les apports moyens journaliers au lac Saint-François en climat de référence et futur et ce pour les deux familles de projections (méthode directe DIR et corrigée CQM). La figure 5 affiche également les moyennes des apports observés au cours de la période 2000-2014. Les apports moyens journaliers corrigés en climat de référence (REF) sont assez proches des valeurs historiques pendant la période été-automne. Pendant la crue printanière, par contre, les scénarios corrigés REF semblent sous-estimer les débits. En ce qui concerne les scénarios REF non corrigés, les débits moyens en période estivale semblent surestimés alors que la crue printanière est similaire à celle générée avec la correction de biais. En moyenne annuelle, une réduction d'environ 4% des débits en climat futur est constatée pour les deux familles de scénarios.

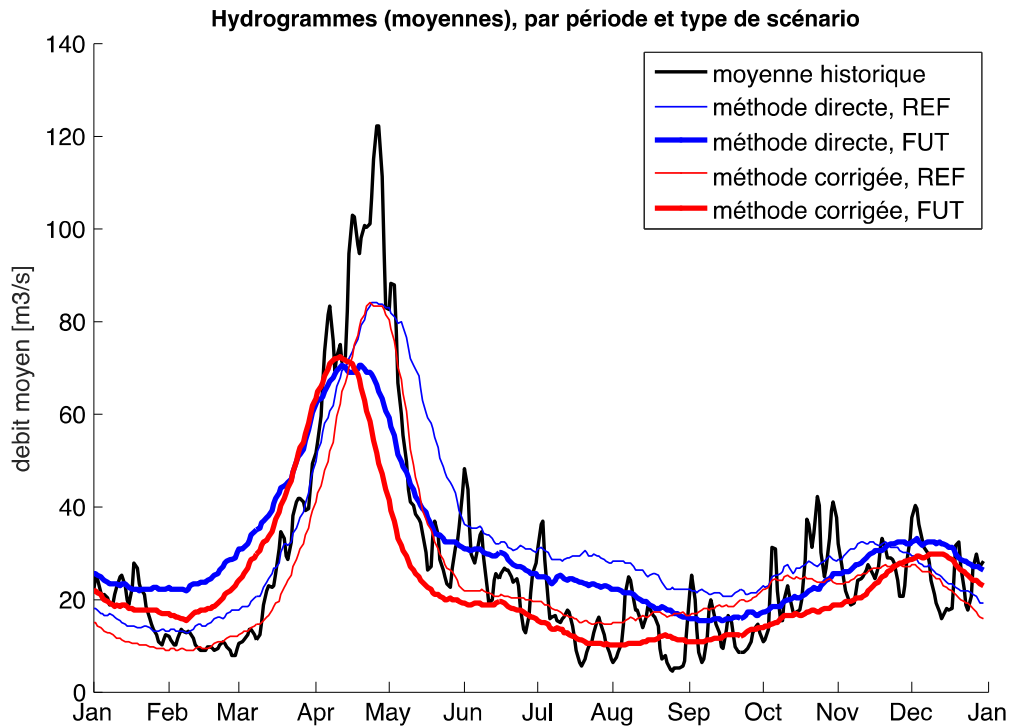


Figure 5. Apports journaliers au lac Saint-François

Pour tester la robustesse des règles de gestion du système hydrique, il est important de travailler avec des scénarios caractérisés par une certaine variabilité hydrologique. En affichant les distributions statistiques des apports journaliers pour chaque scénario (figure 6), nous constatons la grande diversité des scénarios non-corrigés (DIR). L'examen révèle également la meilleure représentation des crues avec ces scénarios DIR. En effet, au-delà d'une probabilité de non-dépassement de 70%, les scénarios CQM s'écartent de la distribution statistique des débits observés entre 2000 et 2014. . Compte tenu des propriétés intéressantes (et semble-t-il complémentaires) de ces deux familles de scénarios, l'analyse de la gestion du HSF se fera pour chacune d'entre elles.

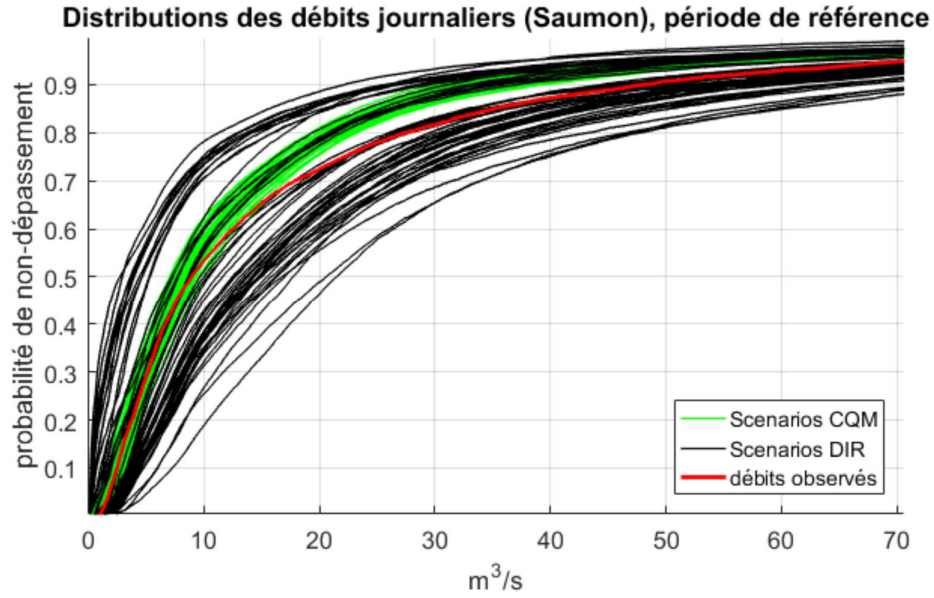


Figure 6. Distribution statistique des débits - rivière au Saumon

### 4.3 Les indicateurs de performance

Pour évaluer la performance du système hydrique du HSF, plusieurs indicateurs sont proposés afin de refléter la diversité des usages mais aussi la présence de plusieurs ouvrages hydrauliques. Ces indicateurs doivent être estimés à partir des résultats des simulations du modèle HEC-ResSim, à savoir essentiellement les séries temporelles des niveaux d'eau dans les lacs et des débits aux différents nœuds du système.

À partir des seuils  $T$  spécifiques à chaque objectif de gestion, il est possible de distinguer à chaque pas de temps  $t$  les états satisfaisants  $S_t$  des états défaillants  $F_t$  du système hydrique. La fiabilité est la probabilité que le système soit dans un état jugé satisfaisant (non-défaillant). Le risque est le complément de la fiabilité.

$$\begin{aligned} \text{Fiabilité} &= P(X_t \in S_t) \\ \text{Risque} &= P(X_t \in F_t) = 1 - P(X_t \in S_t) \end{aligned}$$

La résilience est la probabilité de passer d'un état non-satisfaisant au temps  $t$  à un état satisfaisant au temps suivant ( $t+1$ ). La résilience traduit la rapidité avec laquelle le système quitte l'état de défaillance pour se retrouver dans un état satisfaisant.

$$\text{Résilience} = P(X_t \in S_t | X_{t-1} \in F_t)$$

La vulnérabilité donne une indication sur l'ampleur de la défaillance. La vulnérabilité est proportionnelle au degré de la défaillance pondérée par sa probabilité :

$$\text{Vulnérabilité} = |X_t - T_t| P(X_t \in F_t)$$

La durée probable de défaillance (inverse de la résilience), le nombre de défaillances et la défaillance maximale observée sont également utilisés comme indicateurs de performance.

Ces indicateurs de performance sont évalués pour les différents objectifs de gestion :

- Limiter les inondations
- Assurer un débit minimum environnemental/écologique
- Favoriser les usages récréatifs
- Maximiser la production d'énergie et minimiser la production perdue par déversement.

Selon leur pertinence, ces indicateurs sont aussi évalués à différents endroits du HSF : au lac Saint-François, au lac Aylmer, et à Weedon. La liste complète des indicateurs est reprise dans la table 3.

Table 3. Liste des indicateurs de performance

|  |
|--|
| <b>Seuils d'inondation</b>   |
| Fiabilité<br>Résilience<br>Durée de défaillance (jours)<br>Nombre total de défaillances<br>Vulnérabilité<br>Dépassement maximal                                      |
| <b>Débit écologique</b>  |
| Fiabilité<br>Résilience<br>Durée de défaillance (jours)<br>Nombre total de défaillances<br>Vulnérabilité<br>Dépassement maximal [m <sup>3</sup> /s]                  |
| <b>Usage récréatif estival</b>   |
| Fiabilité<br>Résilience<br>Durée de défaillance (jours)<br>Nombre total de défaillances<br>Vulnérabilité<br>Dépassement maximal, limites inférieure / supérieure [m] |
| <b>Hydro-électricité (MWh/jour)</b>  |
| Production moyenne<br>Production garantie 95% du temps<br>Production perdue  |

#### 4.4 L'approche de modélisation

L'approche de modélisation mise en œuvre pour répondre aux objectifs spécifiques comporte les quatre étapes suivantes :

- 1) Le modèle de gestion est développé de manière à reproduire les règles actuelles de gestion du HSF.
- 2) Ces règles sont testées sur les scénarios d'apports hydrologiques correspondant à la période de référence (REF), c'est-à-dire sans changements climatiques.
- 3) Ces règles seront ensuite testées sur les scénarios d'apports hydrologiques correspondant à une période future soumise aux changements climatiques (FUT).
- 4) Si nécessaire, ces règles seront adaptées de manière à améliorer la robustesse du HSF en climat futur.

La méthodologie proposée est schématisée à la figure 7 et les étapes sont détaillées ci-dessous.

**Étape #1.** Le modèle de gestion est développé de manière à reproduire les règles actuelles de gestion du HSF sur la période historique 2000-2014. Pour ce faire, le MDDELCC a fourni les paramètres d'exploitation présentement suivis par les gestionnaires, les séries temporelles journalières d'apports hydrologiques pour la période 2000-2014, les séries temporelles des décisions de gestion pour la même période, les caractéristiques des barrages. Les sorties du modèle HEC-ResSim sont ensuite comparées à la gestion qui a été suivie entre 2000 et 2014. Cette comparaison porte essentiellement sur :

- a. L'examen visuel des niveaux d'eau observés et simulés dans les lacs Saint-François et Aylmer.
- b. Le respect des objectifs de gestion : usages récréatifs pendant la période estivale ; maintien d'un débit minimum à l'aval des barrages ainsi qu'à Weedon; éviter les inondations aux Lacs Louise, Aylmer et Saint-François; produire de l'énergie hydroélectrique à Weedon. À cette fin, des indicateurs de performance (fiabilité, résilience et vulnérabilité) ont été quantifiés et comparés à ceux obtenus au cours de la période étudiée (2000-2014).

