

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE  
Faculté de génie  
Département de génie civil

# DÉTERMINATION DE LA VALEUR ULTIME DU PRÉLÈVEMENT D'EAU BRUTE EN RIVIÈRE POUR UNE VILLE DU SUD-OUEST QUÉBÉCOIS

## MISE EN SITUATION AVEC LA VILLE DE BROMONT

Mémoire de maîtrise  
Spécialité : génie civil

Elyse FOURNIER

Jury : Bertrand CÔTÉ (directeur)  
Robert LECONTE (codirecteur)  
Jay LACEY (rapporteur)  
Jean-François CYR (Évaluateur externe)



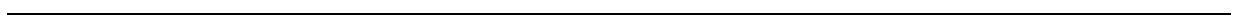
# RÉSUMÉ

Des études récentes démontrent que les périodes d'étiage des rivières du sud du Québec seront plus sévères et plus fréquentes en raison du réchauffement climatique attendu. Les municipalités s'approvisionnant en eau brute à même ces rivières devront s'adapter à cette nouvelle réalité. L'objectif de l'étude présentée est de déterminer le prélèvement ultime en eau brute qu'une ville peut effectuer en rivière sans compromettre l'intégrité du milieu naturel. Une étude d'impact en conditions de changements climatiques est effectuée et des mesures d'adaptation sont proposées pour assurer la viabilité à long terme du prélèvement à la prise d'eau. L'étude porte sur la prise d'eau de la ville de Bromont, située sur le tronçon centre de la rivière Yamaska. Une approche de soutien d'étiage en utilisant le lac Brome est retenue.

Le modèle hydrologique SWAT est utilisé pour reconstituer les apports naturels sur le bassin versant. Il est également utilisé pour produire des séries de débits en période de référence et en période future pour sept projections climatiques. Un modèle de simulation maison est utilisé pour reproduire la gestion du barrage au lac Brome. Le débit prélevable est déterminé en utilisant quatre méthodes différentes pour le calcul des débits réservés écologiques.

Les résultats démontrent que la ville de Bromont est en mesure de prélever de l'eau jusqu'à la quantité permise par son certificat d'autorisation sans avoir d'impact sur l'intégrité du milieu naturel uniquement pour une des quatre méthodes de détermination du débit réservé écologique et ce uniquement au printemps, à l'été et à l'automne. Avec les changements climatiques, le prélèvement jusqu'à la valeur autorisée engendre le non-respect des débits réservés écologiques pour toutes les méthodes. Finalement, les méthodes d'adaptation sont en mesure de pallier l'impact des changements climatiques et de permettre un prélèvement équivalent à celui prévu au certificat d'autorisation de la ville.

**Mots-clés :** Changements climatiques, Prélèvements d'eau, Soutien à l'étiage, Réservoir d'eau, Fiabilité, Vulnérabilité, Débits réservés écologiques



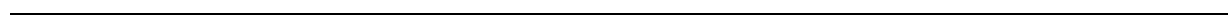
# REMERCIEMENTS

Ce projet n'aurait pu être réalisé sans l'encadrement et le soutien de mon directeur Bertrand Côté. Je le remercie sincèrement pour toutes les idées, la motivation et le positivisme dont il fait preuve. Je tiens également à remercier Robert Leconte, mon codirecteur, pour ses conseils, son suivi et son intérêt qui ont fait de ce projet un succès.

Merci à la ville de Bromont pour leur implication et leur intérêt dans le projet. Je tiens particulièrement à souligner la participation de Jean-François Vachon et de Steve Médou. Je désire également offrir mes remerciements à Ouranos pour les données en changements climatiques.

Un grand merci à toute l'équipe de recherche et en particulier à Mélanie Trudel et Didier Haguma qui m'ont offert un soutien technique tout au long du projet.

Finalement, je tiens à exprimer ma reconnaissance à ma famille et à mes amis pour le soutien moral au cours de ces années d'étude.



# TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1	INTRODUCTION.....	1
1.1	Mise en contexte et problématique .....	1
1.2	Définition du projet de recherche .....	3
1.3	Objectif du projet de recherche .....	5
1.4	Contributions originales.....	6
1.5	Plan du document.....	7
CHAPITRE 2	DESCRIPTION DU SITE DE L'ÉTUDE .....	9
2.1	Le bassin versant.....	9
2.2	Les données disponibles sur le bassin versant .....	12
2.2.1	Les données météorologiques .....	12
2.2.2	Les données hydriques.....	12
2.3	La gestion hydrique actuelle sur le bassin versant .....	16
2.3.1	Le lac Brome et le barrage Foster .....	16
2.3.2	Les prises d'eau .....	20
CHAPITRE 3	ÉTAT DE L'ART .....	23
3.1	Les étiages.....	23
3.1.1	Définition et indicateurs de faibles débits .....	23
3.1.2	Les étiages et les changements climatiques .....	25
3.1.3	Les étiages et les prises d'eau en rivière .....	26
3.1.4	Les étiages et les débits réservés écologiques.....	29
3.2	Les méthodes de soutien à l'étiage .....	33
3.2.1	La minimisation des pertes en eau.....	33
3.2.2	La gestion des apports souterrains .....	34
3.2.3	La gestion des eaux de surface.....	37
3.3	La gestion des réservoirs .....	40

3.3.1	Les modèles informatiques .....	40
3.3.2	Critères de performance .....	41
3.3.3	La gestion des réservoirs en changements climatiques .....	43
3.4	La reconstitution des apports naturels .....	44
3.4.1	La méthode des bassins voisins .....	44
3.4.2	Le bilan hydrique .....	45
3.4.3	La validation des données hydrométriques .....	46
3.4.4	La modélisation hydrologique .....	47
3.5	La modélisation hydrologique .....	48
3.5.1	Les types de modèles hydrologiques .....	48
3.5.2	Le calage et la validation des modèles hydrologiques .....	50
3.5.3	La modélisation hydrologique en changements climatiques .....	52
CHAPITRE 4	MÉTHODOLOGIE .....	55
4.1	La modélisation climatique .....	57
4.1.1	Objectif .....	57
4.1.2	Sélection du scénario climatique et des modèles .....	57
4.1.3	Correction sur les données .....	58
4.2	La modélisation hydrologique .....	59
4.2.1	Objectif .....	59
4.2.2	Sélection du modèle .....	59
4.2.3	Les données d'entrée .....	60
4.2.4	Le calage et la validation .....	64
4.2.5	La mise en œuvre en changements climatiques .....	65
4.3	Le modèle de simulation .....	66
4.3.1	Objectif .....	66
4.3.2	Sélection du modèle .....	66
4.3.3	Le fonctionnement général .....	66

---



4.4	La modélisation de la consommation en eau brute .....	74
4.4.1	Objectif .....	74
4.4.2	Sélection du modèle et fonctionnement .....	74
4.5	La gestion du réservoir selon la convention .....	76
4.5.1	Objectif .....	76
4.5.2	Le processus de décision .....	76
4.5.3	La performance du module de gestion selon la convention.....	79
4.6	La détermination du débit prélevable actuellement.....	80
4.6.1	Les débits réservés écologiques .....	80
4.6.2	Évaluation du débit prélevable actuel selon $Q_{eco1}$ à 4.....	81
4.7	Impacts des changements climatiques sur le système hydrique .....	83
4.8	Mesures proposées d'adaptation aux changements climatiques .....	84
CHAPITRE 5	RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	91
5.1	La modélisation climatique.....	91
5.2	La modélisation hydrologique .....	92
5.2.1	Le calage du modèle hydrologique .....	92
5.2.2	La mise en œuvre en changements climatiques .....	95
5.3	Le modèle de simulation.....	99
5.3.1	L'équation de seuil en période de non contrôle .....	99
5.3.2	Décision selon la hauteur des clapets .....	100
5.3.3	Vérification des débits maximal et minimal.....	101
5.3.4	Calcul de l'élévation au lac Brome .....	101
5.4	La modélisation de la consommation en eau brute .....	104
5.5	La gestion du réservoir selon la convention .....	107
5.6	La détermination du débit prélevable actuel .....	111