Les règles de gestion ont été ajustées par essai-erreur jusqu'à l'obtention d'un ensemble cohérent pour lequel les performances simulées sont proches de celles qui ont été observées entre 2000 et 2014. Au terme de cette étape, le principal livrable est un modèle de la gestion actuelle du système.

**Étape #2.** Ces règles seront testées sur les scénarios d'apports hydrologiques correspondant à la période de référence (REF), c'est-à-dire sans changements climatiques. Cette seconde étape vise à tester les règles actuelles de gestion sur un nombre plus important de scénarios hydrologiques (106) correspondant aux conditions climatiques actuelles. Cette période de référence (REF), d'une durée de 30 ans, est donc simulée 106 fois. Les buts de cette étape sont de :

- a. Vérifier la robustesse du HSF sous des conditions hydrologiques plus contrastées que celles rencontrées entre 2000 et 2014.
- b. Disposer d'un point de référence pour l'évaluation de la gestion en climat futur.

Les mêmes indicateurs de performance que ceux utilisés à l'étape 1 sont quantifiés pour chaque scénario de référence et les statistiques traditionnelles (moyenne, écart-type) sont évaluées. Compte tenu du grand nombre de scénarios hydrologiques en climat de référence et futur, un script a été développé en langage Jython afin d'automatiser les simulations HEC-ResSim. Pour chaque scénario, le script sauvegarde les résultats de la simulation dans un fichier CSV qui peut ensuite être analysé à l'aide de logiciels standards (MATLAB, MS-Excel, ...). Au terme de cette seconde étape, le principal livrable est une évaluation de la robustesse des règles actuelles de gestion.

**Étape #3.** Ces règles de gestion sont ensuite testées sur les scénarios d'apports hydrologiques correspondant à une période future soumise aux changements climatiques (FUT). La longueur des scénarios est identique à celle des scénarios de la période de référence, soit 30 ans. Comme à la seconde étape, le système hydrique est simulé autant de fois qu'il y a de scénarios hydrologiques FUT, et les résultats des simulations sont synthétisés par les mêmes indicateurs de performance. L'analyse comparative de ces indicateurs permet de mettre en évidence le degré avec lequel les règles actuelles de gestion restent pertinentes dans un climat futur. Au terme de cette troisième étape, le principal livrable consiste en une évaluation de la robustesse des règles actuelles de gestion sous changements climatiques.

**Étape #4.** Si nécessaire, les règles de gestion sont adaptées de manière à améliorer la robustesse du HSF. En fonction des résultats de l'étape précédente, des mesures d'adaptation peuvent être identifiées et testées en simulation. Au terme de cette quatrième étape, le principal livrable est un ensemble de règles adaptées et l'évaluation des performances du HSF vis-à-vis des multiples objectifs de gestion.

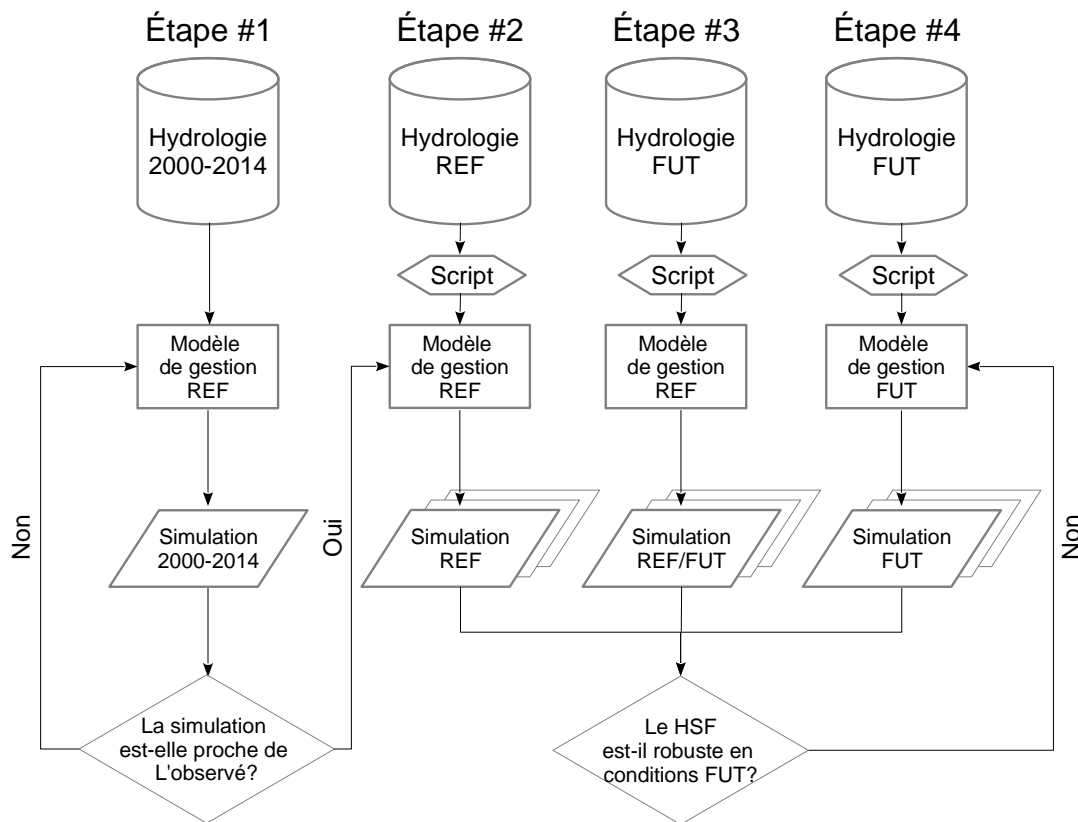


Figure 7. Les étapes de modélisation

## 5 Résultats des simulations

### 5.1 Simulation de la période 2000-2014

La période 2000-2014 est utilisée pour développer le modèle HEC-ResSim du HSF, en particulier les règles de gestion du système. L'objectif est de pouvoir reproduire au mieux la gestion journalière du système telle qu'elle s'est produite au cours de la période considérée. À cette fin, le MDDELCC a mis à la disposition de l'équipe de recherche les données nécessaires, à savoir : les caractéristiques physiques des ouvrages, les séries temporelles des apports hydrologiques journaliers ainsi que les séries temporelles des décisions de soutirages journaliers. Les informations relatives aux objectifs de gestion ont également été transmises par le MDDELCC.

L'essentiel des efforts de modélisation a porté sur le développement d'un ensemble cohérent de règles de gestion pour les deux barrages, Jules Allard et Aylmer. Ces règles sont détaillées en annexe I et seuls les éléments principaux sont repris dans cette section. Pour chaque barrage, une courbe guide, reprise à la figure 4, divise le stock d'eau en deux tranches : la supérieure (*flood control*) et l'inférieure (*conservation*). Comme son nom l'indique, cette courbe représente le niveau attendu du réservoir en fonction de la période de l'année. Par conséquent, si le niveau se trouve dans la tranche supérieure (*flood control*), les règles sont conçues de manière à ramener le niveau vers la courbe guide le plus rapidement possible en augmentant les soutirages. Inversement, les règles vont favoriser le remplissage si le niveau

se trouve sous cette courbe. Ce principe est néanmoins encadré par une série de contraintes opérationnelles telles que les capacités maximales de soutirage, ou par des objectifs de gestion comme le maintien d'un débit minimum en tout temps.

Outre les ajustements en fonction des niveaux, les règles sont également adaptées à trois périodes de l'année : (1) la crue printanière, (2) l'été-automne et (3) la vidange hivernale. Quelle que soit la période, les trois règles suivantes ont toujours préséance dans la tranche *flood control*:

- Garantir un débit minimum écologique
- Assurer la sécurité du barrage lorsque le niveau approche le maximum admissible
- Contrôler la quantité d'eau vers Weedon en vue de limiter les inondations à l'aval.