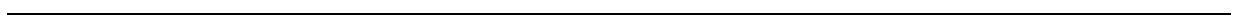
---

5.6.1	Les débits réservés écologiques .....	111
5.6.2	Évaluation du débit prélevable actuel selon $Q_{eco1}$ à $Q_{eco4}$ .....	113
5.7	Impacts des changements climatiques sur le système hydrique .....	127
5.7.1	Impacts climatiques.....	127
5.7.2	Impacts hydriques .....	130
5.7.3	Impacts sur le système hydrique selon $Q_{eco1}$ et $Q_{eco3}$ .....	133
5.8	Mesures d'adaptation proposées aux changements climatiques.....	143
5.8.1	Devancement de la période de contrôle.....	143
5.8.2	Gestion du barrage à chaque jour.....	146
5.8.3	Devancement de la période de contrôle et gestion du barrage chaque jour .....	150
5.8.4	Augmentation du niveau cible au lac Brome .....	153
5.8.5	Augmentation du débit minimum de la convention .....	157
5.8.6	Règles de gestion modifiées.....	164
CHAPITRE 6	CONCLUSION .....	171
ANNEXE A	Impact de la présence du lac Brome sur le régime d'écoulement de la rivière Yamaska centre .....	175
ANNEXE B	Ponction en eau de la ville de Cowansville .....	177
ANNEXE C	Correction de biais des données climatiques .....	181
ANNEXE D	Courbe élévation/stockage .....	189
ANNEXE E	Résultats supplémentaires du modèle de simulation.....	195
ANNEXE F	Débits réservés écologiques.....	199
ANNEXE G	Résultats supplémentaires de calage.....	201
ANNEXE H	Critères FVR et autres pour les simulations en période actuelle.....	205
ANNEXE I	Variations des critères FVR et autres dues aux changements climatiques .....	213
ANNEXE J	Impact des CC sur la vulnérabilité et la résilience de $Q_{min}$ .....	215

---

ANNEXE K	Résultats supplémentaires des méthodes d'adaptations .....	219
ANNEXE L	Analyse de sensibilité de la ponction en eau brute .....	231
ANNEXE M	Décalage de la crue de la période de référence.....	233
LISTE DES RÉFÉRENCES	.....	237

---



## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 - Sous-bassins versants, villes et plans d'eau de la rivière Yamaska à Farnham.....	10
Figure 2.2 - Tronçon principal de la rivière Yamaska dans le sous-bassin appalachien.....	11
Figure 2.3 - Stations météorologiques sur le bassin versant .....	13
Figure 2.4 - Barrage Foster .....	16
Figure 2.5 - Coupe d'un barrage à clapet .....	17
Figure 2.6 - Niveau journalier moyen, minimal et maximal observés du lac Brome de 2006 à 2012 .....	18
Figure 2.7 - Débits minimums selon la convention entre Lac-Brome et Bromont .....	19
Figure 2.8 - Soutirages au barrage en période de faible hydraulité .....	20
Figure 2.9 - Données de consommation en eau brute.....	22
Figure 3.1 - Conditions limites des niveaux critiques pour les prises d'eau .....	27
Figure 4.1 - Approche utilisée pour la modélisation du système.....	56
Figure 4.2 - Sous-bassins versants du modèle hydrologique .....	62
Figure 4.3 - Processus et prise de décision du modèle de simulation .....	67
Figure 4.4 - Processus de décision selon le mode de gestion de la convention .....	77
Figure 4.5 - Niveau cible au lac Brome en période de contrôle .....	78
Figure 4.6 - Processus de décision de la gestion modifiée.....	89
Figure 5.1 - Comparaison entre les débits journaliers observés et simulés pour l'année 2008 à Farnham.....	93
Figure 5.2 - Comparaison entre les débits journaliers d'apports naturels reconstitués et les débits journaliers simulés de l'année 2008 au lac Brome.....	95

Figure 5.3 - Comparaison des débits journaliers moyens des 7 projections climatiques de la période de référence (ensemble gris) et des débits journaliers moyens de la période actuelle à Bromont sur les années 1971-2000 .....	98
Figure 5.4 - Comparaison des débits journalier simulés et observés pour l'équation de seuil au barrage Foster pour la juxtaposition des périodes hivernales entre les années 2005 à 2012 .....	100
Figure 5.5 - Comparaison des débits journaliers observés et simulés avec décision selon la hauteur des clapets (équation 4.5) au barrage Foster du 24 au 29 juillet 2012.....	102
Figure 5.6 - Comparaison des débits journaliers observés et simulés pour l'équation de débit maximal au barrage Foster pour les années 2005 à 2012 .....	103
Figure 5.7 - Consommation en eau brute journalière typique modélisée pour les séries 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 et 0.35 m <sup>3</sup> /s .....	104
Figure 5.8 - Comparaison entre la consommation en eau brute observée pour l'année 2011 et la consommation typique modélisée pour le signal à 0.14 m <sup>3</sup> /s.....	106
Figure 5.9 - Comparaison des niveaux et des débits journaliers observés et simulés au lac Brome pour l'année 2008 .....	108
Figure 5.10 - Comparaison des niveaux et des débits journaliers observés et simulés au lac Brome pour l'année 2010 .....	109
Figure 5.11 - Comparaison des niveaux et des débits journaliers observés et simulés au lac Brome pour l'année 2012 .....	110
Figure 5.12 - Débits réservés écologiques journaliers au barrage Foster selon les débits $Q_{eco1}$ à $Q_{eco4}$ en fonction du jour de l'année .....	111
Figure 5.13 - Débits réservés écologiques journaliers à la CTE selon les débits $Q_{eco1}$ à $Q_{eco4}$ en fonction du jour de l'année.....	112
Figure 5.14 - Comparaison entre les contraintes, les niveaux simulés au lac Brome et débits simulés au barrage Foster et à la CTE pour les années 1971 à 2000 et pour $Q_{eco1}$ en période de contrôle (zone blanche) et en période de non-contrôle (zone grise).....	115
Figure 5.15 - Comparaison entre les contraintes, les niveaux simulés au lac Brome et débits simulés au barrage Foster et à la CTE pour les années 1971 à 2000 et pour $Q_{eco2}$ en période de contrôle (zone blanche) et en période de non-contrôle (zone grise).....	116

---

Figure 5.16 - Comparaison entre les contraintes, les niveaux simulés au lac Brome et débits simulés au barrage Foster et à la CTE pour les années 1971 à 2000 et pour $Q_{eco3}$ en période de contrôle (zone blanche) et en période de non-contrôle (zone grise) .....	117
Figure 5.17 - Comparaison entre les contraintes, les niveaux simulés au lac Brome et débits simulés au barrage Foster et à la CTE pour les années 1971 à 2000 et pour $Q_{eco4}$ en période de contrôle (zone blanche) et en période de non-contrôle (zone grise) .....	118
Figure 5.18 - Comparaison entre les contraintes et niveaux simulés des années 1980, 1998 et 1999 au lac Brome en période de contrôle (zone blanche) et en période de non-contrôle (zone grise) .....	119
Figure 5.19 - Comparaison entre les contraintes et les niveaux simulés des années 1975, 1977, 1979 et 1987 au lac Brome en période de contrôle (zone blanche) et en période de non-contrôle (zone grise) .....	119
Figure 5.20 - Critères FVR saisonniers à la CTE pour la période actuelle sur les années 1971 à 2000 pour les neuf débits de consommation en eau brute simulés en considérant $Q_{eco1}$ .....	120
Figure 5.21 - Critères FVR saisonniers à la CTE pour la période actuelle sur les années 1971 à 2000 pour les neuf débits de consommation en eau brute simulés en considérant $Q_{eco2}$ .....	122
Figure 5.22 - Critères FVR saisonniers à la CTE pour la période actuelle sur les années 1971 à 2000 pour les neuf débits de consommation en eau brute simulés en considérant $Q_{eco3}$ .....	122
Figure 5.23 - Critères FVR saisonniers à la CTE pour la période actuelle sur les années 1971 à 2000 pour les neuf débits de consommation en eau brute simulés en considérant $Q_{eco4}$ .....	123
Figure 5.24 - Comparaison des températures moyennes mensuelles en période de référence (1971-2000) et en période future (2041-2070) de la station 725453 selon les 7 projections climatiques.....	128
Figure 5.25 - Comparaison entre la somme des précipitations mensuelles moyennes en période de référence (1971-2000) et en période future (2041-2070) de la station la station 725453 selon les 7 projections climatiques .....	129
Figure 5.26 - Précipitations annuelles liquides et solides en période de référence (1971-2000) et en période future (2041-2070) de la station 725453 selon les 7 projections climatiques.	130
Figure 5.27 - Comparaison entre le débit mensuel moyen en période de référence (1971-2000) et futur (2041-2070) à la CTE selon les 7 projections climatiques.....	131

---

- Figure 5.28 - Comparaison entre les indicateurs de faibles débits en période de référence (1971-2000) et en période future (2041-2070) à la CTE selon les 7 projections climatiques 132
- Figure 5.29 - Incertitude et niveaux journaliers moyens selon les 7 projections climatiques en période de référence (1971-2000) et en période future (2041-2070) au lac Brome selon  $Q_{eco1}$  ..... 134
- Figure 5.30 - Comparaison entre les niveaux journaliers moyens au lac Brome selon les 7 projections climatiques de la période de référence (1971-2000) et de la période future (2041-2070) selon  $Q_{eco1}$ ..... 135
- Figure 5.31 - Critères FVR saisonniers sur le niveau minimal estival au lac Brome en périodes de référence (1971-2000) et future (2041-2070) pour  $Q_{eco1}$  selon les neuf débits de consommation en eau brute simulés..... 136
- Figure 5.32 - Critères FVR saisonniers sur le niveau minimal estival au lac Brome en périodes de référence (1971-2000) et future (2041-2070) pour  $Q_{eco3}$  selon les neuf débits de consommation en eau brute simulés..... 136
- Figure 5.33 - Fiabilité saisonnière sur la contrainte de débit minimal à la CTE en période de référence (1971-2000) et en période future (2041-2070) pour  $Q_{eco1}$  et selon les neuf débits de consommation en eau brute simulés..... 138
- Figure 5.34 - Fiabilité saisonnière sur la contrainte de débit minimal à la CTE en période de référence (1971-2000) et en période future (2041-2070) pour  $Q_{eco1}$  et selon les neuf débits de consommation en eau brute simulés..... 139
- Figure 5.35 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour  $Q_{eco1}$  en période actuelle (1971-2000) et avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE ..... 141
- Figure 5.36 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour  $Q_{eco3}$  en période actuelle (1971-2000) et avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE ..... 141
- Figure 5.37 - Comparaison entre les contraintes, le niveau cible, le niveau journalier moyen en période future (2041-2070) avec et sans la méthode d'adaptation 1 pour  $Q_{eco1}$  ..... 144
- Figure 5.38 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour  $Q_{eco1}$  en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode
-



d'adaptation 1 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE .....145

Figure 5.39 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour Q<sub>eco3</sub> en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode d'adaptation 1 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE .....146

Figure 5.40 - Comparaison entre les contraintes, le niveau cible, le niveau journalier moyen en période future (2041-2070) avec et sans la méthode d'adaptation 2 pour Q<sub>eco1</sub>.....147

Figure 5.41 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour Q<sub>eco1</sub> en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode d'adaptation 2 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE .....148

Figure 5.42 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour Q<sub>eco3</sub> en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode d'adaptation 2 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE .....149

Figure 5.43 - Comparaison entre les contraintes, le niveau cible, le niveau journalier moyen en période future (2041-2070) avec et sans la méthode d'adaptation 3 pour Q<sub>eco1</sub>.....151

Figure 5.44 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour Q<sub>eco1</sub> en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode d'adaptation 3 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE .....152

Figure 5.45 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour Q<sub>eco3</sub> en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode d'adaptation 3 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE .....153

Figure 5.46 - Comparaison entre les contraintes, le niveau cible, le niveau journalier moyen en période future (2041-2070) avec et sans la méthode d'adaptation 4 pour Q<sub>eco1</sub>.....154

Figure 5.47 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour Q<sub>eco1</sub> en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode d'adaptation 4 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE .....156

---

- Figure 5.48 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour  $Q_{eco3}$  en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode d'adaptation 4 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE ..... 157
- Figure 5.49 - Comparaison entre les contraintes, le niveau cible, le niveau journalier moyen en période future (2041-2070) avec et sans la méthode d'adaptation 5 pour  $Q_{eco1}$  ..... 158
- Figure 5.50 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour  $Q_{eco1}$  en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode d'adaptation 5 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE ..... 160
- Figure 5.51 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour  $Q_{eco3}$  en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode d'adaptation 5 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE ..... 161
- Figure 5.52 - Comparaison d'extraits de soutirages au barrage Foster pour les méthodes d'adaptation 5.1 et 5.3 ..... 163
- Figure 5.53 - Comparaison entre les contraintes, le niveau cible, le niveau journalier moyen en période future (2041-2070) avec et sans la méthode d'adaptation 6 pour  $Q_{eco1}$  ..... 164
- Figure 5.54 - Comparaison entre les contraintes, le niveau cible, le niveau journalier moyen en période future (2041-2070) avec et sans la méthode d'adaptation 6 pour  $Q_{eco3}$  ..... 165
- Figure 5.55 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour  $Q_{eco1}$  en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode d'adaptation 6 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE ..... 167
- Figure 5.56 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour  $Q_{eco3}$  en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode d'adaptation 6 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE ..... 168
-

# LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 - Données de niveaux disponibles au lac Brome .....	14
Tableau 2.2 - Données de débits disponibles sur la rivière Yamaska dans le sous-bassin appalachien .....	14
Tableau 2.3 - Données de débits disponibles ailleurs sur la rivière Yamaska .....	15
Tableau 2.4 - Contraintes de niveaux au lac Brome .....	19
Tableau 3.1 - Indices et périodes des débits réservés écologiques selon la méthode échohydrologique.....	30
Tableau 3.2 - Indices et périodes retenus des débits réservés écologiques selon la méthode échohydrologique.....	30
Tableau 3.3 - Indices et périodes des débits réservés écologiques selon la méthode du Vermont.....	30
Tableau 3.4 - Indices et périodes des débits réservés écologiques selon la méthode française .....	31
Tableau 3.5 - Indices et périodes des débits réservés écologiques selon le critère de conditions passables de la méthode du Montana .....	31
Tableau 4.1 - Projections climatiques du modèle NARCCAP utilisées pour le projet .....	57
Tableau 4.2 - Options de contrôle et données pour évaluer la performance du module de gestions selon la convention .....	79
Tableau 4.3 - Options de contrôle et données pour évaluer le débit prélevable actuel .....	82
Tableau 4.4 - Saisons pour l'analyse de la performance du système .....	82
Tableau 4.5 - Options de contrôle et données pour évaluer l'impact des CC sur la gestion du système.....	83
Tableau 4.6 - Mesure d'adaptation 1 : Devancement de la période de contrôle .....	84
Tableau 4.7 - Mesure d'adaptation 2 : Diminution de l'intervalle de temps de gestion .....	85

Tableau 4.8 - Mesure d'adaptation 3 : Devancement de la période de contrôle et diminution de l'intervalle de temps de gestion .....	86
Tableau 4.9 - Mesure d'adaptation 4 : Augmentation du niveau cible en période estivale ....	86
Tableau 4.10 - Mesure d'adaptation 5 : Augmentation débit minimum.....	87
Tableau 4.11 - Mesure d'adaptation 6 : Contrôle au barrage sur toute l'année.....	88
Tableau 5.1 - Critères de Nash, de Nash sur les logarithmes et de biais du modèle hydrologique à Farnham pour la période de calage (1998-2012) et de validation (1986- 1996) .....	93
Tableau 5.2 - Validation supplémentaire du critère de Nash et de biais du modèle hydrologique au lac Brome pour la période 2005 à 2012 .....	94
Tableau 5.3 - Critères de Nash du modèle hydrologique à Farnham calculés entre les débits observés et les débits simulés avec les données d'Environnement Canada et entre les débits observés et les débits simulés avec les données du CEHQ.....	96
Tableau 5.4 - Critères de Nash du modèle hydrologique à au lac Brome calculés entre les débits observés et les débits simulés avec les données d'environnement canada et entre les débits observés et les débits simulés avec les données du CEHQ.....	96
Tableau 5.5 - Valeur retenues des paramètres pour l'équation de seuil (équation 4.2) .....	99
Tableau 5.6 - Valeur des paramètres pour l'équation de débit d'évacuation maximal (équation 4.6).....	102
Tableau 5.7 - Valeur des paramètres pour l'équation de niveau-stockage (équation 4.7) ....	103
Tableau 5.8 - Fiabilité sur le niveau minimal estival au lac Brome ainsi que sur le débit minimal saisonnier à la CTE pour le débit 0.25 m <sup>3</sup> /s selon les 4 débits réservés écologiques (%) .....	124
Tableau 5.9 - Dépassement de contraintes maximal sur le niveau minimal estival au lac Brome ainsi que sur le débit minimal saisonnier à la CTE pour le débit 0.25 m <sup>3</sup> /s selon les 4 débits réservés écologiques (%).....	124