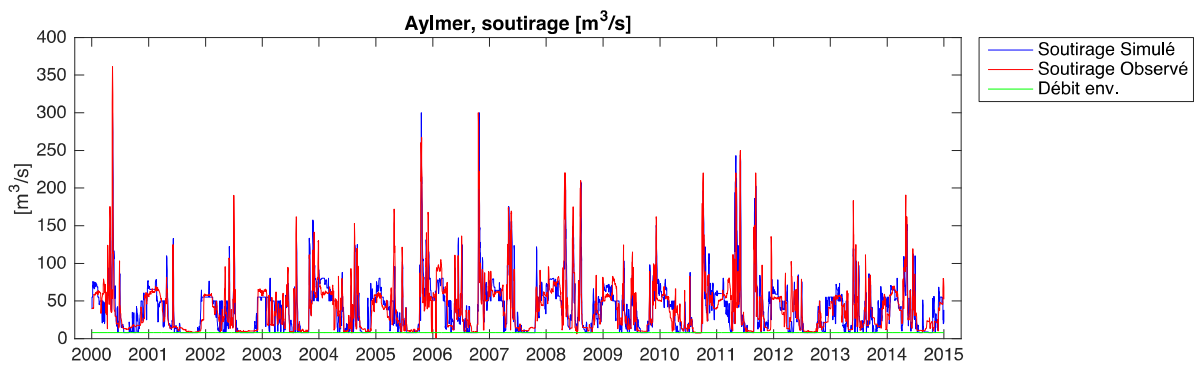
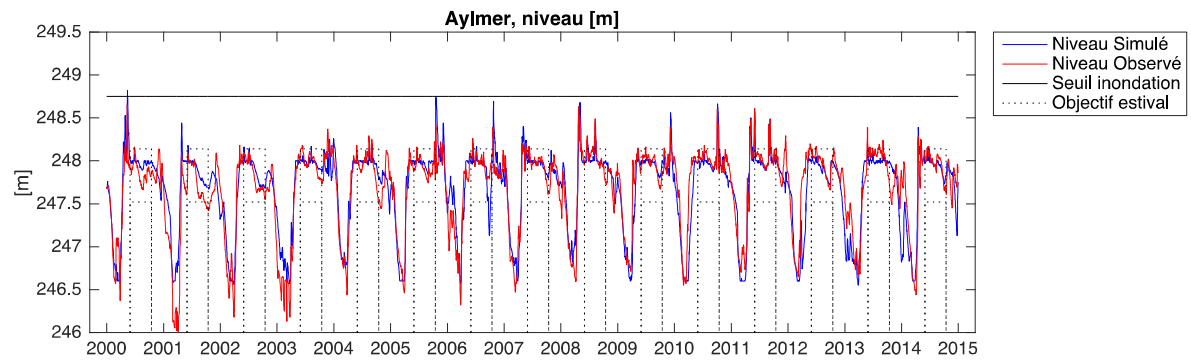
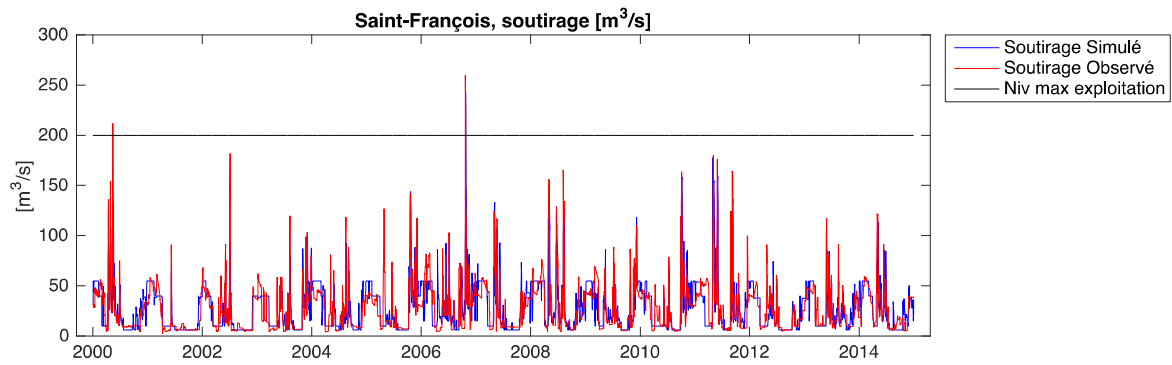
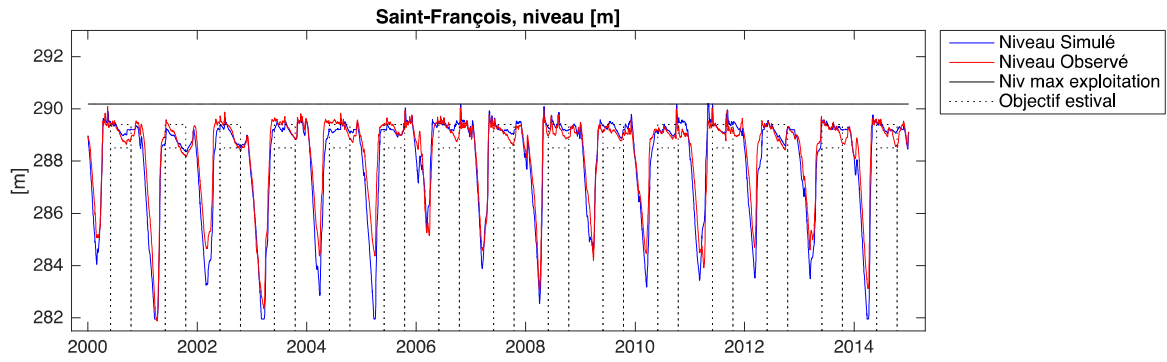
Si le niveau se trouve dans la zone *conservation*, les deux règles suivantes ont toujours préséance :

- Garantir un débit minimum écologique
- Contrôler la quantité d'eau vers Weedon.

Ensuite, des blocs de règles spécifiques sont activés selon la période de l'année et la zone de stockage :

- Le bloc Remplissage (mars-mai)
- Le bloc Laminage (mai-décembre)
- Le bloc Vidange (décembre-mars).

Ces règles sont ajustées par essai-erreur jusqu'à l'obtention d'une simulation dont les niveaux dans les deux réservoirs sont proches de ceux observés au cours de la période historique 2000-2014. La figure 8 reprend l'évolution des niveaux et des soutirages simulés et observés au barrage Jules Allard. La figure 9 est dédiée à l'évolution des niveaux et des soutirages simulés et observés au barrage Aylmer.





En appui à cet examen visuel, les indicateurs de performances décrits plus haut ont également été évalués en simulation pour être ensuite comparés aux valeurs observées. Dans les tableaux qui suivent, OBS désigne les performances observées entre 2000 et 2014, tandis que HIST correspond aux performances simulées avec HEC-ResSim. Les indicateurs sont groupés par objectif de gestion :

- contrôle des inondations
- maintien d'un débit écologique minimum
- favoriser les activités récréotouristiques
- maximiser la production hydroélectrique.

*La*

table 4 reprend les indicateurs relatifs aux inondations au lac Saint-François, au lac Aylmer ainsi qu'à Weedon. L'examen de ce tableau révèle que le modèle HEC-ResSim reproduit bien la gestion actuelle du système vis-à-vis du contrôle des inondations dans la mesure où les valeurs des indicateurs HIST sont très proches de celles des indicateurs OBS. Nous pouvons y voir également la plus grande vulnérabilité de l'aval (Weedon) par rapport aux deux lacs en amont. À Weedon, la vulnérabilité vis-à-vis des inondations est légèrement réduite en simulation en raison d'une meilleure anticipation des crues en amont. Cette anticipation sera indispensable en climat de référence (voir plus loin) et aboutit à de modestes dépassements de seuil en amont

*Table 4. Indicateurs relatifs aux inondations*

|  | Lac Saint-François |      | Lac Aylmer |      | Weedon |       |
|--|--------------------|------|------------|------|--------|-------|
|  | OBS                | HIST | OBS        | HIST | OBS    | HIST  |
| Seuils d'inondation                          |                    |      |            |      |        |       |
| Fiabilité                                    | 1.00               | 1.00 | 1.00       | 1.00 | 0.99   | 1.00  |
| Résilience                                   | -                  | 1.00 | -          | 0.50 | 0.44   | 0.44  |
| Durée de défaillance (jours)                 | 0.00               | 1.00 | 0.00       | 2.00 | 2.25   | 2.27  |
| Nombre total de défaillances                 | 0.00               | 1.00 | 0.00       | 1.00 | 16.00  | 11.00 |
| Vulnérabilité                                | 0.00               | 0.00 | 0.00       | 0.00 | 0.43   | 0.38  |
| Dépassement maximal (m ou m <sup>3</sup> /s) | 0 m                | 0.03 | 0 m        | 0.07 | 278    | 198   |

En ce qui concerne les débits écologiques à maintenir à l'aval du barrage Aylmer, la gestion observée au cours de la période 2000-2014 a abouti à 7 jours de défaillance au cours desquels les soutirages n'ont pas été suffisants (

table 5). En simulation, le nombre de défaillance est nul puisque les règles attachées à cet objectif ont une priorité importante dans le modèle.

Table 5. Indicateurs relatifs au débit écologique

|                              | Lac Saint - François |      | Lac Aylmer |      | Weedon |      |
|------------------------------|----------------------|------|------------|------|--------|------|
|                              | OBS                  | HIST | OBS        | HIST | OBS    | HIST |
| <b>Débit écologique</b>      |                      |      |            |      |        |      |
| Fiabilité                    | 0.92                 | 0.99 | 0.99       | 1.00 |        |      |
| Résilience                   | 0.99                 | 1    | 0.15       | -    |        |      |
| Durée de défaillance (jours) | 11.3                 | 0    | 6.70       | 0.00 |        |      |
| Nombre total de défaillances | 37                   | 3    | 7.00       | 0.00 |        |      |
| Vulnérabilité                | 0.06                 | 0    | 0.01       | 0.00 |        |      |
| Dépassement max [m3/s]       | 7.5                  | 4    | 7.15       | 0.00 |        |      |

La table 6 présente les indicateurs de performance concernant les usages récréatifs aux lacs Saint-François et Aylmer. Les conditions favorables à de telles activités nécessitent le maintien de niveaux d'eau élevés au cours de la période estivale. Au lac Saint-François, la gamme de niveaux acceptables étant relativement étroite, des dépassements à la hausse (dépassement du seuil supérieur) comme à la baisse (sous le seuil inférieur) s'observent plus souvent qu'au lac Aylmer. Par conséquent, la fiabilité de la gestion vis-à-vis des usages récréotouristiques y est plus faible (0.5 contre 0.95). Cette fiabilité au lac Saint-François est légèrement supérieure en simulation grâce à une meilleure anticipation des crues estivales. Au lac Aylmer, les différences en OBS et HIST sont négligeables.

Table 6. Indicateurs relatifs aux activités récréotouristiques

|                                 | Lac Saint - François |       | Lac Aylmer |       | Weedon |      |
|---------------------------------|----------------------|-------|------------|-------|--------|------|
|                                 | OBS                  | HIST  | OBS        | HIST  | OBS    | HIST |
| <b>Usage récréatif estival</b>  |                      |       |            |       |        |      |
| Fiabilité                       | 0.51                 | 0.67  | 0.94       | 0.96  |        |      |
| Résilience                      | 0.05                 | 0.06  | 0.23       | 0.20  |        |      |
| Durée de défaillance (jours)    | 19.30                | 16.63 | 4.10       | 5.00  |        |      |
| Nombre total de défaillances    | 52.00                | 40.00 | 32.00      | 15.00 |        |      |
| Vulnérabilité                   | 0.08                 | 0.04  | 0.02       | 0.01  |        |      |
| Dépassement max, limite sup [m] | 0.60                 | 0.78  | 0.50       | 0.52  |        |      |
| Dépassement max, limite inf [m] | -0.80                | -0.61 | -0.10      | -0.39 |        |      |

La dernière série d'indicateurs concerne la production d'énergie hydroélectrique à Weedon (

table 7). Ici aussi, les différences entre OBS et HIST sont négligeables, que ce soit pour la production journalière moyenne, la production garantie ou l'énergie perdue par déversement.

Table 7. Indicateurs relatifs à la production d'énergie

|                                  | Lac Saint - François |      | Lac Aylmer |      | Weedon |       |
|----------------------------------|----------------------|------|------------|------|--------|-------|
|                                  | OBS                  | HIST | OBS        | HIST | OBS    | HIST  |
| Hydro-électricité (MWh/jour)     |                      |      |            |      |        |       |
| Production moyenne               |                      |      |            |      | 63.00  | 63.60 |
| Production garantie 95% du temps |                      |      |            |      | 15.00  | 13.25 |
| Production perdue                |                      |      |            |      | 28.00  | 28.12 |

Les évaluations qualitatives (examen visuel) et quantitatives (indicateur de performance) permettent de valider un modèle HEC-ResSim du Haut-Saint-François et ses règles de gestion. Le modèle tel que développé reproduit assez fidèlement la gestion actuelle du HSF et il est jugé qu'il peut être utilisé dans l'étape suivante, à savoir la simulation en climat de référence.