---

Tableau 5.10 - Nombre de jours consécutifs de dépassement maximal du niveau minimal estival au lac Brome ainsi que du débit minimal saisonnier à la CTE pour le débit 0.25 m <sup>3</sup> /s selon les 4 débits réservés (jours) .....	125
Tableau 5.11 - Variation de la fiabilité entre la période de référence (1971-2000) et la période future (2041-2070) sur le niveau minimal estival au lac Brome ainsi que sur le débit minimal saisonnier à la CTE pour le débit 0.25 m <sup>3</sup> /s selon les débits réservés écologiques Q <sub>eco1</sub> et Q <sub>eco3</sub> (%) .....	140
Tableau 5.12 - Variation de la fiabilité de la période future (2041-2070) sans et avec la méthode d'adaptation 1 sur le niveau minimal estival au lac Brome ainsi que sur le débit minimal saisonnier à la CTE pour le débit 0.25 m <sup>3</sup> /s selon les débits réservés écologiques Q <sub>eco1</sub> et Q <sub>eco3</sub> (%) .....	145
Tableau 5.13 - Variation de la fiabilité de la période future (2041-2070) sans et avec la méthode d'adaptation 2 sur le niveau minimal estival au lac Brome ainsi que sur le débit minimal saisonnier à la CTE pour le débit 0.25 m <sup>3</sup> /s selon les débits réservés écologiques Q <sub>eco1</sub> et Q <sub>eco3</sub> (%) .....	148
Tableau 5.14 - Variation de la fiabilité de la période future (2041-2070) sans et avec la méthode d'adaptation 3 sur le niveau minimal estival au lac Brome ainsi que sur le débit minimal saisonnier à la CTE pour le débit 0.25 m <sup>3</sup> /s selon les débits réservés écologiques Q <sub>eco1</sub> et Q <sub>eco3</sub> (%) .....	151
Tableau 5.15 - Variation de la fiabilité de la période future (2041-2070) sans et avec la méthode d'adaptation 4 sur le niveau minimal estival au lac Brome ainsi que sur le débit minimal saisonnier à la CTE pour le débit 0.25 m <sup>3</sup> /s selon les débits réservés écologiques Q <sub>eco1</sub> et Q <sub>eco3</sub> (%) .....	155
Tableau 5.16 - Variation de la fiabilité de la période future (2041-2070) sans et avec la méthode d'adaptation 5 sur le niveau minimal estival au lac Brome ainsi que sur le débit minimal saisonnier à la CTE pour le débit 0.25 m <sup>3</sup> /s selon les débits réservés écologiques Q <sub>eco1</sub> et Q <sub>eco3</sub> (%) .....	159
Tableau 5.17 - Variation de la fiabilité de la période future (2041-2070) sans et avec la méthode d'adaptation 6 sur le niveau minimal estival au lac Brome ainsi que sur le débit minimal saisonnier à la CTE pour le débit 0.25 m <sup>3</sup> /s selon les débits réservés écologiques Q <sub>eco1</sub> et Q <sub>eco3</sub> (%) .....	166

---

Tableau 5.18 - Fiabilité pour les 9 débits de consommation en brute simulés en période future (2041-2070) considérant l'impact des changements climatiques et l'impact de la méthode d'adaptation 6 (%) .....	169
---	-----

---

# LISTE DES ACRONYMES

---

Acronyme	Définition
CC	Changements climatiques
CEHQ	Centre d'expertise hydrique du Québec
CTE	Centrale de traitement des eaux de Bromont
DNEC	Données numériques d'élévation du Canada
EC	Environnement Canada
FVR	Fiabilité, Vulnérabilité, Résilience
ITC	Inventaire des terres du Canada
SCE-UA	<i>Shuffled Complex Evolution</i> de l'Université de l'Arizona.
SWAT	<i>Soil and Water Assessment Tool</i>
UHR	Unité hydrologique représentative

---





# CHAPITRE 1 INTRODUCTION

## 1.1 Mise en contexte et problématique

Selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, il est sans équivoque qu'un réchauffement du système climatique se produit et qu'il est dû aux activités anthropiques depuis la révolution industrielle. À l'échelle mondiale, il est possible d'observer des hausses de température de l'atmosphère et de l'océan, une fonte massive de neige et de glace et une élévation du niveau de la mer [GIEC, 2007] . À l'échelle régionale, différents impacts sur les systèmes hydrologiques sont observables. Pour le centre sud du Canada, la fréquence d'occurrence des débits situés en deçà du cinquième centile augmentera de 60 à 100 % de 2046 à 2065 et de 100 à 160 % de 2081 à 2100 [Cheng *et al.*, 2011] . L'atlas hydroclimatique du Québec méridional indique quant à lui une diminution de 15% du débit d'étiage pour l'été et l'automne [CEHQ, 2013] .

Les étiages sévères peuvent se traduire par deux dangers principaux pour les prises d'eau municipales. Le premier consiste en un débit trop faible ne pouvant subvenir à la fois aux besoins de la municipalité et à la protection du milieu naturel. Le deuxième consiste en une qualité d'eau moindre, puisque la charge polluante demeure la même pour un volume d'eau réduit. Le facteur de dilution se voit ainsi réduit. Ces deux dangers entraînent la dégradation du milieu naturel et le deuxième peut entraîner des coûts de traitement de l'eau potable plus élevés.

En parallèle aux différents impacts des changements climatiques, les villes dans le sud-ouest du Québec se développent. La population de la ville de Bromont était de 6 049 habitants en 2006 et le taux de croissance était de 25.8 % entre 2001 et 2006. [Statistique Canada, 2007] . Une tendance similaire est observée de 2006 à aujourd'hui. Le nombre de permis de construction a bondi de 100/année à 250/année pour accommoder la demande. La

consommation en eau brute de la ville suit nécessairement la même tendance : entre 2001 et 2011, le débit moyen prélevé en eau brute est passé de 0.05 m<sup>3</sup> /s à 0.07 m<sup>3</sup>/s.

Selon Rousseau *et al.* [2004], les pressions sur les prises d'eau sont telles que certaines municipalités du Québec font face, en période de fort étiage estival et/ou de forte demande ponctuelle ou continue, à des problématiques d'approvisionnement en eau potable. Ainsi, des questions quant à la vulnérabilité des prises d'eau potable en rivière doivent être soulevées. Parmi celles-ci, il est possible de se demander où se situe la limite de consommation en eau brute d'une ville. Pour une municipalité, l'épuisement de la ressource hydrique peut être synonyme de limite de croissance, tel qu'illustré dans le plan de gestion de l'eau de la ville d'Okotoks en Alberta [Okotoks, 2011] . De ce fait, la prévision d'un débit maximal pouvant être soutiré dans une rivière permet une planification globale du périmètre urbanisé et des infrastructures urbaines.

---

## 1.2 Définition du projet de recherche

En France, depuis 2006, les bassins versants situés en zone de répartition des eaux ainsi que les bassins versants considérés en déséquilibre quantitatif doivent se doter de mesures de gestion pour les prélèvements en eau brute. Une zone de répartition des eaux est un territoire où est constatée une insuffisance des ressources en eau par rapport aux besoins. Ces mesures de gestion sont dues à la loi sur l'eau et les milieux aquatiques, au décret n° 2007-1381 et à la circulaire ministérielle relative à la résorption des déficits quantitatifs en matière de prélèvement d'eau et à la gestion collective des prélèvements d'irrigation. Ainsi, les bassins versants doivent se doter d'organismes de gestion et effectuer une étude de volume maximal prélevable. Avec cette dernière, l'objectif est de respecter 8 années sur 10 les débits fixés sur les différents territoires [Eaucéa, 2007] .