## 5.2 Simulation en climats de référence et futur

L'étape #2 (figure 7) vise à tester les règles actuelles de gestion sur un nombre plus important de scénarios hydrologiques (106) correspondant aux conditions climatiques actuelles. D'autre part, il est également question d'assurer une certaine cohérence entre les scénarios hydrologiques en climat futur et actuel. En effet, au terme de la troisième étape, les performances du système hydrique en climat futur doivent être comparées à celles obtenues pour les conditions climatiques actuelles, lesquelles sont représentées par les scénarios REF. La gestion du HSF sur cette période de référence (REF), d'une durée de 30 ans, est donc simulée 106 fois en utilisant le modèle développé à l'étape #1.

Les règles de gestion initialement développées au cours de l'étape #1 se sont avérées inadaptées pour faire face aux scénarios de référence. La variabilité hydrologique des scénarios de référence étant plus importante que celle observée au cours de la période 2000-2014, les règles de gestion calibrées sur cette période n'étaient pas capables de gérer certains événements extrêmes (crues) présents dans les scénarios de référence. Les modifications suivantes ont donc été apportées :

- La prise en compte d'une borne supérieure variable pour la tranche flood control. En période de crue printanière, cette borne est augmentée de 82 et 92 cm respectivement aux lacs Saint-François et Aylmer. Les règles de sécurité restent les mêmes et tendent à éviter d'utiliser ces marges supplémentaires. Ces modifications permettent d'augmenter temporairement les volumes d'emmagasinement de 42.3 et 37 hm<sup>3</sup>
- La prise en compte des apports futurs pour anticiper ces crues. Le volume total attendu au cours des 5 prochains jours est utilisé comme une approximation des prévisions hydrologiques et du couvert de neige
- Un dépassement du niveau maximal d'exploitation des lacs est toléré lorsque le débit est supérieur à 500 m<sup>3</sup>/s à Weedon.

Une fois ces corrections validées sur la période 2000-2014, les nouvelles règles de gestion sont utilisées pour simuler tous les scénarios hydrologiques de référence et les indicateurs de performance sont ensuite estimés. Par la suite, la procédure est répétée avec les scénarios futurs (244). Contrairement à la période historique où les indicateurs ne prenaient qu'une valeur unique, en climat de référence et futur, chaque indicateur est caractérisé par un

vecteur dont la taille est proportionnelle au nombre de scénarios. En effet, la période 2000-2014 correspond à une seule réalisation du climat actuel alors que les scénarios de référence représentent autant de réalisations possibles qui sont utilisées pour simuler le HSF. Chaque indicateur est donc évalué autant de fois qu'il y a de scénarios de référence.

Les résultats des simulations en climat de référence (REF) et futur (FUT) doivent aussi être analysés en fonction du type de projections hydroclimatiques. Comme indiqué plus haut, trois familles distinctes de projections hydroclimatiques sont fournies par le MDDELCC: les projections générées sans post-traitement (DIR), les projections générées après correction de biais (CQM) et celles générées par perturbation des observations (PQM). D'un commun accord avec le MDDELCC, il est convenu de cibler l'analyse uniquement sur les deux premières familles en raison des propriétés statistiques de la troisième qui sont jugées insatisfaisantes.

La figure 10 et la figure 11 montrent l'évolution des niveaux simulés dans le lac Saint-François en climat de référence et futur pour les deux familles de scénarios hydrologiques (CQM et DIR). La figure 10 montre qu'en comparaison avec la trajectoire moyenne historique, les niveaux simulés en été en climat de référence sont légèrement inférieurs. Les niveaux de vidange par contre sont similaires. En climat futur, le système peine à maintenir un niveau acceptable en été suite à la réduction des apports DIR pendant l'été. Le niveau visé de vidange est également plus haut et est atteint quelques jours plus tôt compte tenu du volume moins important de la crue printanière et de son apparition plus hâtive.

En utilisant les scénarios CQM, le remplissage en climat de référence semble affecté par un niveau de vidange plus bas. La réduction des apports estivaux en climat futur entraîne à nouveau des difficultés à maintenir le niveau au-dessus du seuil inférieur pour les activités récréotouristiques. Ici également, le niveau de vidange en climat futur est plus élevé et est atteint plus tôt.

À l'aval, la fluctuation du niveau estival au lac Aylmer (Figure 12 et Figure 13) est moins prononcée suite à la régulation d'une partie des apports hydrologiques naturels par le lac Saint-François situé en amont.

**Niveaux journaliers au Lac Saint-François  
méthode directe, périodes REF et FUT**

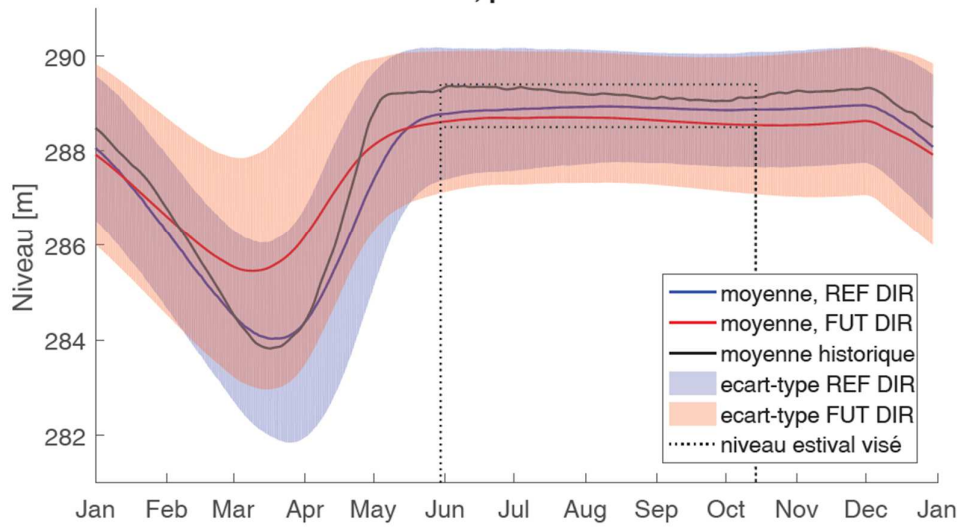


Figure 10. Cycle de vidange-remplissage au Lac Saint-François – scénarios DIR

**Niveaux journaliers au Lac Saint-François  
méthode CQM, périodes REF et FUT**

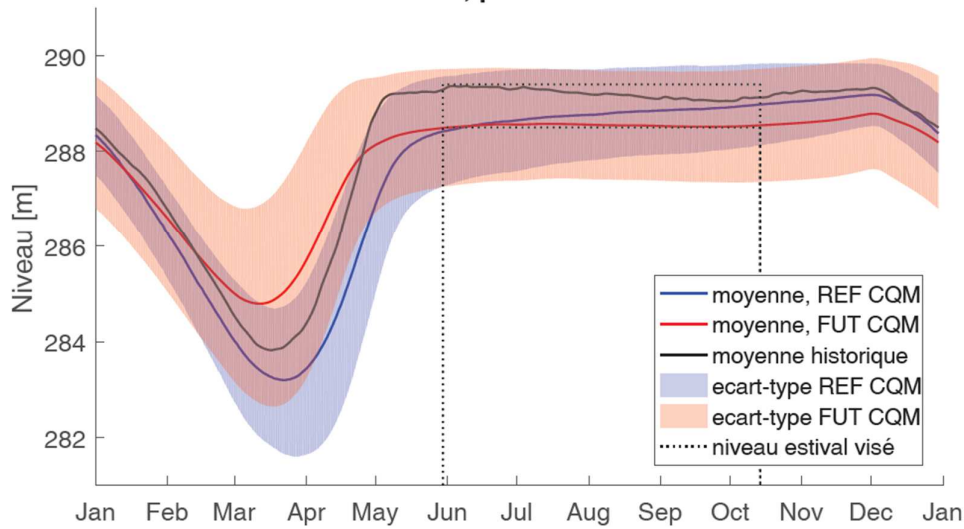
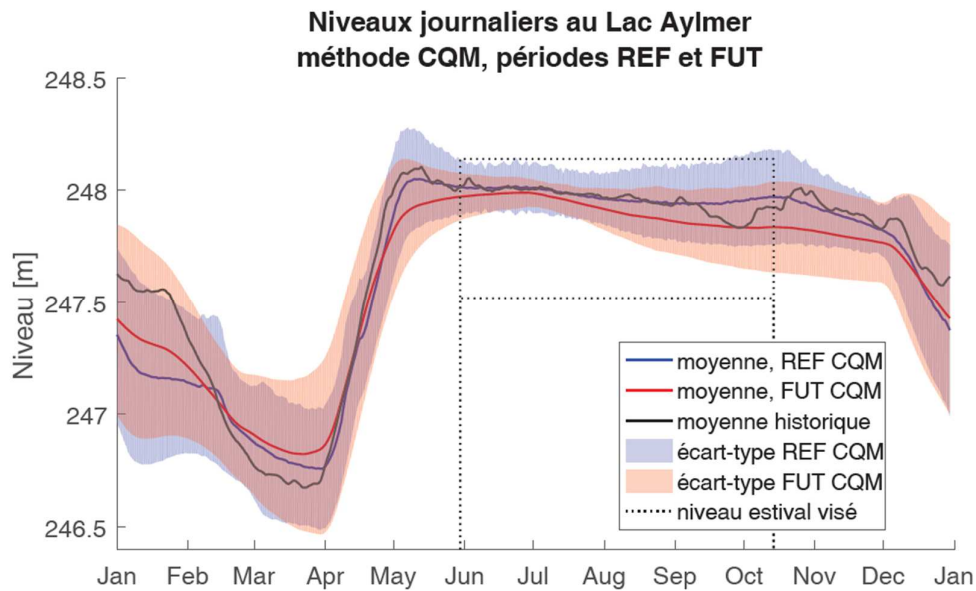
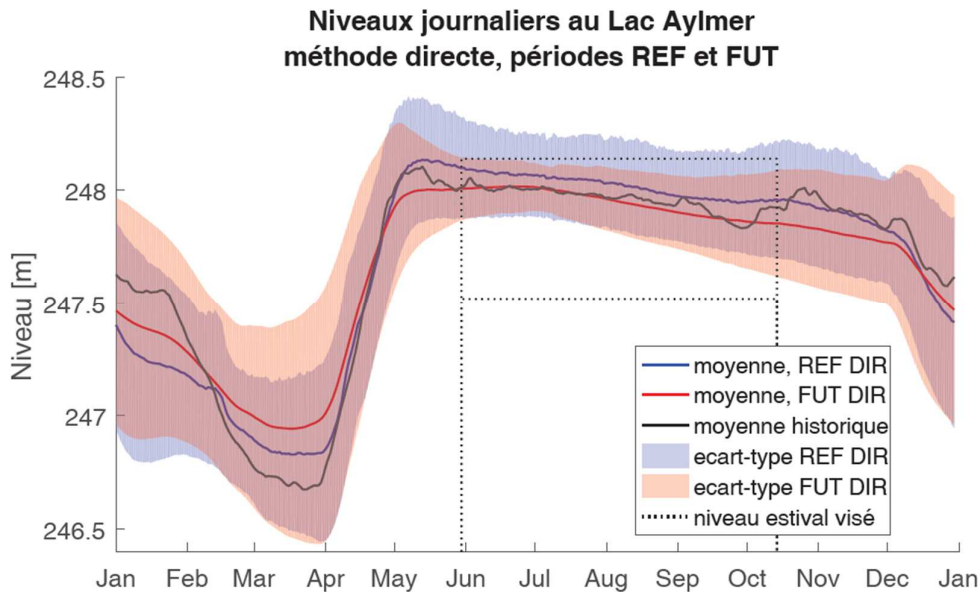