Au Québec, la *Directive 001* et le *Guide de conception des installations de production d'eau potable* encadrent les ponctions d'eau brute en rivière. Pour l'eau potable, une municipalité peut pomper jusqu'à 15 % du 7Q2 originel d'une rivière. Les conditions originelles font référence au débit de la rivière en ne considérant aucun prélèvement en amont. Le 7Q2 est un indice d'étiage couramment utilisé au Québec, il représente le débit minimum moyen calculé sur 7 jours consécutifs et de récurrence 2 ans. Lorsque des ouvrages hydriques sont présents sur une rivière, le régime d'écoulement naturel est modifié. Par exemple, avec un réservoir en eau, il est possible d'effectuer du soutien à l'étiage. Ceci a comme impact d'augmenter le débit lors des périodes critiques d'étiage pour améliorer la qualité de l'eau, pour protéger la faune et la flore et pour soutenir un débit minimal à des fins d'approvisionnement en eau brute. Le site internet du CEHQ [CEHQ, 2003] propose différentes méthodes pour évaluer le 7Q2 d'une rivière en fonction des ouvrages hydriques en présence. Selon la *Directive 001* et le *Guide de conception des installations de production d'eau potable*, advenant le cas où le débit d'eau déterminé avec la méthode du 7Q2 est insuffisant, il est possible de démontrer, par des méthodes plus évoluées comme les

---

méthodes hydrauliques et les méthodes d'habitats préférentiels, que le débit écologique nécessaire pour le maintien des écosystèmes existants est inférieur à celui établi par la méthode du 7Q2.

La ville de Bromont a été sélectionnée pour effectuer l'étude en raison de sa croissance importante au cours des dernières années. De plus, elle prélève son eau de la rivière Yamaska : cette dernière est reconnue pour avoir des étiages sévères en période estivale. À la prise d'eau de la ville de Bromont, une partie de l'eau provient du barrage Foster au lac Brome et l'autre partie provient du bassin versant intermédiaire. Le certificat d'autorisation de la ville de Bromont est présentement de 0.25 m<sup>3</sup>/s. Comme la ville de Bromont possède déjà son certificat d'autorisation, la méthode du 7Q2 n'est pas revisitée. Cette étude propose une nouvelle approche pour la détermination du débit prélevable dans une rivière. Le projet de recherche suivant tente de déterminer quel débit peut être soutiré à la prise d'eau de la ville de Bromont en considérant l'impact des changements climatiques, et ce, sans compromettre l'intégrité du milieu naturel. Le lac Brome est utilisé pour effectuer du soutien à l'étiage. Le projet considère uniquement les ouvrages hydriques déjà en place. Aucune proposition quant à la mise en place de nouveaux ouvrages n'est effectuée. Finalement, une approche par modélisation est retenue pour deux raisons. Le manque de données observées aux points d'intérêts de l'étude constitue l'une d'entre elles. L'approche par modélisation est également nécessaire pour effectuer une analyse en changement climatique.

---

### 1.3 Objectif du projet de recherche

L'objectif du projet de recherche est de déterminer le débit ultime pouvant être prélevé à la prise d'eau de la ville de Bromont en considérant l'impact des changements climatiques et en respectant l'intégrité du milieu naturel. Trois étapes sont nécessaires à l'atteinte de cet objectif. Dans un premier temps, le débit maximal pouvant être prélevé actuellement est déterminé. Cette étape se base sur les données de climat observées, elle ne considère pas l'impact des changements climatiques. Ensuite, l'impact des changements climatiques est quantifié sur les précipitations, sur les températures, sur les débits, sur la gestion du réservoir et sur le débit maximal prélevable. Finalement, des mesures d'adaptation aux changements climatiques sont proposées. Avec ces dernières, il est possible de déterminer le débit ultime pouvant être prélevé.

---

## 1.4 Contributions originales

Jusqu'à ce jour au Québec, des auteurs se sont intéressés à la vulnérabilité des prises d'eau en rivière face aux changements climatiques [Nantel, 2006; J. Bérubé, 2007; Carriere *et al.*, 2007] . Ceux-ci s'intéressent au débit prélevé actuellement et/ou autorisé au certificat d'autorisation de la ville sans se demander si ce débit pourrait être augmenté sans avoir d'impacts sur l'intégrité du milieu naturel.

Ce projet détermine l'impact des changements climatiques sur le bassin versant du tronçon centre de la rivière Yamaska et sur le lac Brome. Les recherches sur l'impact des changements climatiques sur la gestion des réservoirs en eau sont peu nombreuses. Payne *et al.* [2004] et Schaefli *et al.* [2007] sont les pionniers dans le domaine. Au Québec, Fortin *et al.* [2007] ont étudié les lacs St-François et Aylmer et Minville *et al.* [2010] ont étudié le système hydrique de la rivière Péribonka et ses réservoirs. Les recherches ont surtout été effectuées sur de très gros systèmes hydriques. Il est intéressant de s'attarder au lac Brome puisqu'il est un lac de tête sur un petit bassin versant.

---

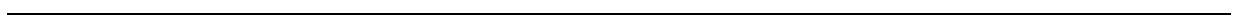
## 1.5 Plan du document

Le chapitre 2 présente le site de l'étude. L'information contenue dans ce chapitre a pour but de faciliter la compréhension de la structure du chapitre de l'état de l'art et des choix de modélisation effectués.

Le chapitre 3, séparé en cinq sous-chapitres, présente l'état de l'art. Le sous-chapitre 3.1 survole le phénomène hydrologique de l'étiage et l'impact des changements climatiques sur ce dernier. Même si le projet utilise un réservoir comme technique de soutien à l'étiage, il a été jugé intéressant d'effectuer un survol des autres techniques de soutien à l'étiage au sous-chapitre 3.2. Le sous-chapitre 3.3 s'attarde à la gestion des réservoirs et à l'impact des changements climatiques sur celle-ci. Vu le manque de données observées au site de l'étude, le sous-chapitre 3.4 effectue un survol des techniques utilisées pour reconstituer les apports naturels sur un site donné. Le sous-chapitre 3.5 présente la modélisation hydrologique puisqu'il s'agit de la technique de reconstitution des apports naturels retenue pour le projet.

Le chapitre 4 présente la méthodologie utilisée dans le projet. La modélisation climatique, la modélisation hydrologique, le modèle de simulation, la modélisation de la consommation en eau et le module de gestion du réservoir sont présentés dans les cinq premiers sous-chapitres. Les sous-chapitres 4.6 à 4.8 s'attardent à présenter la méthodologie utilisée pour parvenir aux objectifs de recherche. Le chapitre 5 présente les résultats de l'étude en suivant la même structure que le chapitre 4. Ainsi, les résultats de modélisation sont présentés aux sous-chapitres 5.1 à 5.5 et les résultats de recherche sont présentés aux sous-chapitres 5.6 à 5.8. Finalement, le chapitre 6 conclut le document.

---





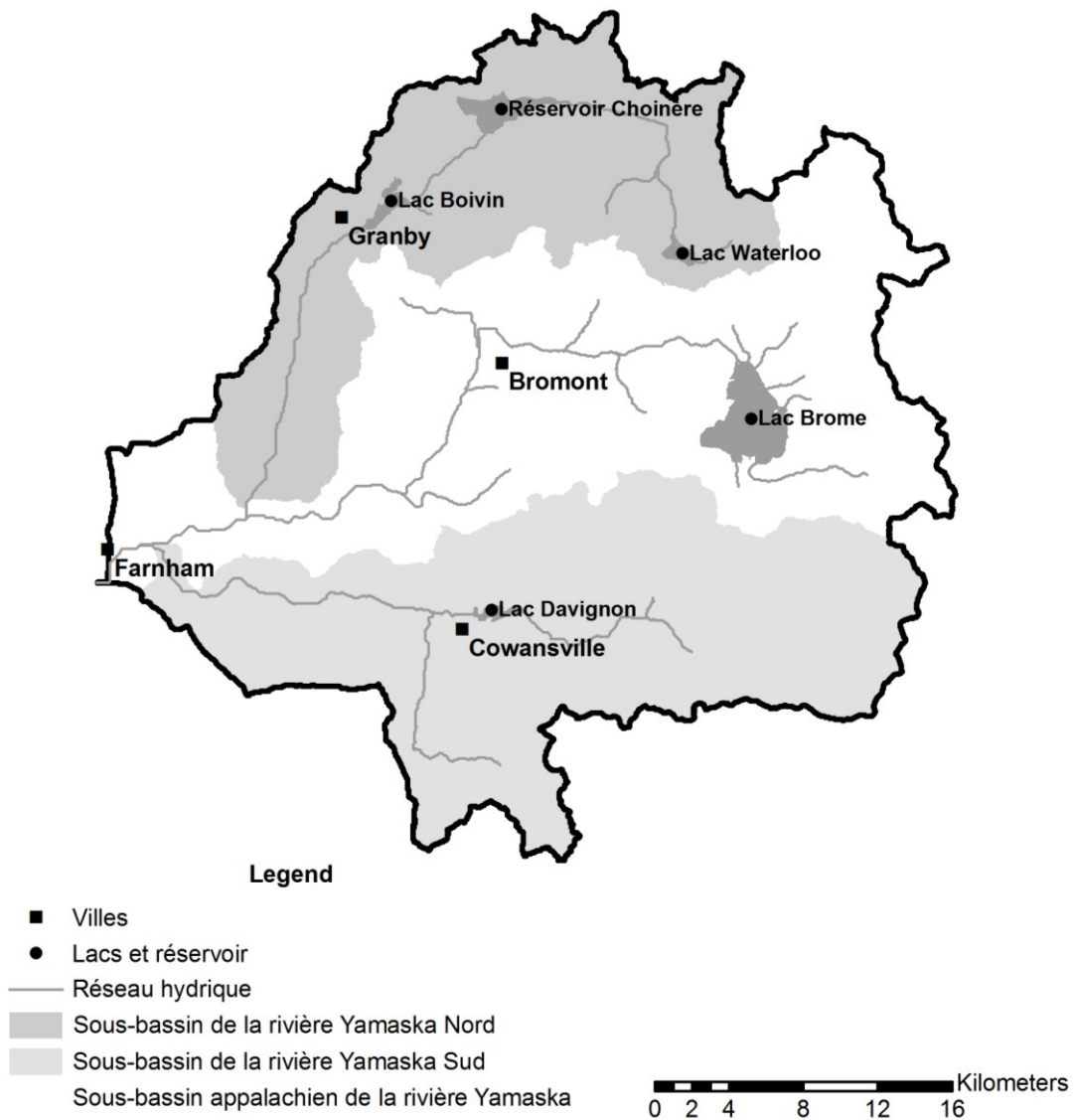
## CHAPITRE 2 DESCRIPTION DU SITE DE L'ÉTUDE