Figure 11. Cycle de vidange-remplissage au Lac Saint-François - scénario CQM



L'analyse des performances de la gestion du HSF en climat futur repose sur les mêmes indicateurs que ceux utilisés pour la calibration du modèle (Étape #1). C'est la comparaison de ces indicateurs calculés en climat de référence et en climat futur qui va permettre de caractériser la vulnérabilité du système hydrique face aux changements climatiques. Cette analyse est dédoublée ici compte tenu de la présence de deux familles distinctes de projections hydroclimatiques (DIR et CQM). L'analyse est produite en deux temps : premièrement, une comparaison des valeurs moyennes des indicateurs est proposée afin de dégager les tendances des changements vis-à-vis de chaque objectif de gestion (Table 8) et, ensuite, une analyse plus approfondie des distributions statistiques de certains indicateurs clés est menée à bien.



De l'examen de la table 8, nous pouvons tirer les observations suivantes sur les moyennes des indicateurs :

- Les scénarios DIR engendrent plus d'inondations que les scénarios CQM à l'amont comme à l'aval, que ce soit en climat de référence ou futur. Cela s'explique par la plus grande variabilité/diversité des scénarios DIR. Par rapport au climat de référence, les performances moyennes en matière de contrôle des inondations restent pratiquement inchangées en climat FUT. Cette observation est valide tant pour les scénarios DIR que CQM.
- Le maintien d'un débit minimum écologique est garanti plus souvent avec les scénarios DIR où les débits en période d'étiage sont sensiblement plus élevés qu'avec les scénarios CQM. À l'aval d'Aylmer, ces débits minimums sont maintenus en tout temps, indépendamment de la famille de scénarios.
- En période estivale, si les conditions pour les usages récréatifs restent stables en amont, elles s'améliorent légèrement à l'aval. Au lac Saint-François, la durée moyenne des conditions non propices aux usages récréatifs augmente avec les scénarios CQM alors qu'elle diminue avec les scénarios DIR. Cependant, les fréquences de dépassement des seuils d'inondation augmentent avec les scénarios DIR et diminuent avec les scénarios CQM. Enfin, avec les CQM, la fiabilité se dégrade légèrement alors qu'elle s'améliore avec les scénarios DIR. Au lac Aylmer, on observe une diminution du nombre de dépassement de seuil en climat futur pour les deux familles de scénarios. Par conséquent, les fiabilités vis-à-vis des activités récréotouristiques augmentent légèrement en passant de REF à FUT.
- À la centrale hydroélectrique de Weedon, une diminution de la production moyenne est observée pour les deux familles de scénarios. Cette diminution est cependant moins prononcée avec les projections DIR (6.5% contre 8.5%). Ce résultat n'est pas surprenant étant donné que cette famille renferme des scénarios généralement plus humides que les CQM (cf figure 5).

La figure 14 montre les distributions statistiques de la fiabilité vis-à-vis des inondations au lac Saint-François en climat REF et FUT pour les deux familles de scénarios hydrologiques. Compte tenu de la variabilité bien plus importante des scénarios non-corrigés (DIR), les distributions de l'indicateur sont bien plus « étalées » ; une signature qui va se retrouver dans la plupart des figures qui suivent. La variabilité des scénarios DIR génère des dépassements plus fréquents du seuil d'inondation mais cela se produit au pire dans 2% du temps (1-0.98). Avec les scénarios corrigés, les fréquences sont négligeables (<0.005% du temps). Notons qu'en climat futur, aucune dégradation significative n'est observée.

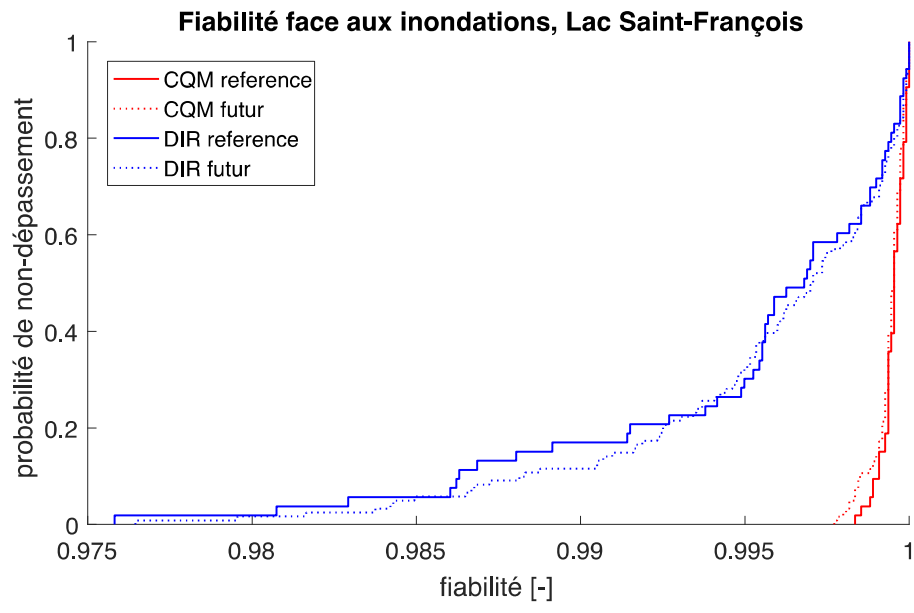


Figure 14. Inondations au lac Saint-François

Table 8. Moyennes des indicateurs de performance en climat REF et FUT

|  | Lac Saint - François |         |         |         | Lac Aylmer |         |         |         | Weedon  |         |         |         |
|--|----------------------|---------|---------|---------|------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|  | REF_CQM              | REF_DIR | FUT_CQM | FUT_DIR | REF_CQM    | REF_DIR | FUT_CQM | FUT_DIR | REF_CQM | REF_DIR | FUT_CQM | FUT_DIR |
| <b>Seuils d'inondation</b>                 |                      |         |         |         |            |         |         |         |         |         |         |         |
| Fiabilité                                  | 1.000                | 0.995   | 0.999   | 0.996   | 0.995      | 0.990   | 0.996   | 0.990   | 0.996   | 0.986   | 0.997   | 0.987   |
| Résilience                                 | NaN                  | NaN     | NaN     | NaN     | 0.87       | 0.87    | 0.88    | NaN     | 0.36    | NaN     | 0.39    | NaN     |
| Durée de défaillance (jours)               | 1.5                  | 1.9     | 1.6     | 1.7     | 1.2        | 1.2     | 1.1     | 1.1     | 2.9     | 3.3     | 2.6     | 2.8     |
| Nombre total de défaillances               | 3.2                  | 23.8    | 4.1     | 25.4    | 46.2       | 99.6    | 42.0    | 96.5    | 15.5    | 43.4    | 13.8    | 44.6    |
| Vulnérabilité                              | 0.000                | 0.001   | 0.000   | 0.001   | 0.000      | 0.001   | 0.000   | 0.001   | 0.276   | 1.639   | 0.234   | 1.396   |
| Dépassement maximal                        | 0.49                 | 0.62    | 0.52    | 0.61    | 0.15       | 0.22    | 0.16    | 0.24    | 233     | 405     | 247     | 388     |
| <b>Débit écologique</b>                    |                      |         |         |         |            |         |         |         |         |         |         |         |
| Fiabilité                                  | 0.998                | 0.999   | 0.998   | 0.999   | 1          | 1       | 1       | 1       |         |         |         |         |
| Résilience                                 | 1                    | NaN     | 1       | NaN     | NaN        | NaN     | NaN     | NaN     |         |         |         |         |
| Durée de défaillance (jours)               | 1                    | 0.88679 | 1.0     | 1.0     | 0          | 0       | 0       | 0       |         |         |         |         |
| Nombre total de défaillances               | 18.5                 | 10.4    | 20.1    | 13.9    | 0          | 0       | 0       | 0       |         |         |         |         |
| Vulnérabilité                              | 0.007                | 0.004   | 0.007   | 0.005   | 0          | 0       | 0       | 0       |         |         |         |         |
| Dépassement maximal [m3/s]                 | 4                    | 3.5472  | 4.00    | 3.85    | 0          | 0       | 0       | 0       |         |         |         |         |
| <b>Usage récréatif estival</b>             |                      |         |         |         |            |         |         |         |         |         |         |         |
| Fiabilité                                  | 0.573                | 0.416   | 0.559   | 0.459   | 0.937      | 0.837   | 0.947   | 0.869   |         |         |         |         |
| Résilience                                 | 0.04                 | 0.03    | 0.04    | 0.03    | 0.34       | 0.27    | 0.29    | 0.24    |         |         |         |         |
| Durée de défaillance (jours)               | 27.2                 | 46.1    | 30.0    | 41.7    | 3.0        | 3.9     | 3.9     | 4.8     |         |         |         |         |
| Nombre total de défaillances               | 65.4                 | 56.5    | 62.5    | 60.6    | 88.5       | 182.7   | 61.8    | 137.4   |         |         |         |         |
| Vulnérabilité                              | 0.182                | 0.260   | 0.274   | 0.368   | 0.011      | 0.028   | 0.010   | 0.023   |         |         |         |         |
| Dépassement maximal, limite supérieure [m] | 1.11                 | 1.26    | 1.06    | 1.26    | 0.76       | 0.77    | 0.76    | 0.79    |         |         |         |         |
| Dépassement maximal, limite inférieure [m] | -3.44                | -2.54   | -4.31   | -3.37   | 0.04       | 0.12    | -0.07   | 0.02    |         |         |         |         |
| <b>Hydro-électricité (MWh/jour)</b>        |                      |         |         |         |            |         |         |         |         |         |         |         |
| Production moyenne                         |                      |         |         |         |            |         |         |         | 63.1    | 67.1    | 57.7    | 62.8    |
| Production garantie 95% du temps           |                      |         |         |         |            |         |         |         | 16.1    | 24.2    | 13.3    | 17.6    |
| Production perdue                          |                      |         |         |         |            |         |         |         | 19.1    | 37.8    | 20.2    | 37.2    |

La figure 15 affiche les mêmes distributions statistiques mais au lac Aylmer. Ici également, les conditions hydrologiques futures n'entraînent pas de dégradation de la performance du système vis-à-vis des inondations. Cette observation tient pour les deux familles de scénarios.