Ce chapitre a pour but de présenter l'information relative au bassin versant à l'étude afin de faciliter la compréhension des différents sous-chapitres de l'état de l'art et des choix de modélisation. Les informations générales du bassin versant sont tout d'abord présentées. Ensuite, les données hydriques disponibles pour effectuer l'étude et les informations relatives à la gestion des ouvrages sur le tronçon de rivière à l'étude sont discutées.

### 2.1 Le bassin versant

La ville de Bromont est située dans le bassin versant de la rivière Yamaska. Ce bassin versant couvre une superficie de 4 784 km<sup>2</sup> et son exutoire est situé dans le fleuve St-Laurent en aval de Sorel-Tracy. La ville de Bromont est située dans le sous-bassin appalachien de la rivière Yamaska présenté à la figure 2.1. Ce sous-bassin ainsi que les sous-bassins de la rivière Yamaska Nord et de la rivière Yamaska Sud-Est se jettent dans le sous-bassin de la rivière Yamaska basses-terres à Farnham [OBV Yamaska, 2013] . À la hauteur de Farnham, l'occupation du sol est principalement de la forêt à 53% et de l'agriculture à 34%. Le territoire urbanisé compte pour environ 10% de la superficie. Quelques plans d'eau sont présents sur le sous-bassin versant, notamment, le réservoir Choinière, le lac Boivin, le lac Waterloo, le lac Brome et le lac Davignon.

La prise d'eau de la ville de Bromont est située sur le tronçon principal de la rivière Yamaska dans le sous-bassin versant appalachien. L'eau brute puisée dans la rivière est traitée à la Centrale de traitement des eaux de Bromont (CTE) et distribuée dans la ville. Après utilisation, l'eau retourne à la rivière par l'entremise des étangs aérés et du ruisseau Dozois à 8 km en aval de la CTE. Le débit du tronçon de rivière à l'étude est contrôlé en partie par le barrage Foster situé à 25 km en amont à l'exutoire du lac Brome tel que présenté à la figure 2.2.



**Figure 2.1 - Sous-bassins versants, villes et plans d'eau de la rivière Yamaska à Farnham**

Ski Bromont possède également une prise d'eau sur le tronçon de rivière. Cette dernière est située au lac Sheffington, entre la prise d'eau de la ville de Bromont et le barrage Foster. La

superficie des sous-bassins versants est respectivement de 188 km<sup>2</sup>, 267 km<sup>2</sup> et 348 km<sup>2</sup> au barrage Foster, au lac Sheffington et à la CTE.

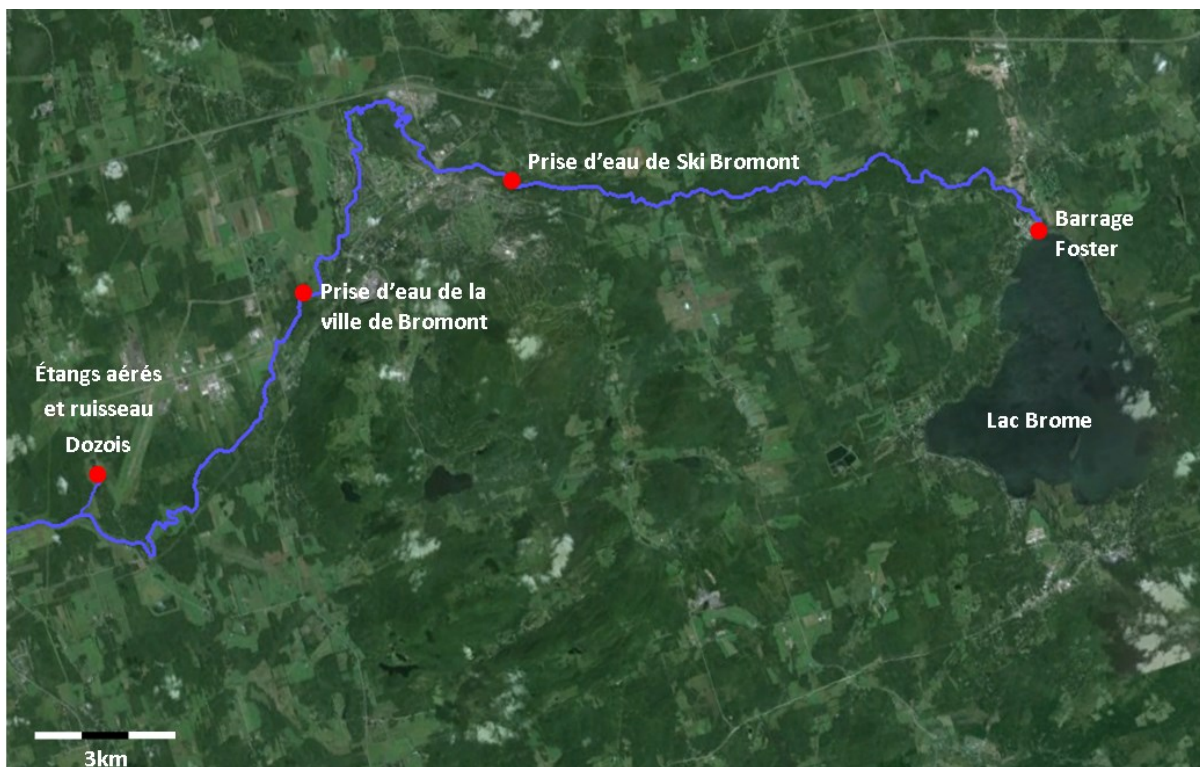


Figure 2.2 - Tronçon principal de la rivière Yamaska dans le sous-bassin appalachien

## 2.2 Les données disponibles sur le bassin versant

### 2.2.1 Les données météorologiques

Deux séries de données météorologiques observées sont disponibles sur le bassin versant. Cinq stations d'Environnement Canada, soit celle de Bonsecours, de Granby, de Farnham, de Sutton et de Brome constituent la première série de données. Ces données sont disponibles respectivement de 1967, 1948, 1917, 1978 et 1875 jusqu'à 2012.

La deuxième série est une grille du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) créée en interpolant les observations d'Environnement Canada. La méthode d'interpolation utilisée est un krigeage. La particularité de cette grille est qu'elle se superpose parfaitement aux sorties des modèles climatiques. Cette grille est disponible de 1971 à 2010. L'emplacement des stations d'Environnement Canada (EC) et du krigeage du CEHQ (CC) est présenté à la figure 2.3.

### 2.2.2 Les données hydriques

Pour répondre aux objectifs, un modèle hydrologique sera utilisé. Celui-ci sera présenté au sous-chapitre 4.2. Selon les règles de l'art, les modèles hydrologiques nécessitent des séries de débits en rivière sur une période de trente ans pour effectuer le calage et la validation. La climatologie est jugée comme étant représentative sur une telle période. Des séries de données observées de 10 années minimum sont également nécessaires pour effectuer des analyses en périodes d'étiages, soit pour calculer les indices statistiques tels que le 7Q2.

---

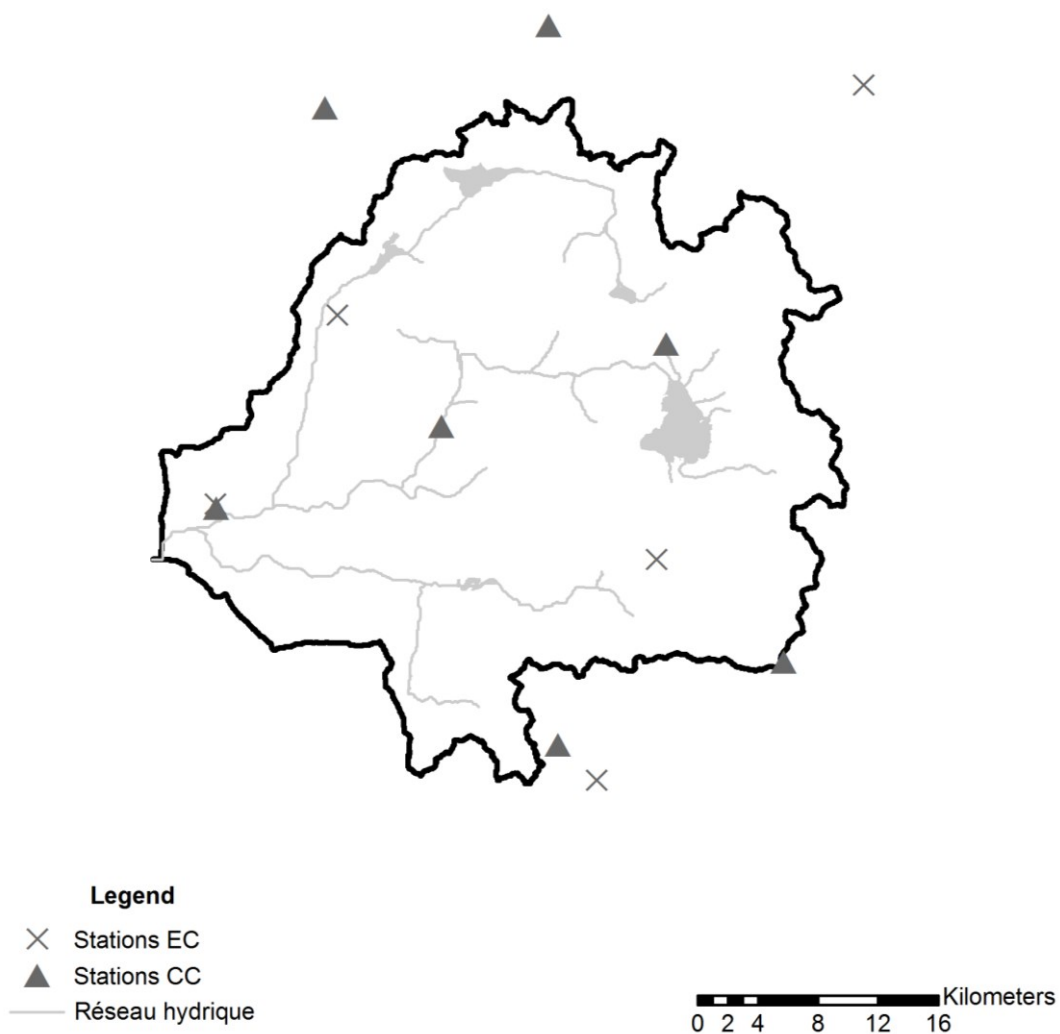


Figure 2.3 - Stations météorologiques sur le bassin versant

Le manque de données hydriques observées au lac Brome constitue une problématique supplémentaire pour le projet. Les données disponibles dans le sous-bassin versant appalachien de la rivière Yamaska sont fournies par le CEHQ et elles sont présentées aux tableaux 2.1 et 2.2. Les niveaux du réservoir ont été enregistrés sur des périodes de temps discontinues. Les débits sont également disponibles sur des périodes de temps discontinues.

---

La série d'apports naturels peut être reconstituée lorsque la bathymétrie, les niveaux d'eau du lac ainsi que les débits au barrage sont connus. Dans les 30 dernières années, il est possible d'effectuer cet exercice uniquement de 2005 à aujourd'hui. Le sous-chapitre 3.4 présente les techniques utilisées pour reconstituer les séries d'apports naturels pour résoudre le problème du manque de données.

**Tableau 2.1 - Données de niveaux disponibles au lac Brome**

Numéro de station	Période de temps	Endroit
030307	1966-1995	329 chemin Lakeside
030310	1947-1965	Rue Saint-Jude et rue Bondville
030312	1935-1956	Au barrage Foster
030350	2005 à aujourd'hui	Plage de la ville de Lac-Brome

D'autres stations hydrométriques sont présentes ailleurs sur le bassin versant de la rivière Yamaska; le détail de ces stations de mesure est présenté au tableau 2.3. Il est à noter que le tableau ne présente pas toutes les stations disponibles sur le bassin versant, mais seulement les stations d'intérêts pour le projet.

**Tableau 2.2 - Données de débits disponibles sur la rivière Yamaska dans le sous-bassin appalachien**

Numéro de station	Période de temps	Endroit
030301	1968-1973	1 km en aval du barrage Foster
030351	2005 à aujourd'hui	1 km en aval du barrage Foster

**Tableau 2.3 - Données de débits disponibles ailleurs sur la rivière Yamaska**

<b>Numéro de station</b>	<b>Période de temps</b>	<b>Endroit</b>
<b>030314</b>	1968 à aujourd'hui	Cowansville
<b>030302</b>	1962 à aujourd'hui	Farnham
<b>030309</b>	1974 à aujourd'hui	En aval du réservoir Choinière

## 2.3 La gestion hydrique actuelle sur le bassin versant

### 2.3.1 Le lac Brome et le barrage Foster

Le barrage Foster, présenté à la figure 2.4, est un barrage à clapet et appartient à la municipalité de Lac-Brome. Le contrôle du barrage s'effectue de la mi-avril à la fin novembre. L'absence de portes chauffantes ne permet pas de contrôle en période hivernale. Une coupe est présentée à la figure 2.5 pour présenter le fonctionnement d'un barrage à clapet.



**Figure 2.4 - Barrage Foster [Renaissance Lac Brome,2014]**

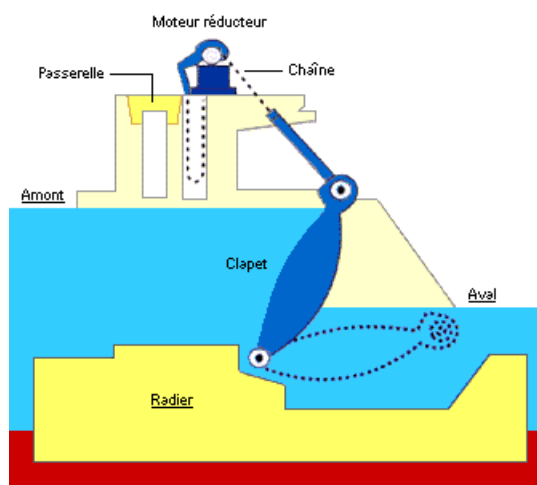
La figure 2.6 présente les niveaux moyens journaliers du lac pour les 7 années de données de la station 030350 et permet d'apprécier la gestion actuelle du lac. Les lignes pointillées représentent les minimum et maximum journaliers observés au cours de cette période.

Au printemps, il est possible d'observer un remplissage progressif du lac. En période estivale, une élévation fixe est souhaitée au lac Brome pour des fins récréatives. La vidange progressive du lac est entamée au début du mois de septembre en vue de la préparation du

---



barrage pour la période hivernale. En période hivernale, les clapets du barrage sont complètement abaissés. Les contraintes de niveaux au lac Brome sont présentées au tableau 2.4.