À Weedon (lac Louise), les probabilités de ne pas avoir d'inondation dépassent 99% dans tous les scénarios corrigés (CQM) contre 95% avec les scénarios DIR (Figure 16). En climat futur, les conditions s'améliorent dans tous les cas (100% du temps) pour les deux familles de scénarios.

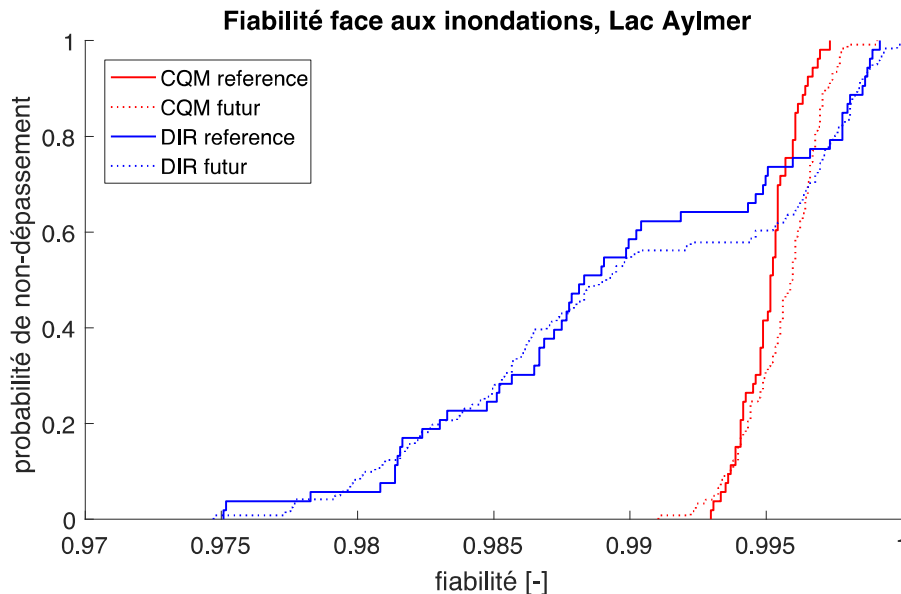


Figure 15. Inondations au lac Aylmer

L'évolution de la probabilité de maintenir des conditions propices aux activités récréotouristiques aux lacs Saint-François et Aylmer sont reprises respectivement dans les figure 17 et figure 18. Comme indiqué précédemment, ces fiabilités sont nettement plus élevées au lac Aylmer qu'au Lac Saint-François. Ce dernier engendre une externalité positive à l'aval en régulant une bonne partie des apports hydrologiques du lac Aylmer. Nous pouvons également observer que, pour les deux ouvrages, les conditions se dégradent plus rapidement avec les scénarios DIR (non-corrigés). Cette différence est à nouveau à mettre sur le compte de la variabilité bien plus grande des scénarios DIR qui aboutit à des dépassements de seuils plus fréquents, également amplifiée au lac Saint-François par sa position en amont.

Pour ce qui est de la comparaison entre les climats FUT et REF, on note une amélioration des conditions (les fiabilités plus élevées) aux deux sites pour les scénarios non-corrigés (DIR). En travaillant avec les scénarios débiaisés, la fiabilité diminue au lac Saint-François dans environ 70% des cas, alors qu'elle s'améliore à Aylmer dans 100% des cas. Ces divergences s'expliquent notamment par le fait qu'un niveau estival jugé non-conforme peut être insuffisant ou excessif. Nous sommes donc en présence d'un problème de gestion avec deux

seuils qui délimitent une zone de niveaux acceptables. Au lac Aylmer, en climat de référence, le non-respect de cette zone souhaitée se fait surtout par la borne supérieure (248.14 m). Autrement dit ce sont essentiellement des niveaux excessifs qui nuisent aux objectifs de niveau estival. Comme le volume moyen de la crue printanière tend à diminuer en climat futur, le niveau estival moyen serait moins élevé et les dépassements de seuil par le haut seront moins nombreux (Figure 13).

Au lac Saint-François (Figure 11), le niveau moyen estival baisse également avec le volume de crue en climat futur, mais cette baisse se soustrait à un niveau moyen déjà trop bas en période de référence. De plus, les apports n'étant pas régulés, les variations interannuelles de niveau sont bien plus importantes qu'au lac Aylmer. Il n'y a donc pas d'amélioration sensible concernant les niveaux excessifs, mais une forte dégradation concernant les niveaux insuffisants.

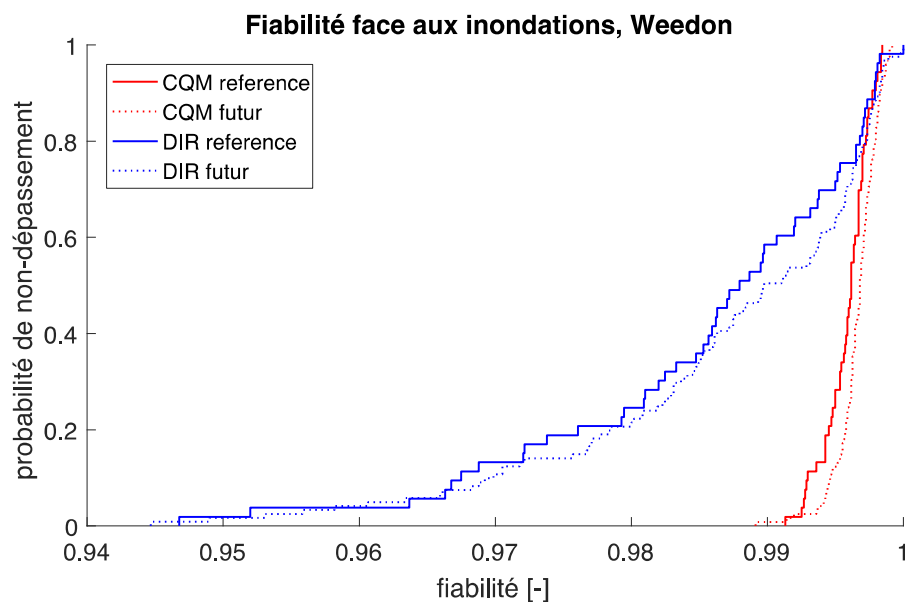


Figure 16. Inondations à Weedon

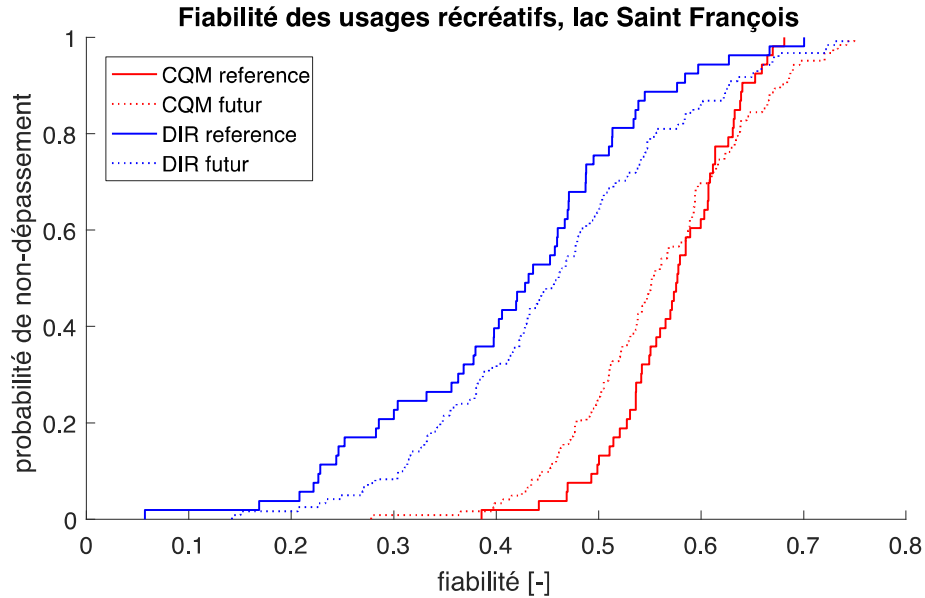


Figure 17. Usages récréatifs - Lac Saint-François

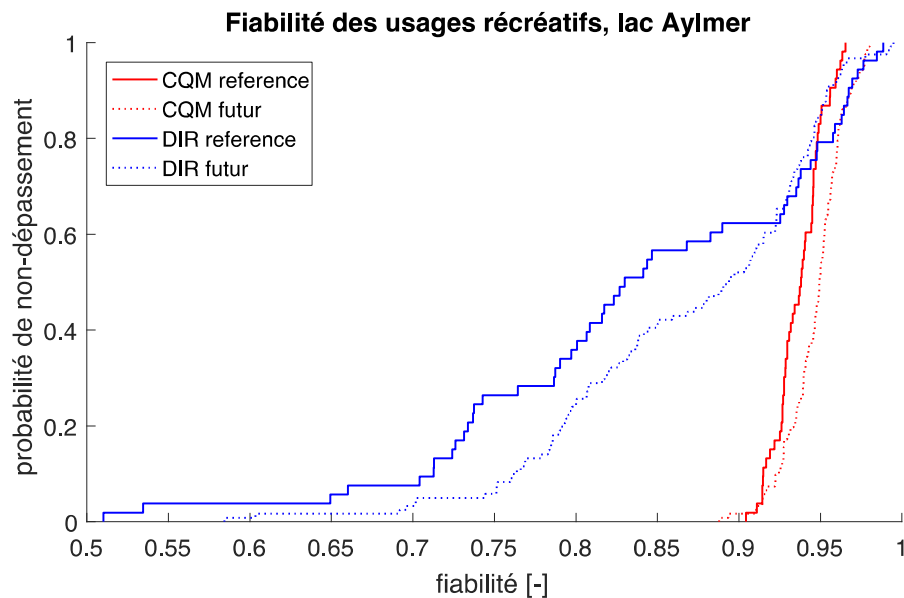
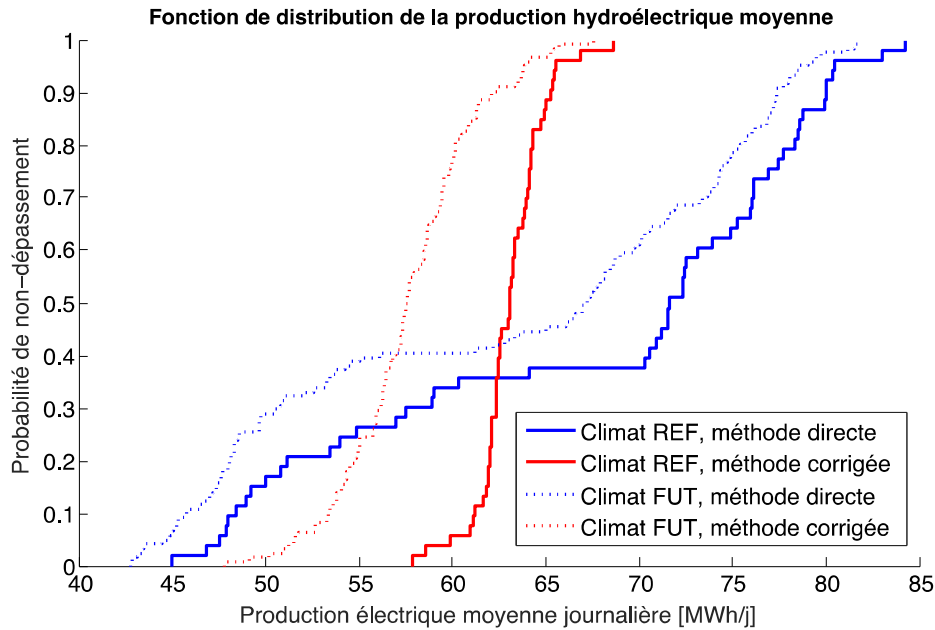


Figure 18. Usages récréatifs - Lac Aylmer

La production hydroélectrique à la centrale de Weedon marque le pas en conditions futures ; quelle que soit la famille de scénarios utilisée, on observe une diminution de la production sur l'ensemble des scénarios (figure 19). Cette diminution est directement liée aux apports (annuels) moins importants en climat FUT. À nouveau, la variabilité de la production à partir des scénarios DIR est nettement plus importante que celle obtenue avec les scénarios corrigés. Une autre observation associée aux scénarios corrigés est la réduction croissante de la production avec les scénarios « plus secs », ceux dont les probabilités de non-dépassement sont basses. En utilisant les scénarios DIR, les différences entre les distributions statistiques semblent indépendantes du niveau de probabilité.



## 6 Conclusions sur les règles actuelles de gestion

L'analyse de la robustesse des règles actuelles de gestion du système hydrique du Haut Saint-François repose sur la simulation et l'analyse par scénarios. L'approche proposée se décompose en quatre étapes : le développement des règles actuelles et leur validation, la simulation de ces règles en climat de référence sur un grand nombre de scénarios reflétant la variabilité hydrologique naturelle, la simulation de ces règles en climat futur suivie de leur éventuelle adaptation.

L'analyse des performances du système en climat futur à partir de plusieurs indicateurs et de deux familles de scénarios hydrologiques aboutit aux constats suivants :

1. Aucune dégradation significative des performances vis-à-vis des inondations n'est observée en amont comme à l'aval.
2. Un constat identique peut être tiré pour le maintien d'un débit minimum à l'aval des barrages Jules Allard et Aylmer.
3. Les conditions pour les activités récréotouristiques s'améliorent au lac Aylmer. Au lac Saint-François, la situation est plus contrastée dans la mesure où les conclusions diffèrent selon la famille de scénarios utilisée. Dans un cas on note une amélioration (scénarios DIR), dans l'autre (scénarios CQM) une dégradation. Compte tenu de la meilleure représentation des débits estivaux dans les scénarios CQM, il est raisonnable de conclure à une dégradation des conditions pour les usages récréatifs dans 70% des scénarios CQM (avec une amélioration observée sur les scénarios restant).
4. La production hydroélectrique à Weedon chute de près de 8% en climat futur. Cette diminution par-rapport au climat de référence s'accroît dans le cas des scénarios CQM avec une faible hydraulité (-15%). Elle reste pratiquement constante dans le cas des scénarios DIR.

De cette analyse, nous sommes en mesure d'identifier deux problèmes potentiels : les activités récréotouristiques au lac Saint-François et la production hydroélectrique à Weedon. Si des mesures d'adaptation peuvent potentiellement améliorer la situation au lac Saint-François, le problème à la centrale de Weedon est difficile à corriger puisqu'il est associé à une réduction des apports naturels en climat futur. Au niveau du lac Saint-François, un avancement du pied de crue (fin de la vidange) de +/- 15 jours et son rehaussement devrait permettre d'améliorer le remplissage printanier du réservoir. De même, une meilleure anticipation des apports hydrologiques permettrait d'éviter des dépassements de seuil par le haut et donc maintenir des conditions favorables. Une troisième mesure qui cherche à réduire les inondations à Weedon en abaissant le niveau estival souhaité (courbe guide) dans les deux lacs (Saint-François et Aylmer) est également analysée.



## 7 Adaptation de la gestion aux changements climatiques

L'objectif de l'étape #4 de la méthodologie décrite plus haut est d'évaluer les mesures d'adaptation identifiées à l'étape précédente, à savoir :

- La modification du pied de crue (dénotée PC). La comparaison des hydrogrammes des crues printanières en REF et FUT permet d'avancer le pied de crue de 15 jours et de le rehausser de 40 cm au lac Saint-François et de 19 cm à Aylmer.
- L'allongement de l'horizon des prévisions hydrologiques (dénotée PH). Il est suggéré par les hydrologues du MDDELCC de considérer des progrès dans l'allongement de l'horizon des prévisions à raison de 1 jour par décennie. Pour la période FUT, l'horizon de prévision est donc porté à 10 jours.
- L'abaissement du niveau estival souhaité dans les deux lacs (dénotée NE). Le MDDELCC suggère d'évaluer les impacts d'un abaissement de 10 cm de la courbe guide dans les deux lacs.

Pour chaque mesure d'adaptation proposée, le système hydrique est simulé en climat FUT avec les projections hydroclimatiques débiaisées (CQM). Les résultats des simulations permettent d'évaluer les mêmes indicateurs de performance que ceux utilisés aux étapes précédentes et de tracer les distributions statistiques correspondantes. La comparaison des distributions statistiques avec ou sans la mesure d'adaptation permettra d'en révéler l'efficacité. Dans ce qui suit, le scénario de gestion en climat futur sans mesures d'adaptation (étape #3) devient le scénario de base et est dénoté par FUT-Base. Finalement, un dernier scénario regroupant les trois mesures d'adaptation est également évalué (FUT-3).

La Figure 20 montre les distributions statistiques de la fiabilité vis-à-vis des inondations au lac Saint-François en climat FUT sans mesure d'adaptation (FUT-Base), avec les trois mesures d'adaptation individuelles (FUT-PC, FUT-PH et FUT-NE), et finalement avec les trois mesures combinées (FUT-3). Si la fiabilité était déjà très élevée sans mesure d'adaptation, nous pouvons quand même constater une légère amélioration avec les mesures d'adaptation. En effet, avec l'une ou l'autre de ces trois mesures, il n'y a plus d'inondation au lac Saint-François environs une année sur deux (probabilité de non dépassement = 50%).

### Fiabilité face aux inondations, Lac Saint-François

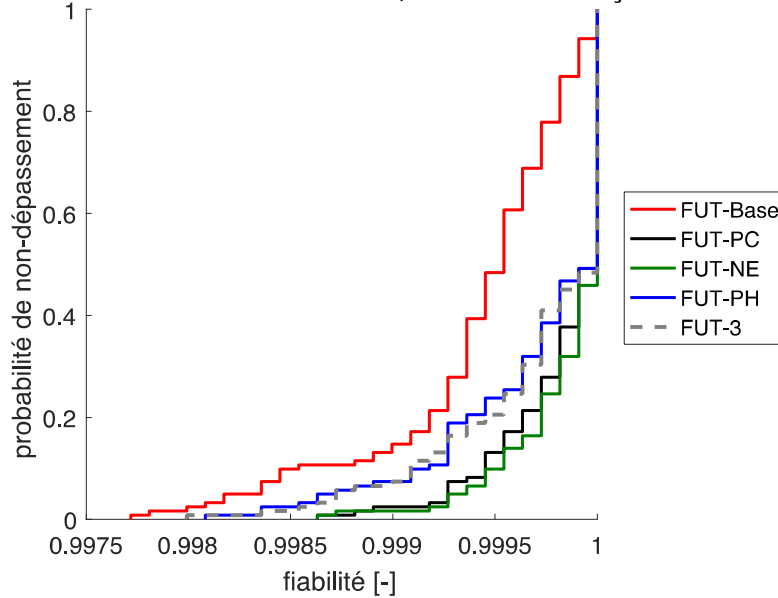


Figure 20. Fiabilité vis-à-vis des inondations au lac Saint-François avec les mesures d'adaptation

Au lac Aylmer, des conclusions similaires peuvent être tirées : les trois mesures d'adaptation améliorent la fiabilité vis-à-vis des inondations (qui était au demeurant déjà élevée sans adaptation). Pour le pire scénario, cette amélioration se traduit par une réduction du nombre de dépassement du seuil d'inondation qui passe d'environ 90 à 10 sur une période de 30 ans.

### Fiabilité face aux inondations, Lac Aylmer

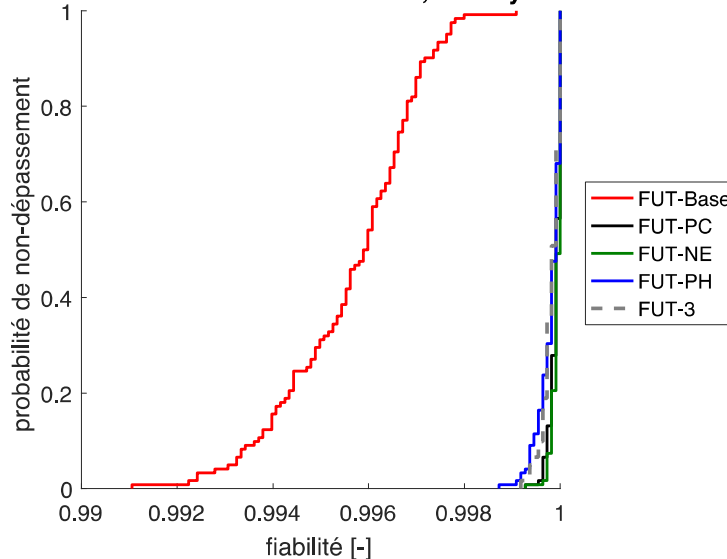


Figure 21. Fiabilité vis-à-vis des inondations au lac Aylmer avec les mesures d'adaptation

A Weedon, les mesures d'adaptation présent en amont n'améliorent pas, voire dégradent, la fiabilité vis-à-vis des inondations. En particulier, la modification du pied de crue (PC) dans les deux lacs en amont induit une légère dégradation de la situation à l'aval. Il semble donc que

la définition de la courbe guide lors de la crue printanière nécessitera un arbitrage entre l'amont et l'aval. Par contre, en été, cet arbitrage ne sera pas nécessaire puisque l'abaissement de la courbe guide en amont ne porte pas préjudice à la partie aval.

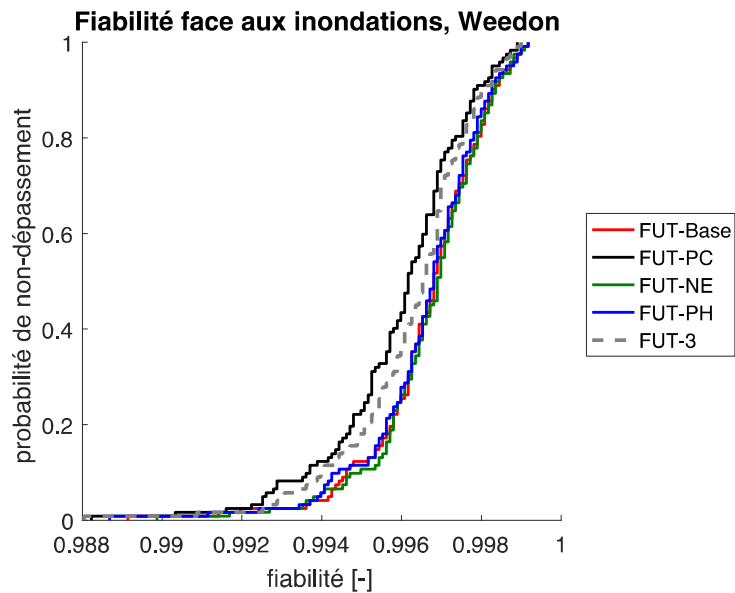


Figure 22. Fiabilité vis-à-vis des inondations à Weedon avec les mesures d'adaptation

En ce qui concerne les usages récréotouristiques, les trois mesures d'adaptation améliorent également les conditions au lac Saint-François (Figure 23). Si l'abaissement de la courbe guide en période estivale engendre plus de dépassements de seuil par le bas (limite inférieure de la zone d'acceptabilité), cette augmentation est compensée par une réduction significative des dépassements du seuil supérieur. En règle générale, la fiabilité augmente d'environ 5% à 8% pour l'ensemble des scénarios (les différences horizontales entre les courbes restent pratiquement constantes). La combinaison des trois mesures est marquée par le rôle prépondérant joué par la modification du pied de crue qui conditionne les niveaux au début de la période estivale.

### Fiabilité des usages récréatifs, lac Saint François

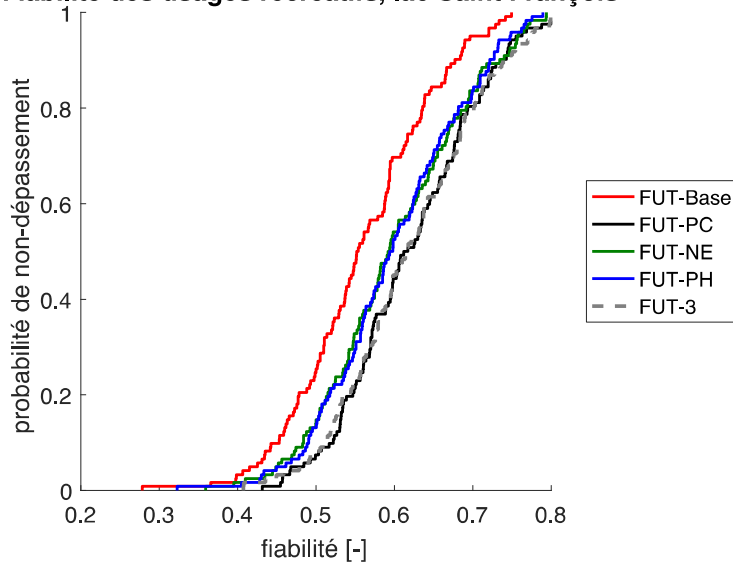
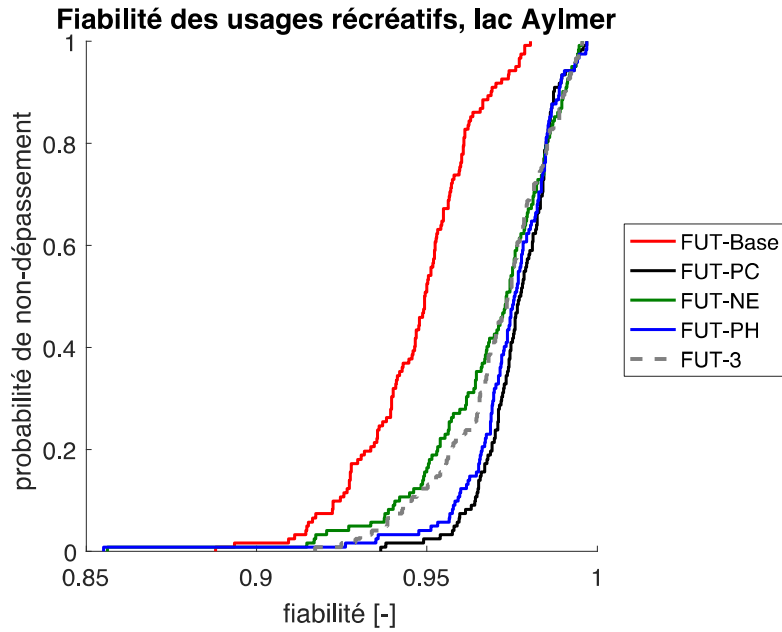


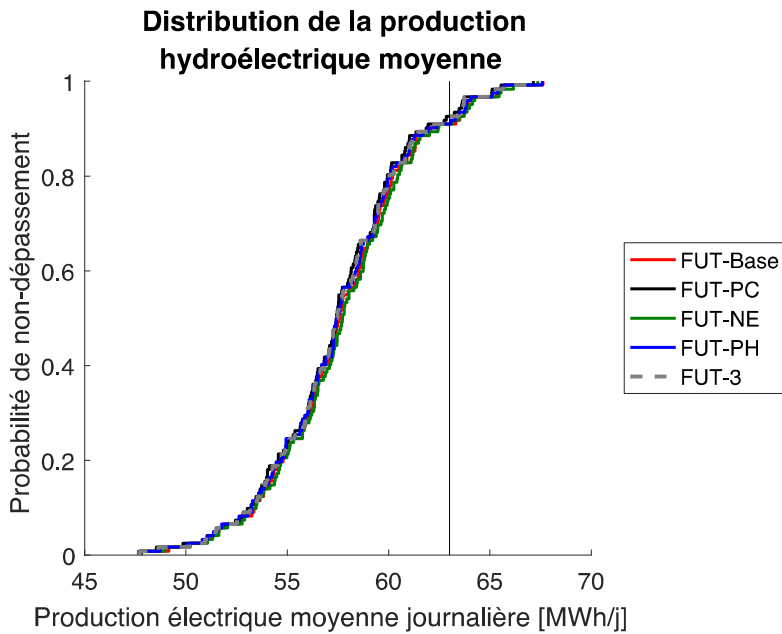
Figure 23. Fiabilité vis-à-vis des usages récréotouristiques au lac Saint-François

La Figure 24 reprend l'évolution des fiabilités pour les usages récréatifs au lac Aylmer. Ici également, les trois mesures d'adaptation augmentent la fiabilité et ce pour tous les scénarios. Les mesures les plus prometteuses sont la modification du pied de crue et l'allongement de l'horizon des prévisions hydrologiques. Pour ces deux mesures, une augmentation d'au moins 4% de la fiabilité peut être observée sur tous les scénarios. Comme observé au lac Saint-François, l'abaissement du niveau estival ne dégrade pas la fiabilité car l'augmentation des dépassements par le bas est compensé par une réduction plus marquée des dépassements par le haut. Contrairement à ce qui a été observé au lac Saint-François, la combinaison des trois mesures semble être dominée ici par l'abaissement du niveau estival, en particulier pour les scénarios les plus défavorables (faible probabilité de non-dépassement).

L'impact des trois mesures sur la production hydroélectrique moyenne journalière à Weedon est négligeable (Figure 25). Elles ne permettent pas d'augmenter la production par rapport aux règles actuelles de gestion.



*Figure 24. Fiabilité vis-à-vis des usages récréotouristiques au lac Aylmer*



*Figure 25. Fiabilité vis-à-vis de la production hydroélectrique moyenne journalière*

## 8 Conclusions générales et recommandations

Les deux problèmes potentiels identifiés au cours de l'étape #3, à savoir les activités récréotouristiques au lac Saint-François et la production hydroélectrique à Weedon, ne réagissent pas de la même manière aux mesures d'adaptation proposées. Si la situation s'améliore au lac Saint-François, elle reste inchangée à Weedon où la production hydroélectrique reste inférieure à celle attendue en climat actuel.

Aucune mesure d'adaptation n'aboutit à une situation gagnant-gagnant stricte. En climat futur, des compromis devront donc être trouvés entre les usages ainsi qu'entre l'amont et l'aval. Si les trois mesures d'adaptation proposées sont globalement bénéfiques pour les deux lacs en amont, elles ont un impact négligeable sur la production hydroélectrique et peuvent même augmenter légèrement le risque d'inondation à l'aval.

Le problème de la priorisation des règles bute sur leur qualification. Cette dernière n'est, en effet, pas toujours aisée étant donné que les gains et pertes de performance sont parfois à peine discernables. Par exemple, pour certains intervenants, la modification du pied de crue dans les deux lacs s'avèrera être une mesure du type « gagnant-perdant » avec des gains observés en amont au prix d'une augmentation (modérée) des inondations à Weedon. Pour d'autres, cette augmentation modérée des inondations à Weedon ne sera pas significative et la mesure PC sera considérée du type « gagnant-gagnant ».

La performance associée à la combinaison des trois règles ne correspond pas à la somme des performances individuelles des règles. L'action combinée des règles varie dans l'espace et selon les usages. Pour un même usage, les règles peuvent se renforcer à tel endroit du bassin et s'affaiblir mutuellement à un autre. Ces effets synergétiques pourraient sans doute être mieux caractérisés via une analyse de sensibilité des règles et des différentes combinaisons de règles.