**Figure 2.5 - Coupe d'un barrage à clapet**

[Voie navigable de France, 2014]

Les dates de contrôle peuvent varier d'année en année, l'opérateur du barrage décidant des dates de début et de fin. La date de début est principalement dictée par le moment où il n'y a plus de glace au barrage. Selon les données observées, le contrôle débute en moyenne le 19 avril et se termine le 30 novembre. En période de non contrôle, les débits au barrage sont dictés par les apports naturels au lac puisque les portes de ce dernier sont complètement ouvertes. En période de contrôle, l'opérateur du barrage effectue un contrôle lorsque nécessaire. L'intervalle de temps de gestion peut varier d'un à quelques jours. En période de forte hydraulité, les débits au barrage sont ceux permettant d'atteindre le niveau cible et ceux permettant de conserver ce dernier par la suite. Les débits minimums du barrage Foster sont régis par une convention entre la ville de Bromont et le lac Brome. La figure 2.7 présente les règles de gestion de la convention. Selon cette convention, le débit minimum

---

imposé au barrage Foster est de  $0.88 \text{ m}^3/\text{s}$ . Cette valeur peut être abaissée en fonction du mois de l'année, du niveau du lac et si l'approvisionnement en eau brute de la ville de Bromont le permet. Par exemple, au mois de mai, le niveau doit être en deçà de  $196,90 \text{ m}$  pour que le débit puisse être abaissé à  $0,76 \text{ m}^3/\text{s}$ , et ce, si l'approvisionnement en eau de la ville de Bromont le permet. Les débits réservés écologiques en aval du lac Brome ne sont pas connus. Les débits minimums de la convention sont établis depuis longtemps et servent en quelque sorte à protéger le milieu aquatique.

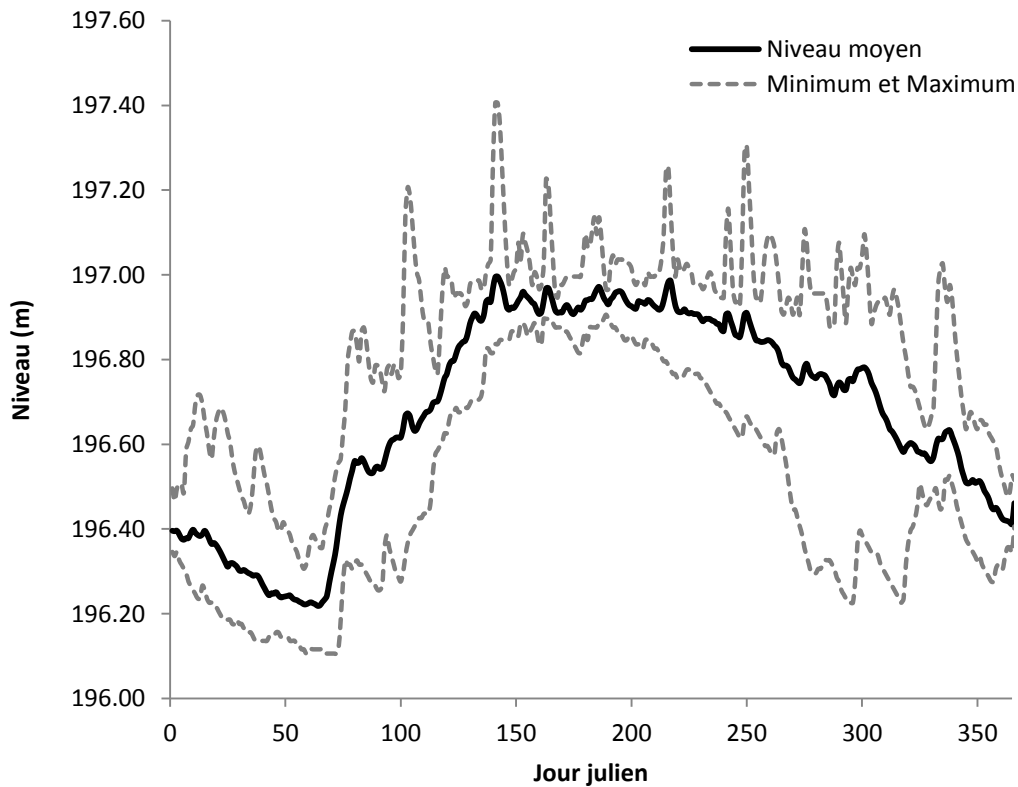


Figure 2.6 - Niveau journalier moyen, minimal et maximal observés du lac Brome de 2006 à 2012

Tableau 2.4 - Contraintes de niveaux au lac Brome

Contraintes	Élévation (m)	Période	Usage
Niveau minimal	196.70	Juin à août	Navigation
Niveau cible	196.90	Juin à août	Récréation
Niveau maximal	197.30	En tout temps	Inondations

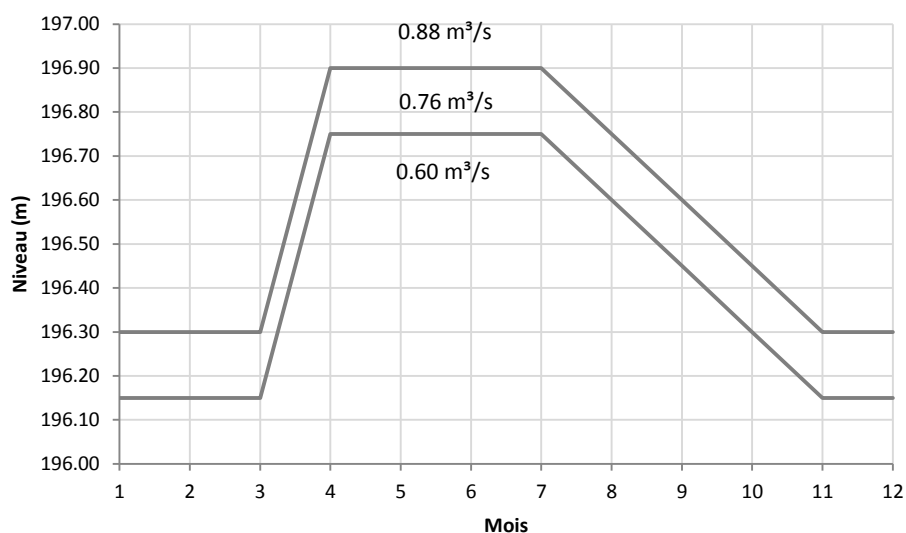


Figure 2.7 - Débits minimums selon la convention entre Lac-Brome et Bromont

Actuellement, en période de faible hydraulicité, la ville de Bromont demande à la municipalité de Lac-Brome de toujours fournir 0.88 m<sup>3</sup>/s pour assurer la qualité de l'approvisionnement en eau brute. De ce fait, le débit est d'environ 1.00 m<sup>3</sup>/s lors de la journée de contrôle et s'abaisse vers 0.88 m<sup>3</sup>/s lors des journées subséquentes. Il est possible d'observer cette tendance à la figure 2.8.

Dans ce projet, le lac Brome est utilisé comme technique de soutien à l'étiage. Une analyse de l'impact de la présence du lac Brome sur le régime d'écoulement du tronçon à l'étude a été effectuée. Cette dernière est présentée à l'annexe A.

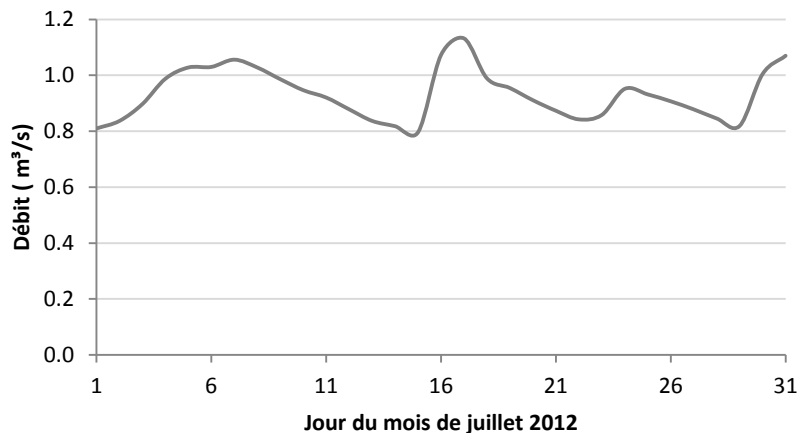


Figure 2.8 - Soutirages au barrage en période de faible hydraulicité

### 2.3.2 Les prises d'eau

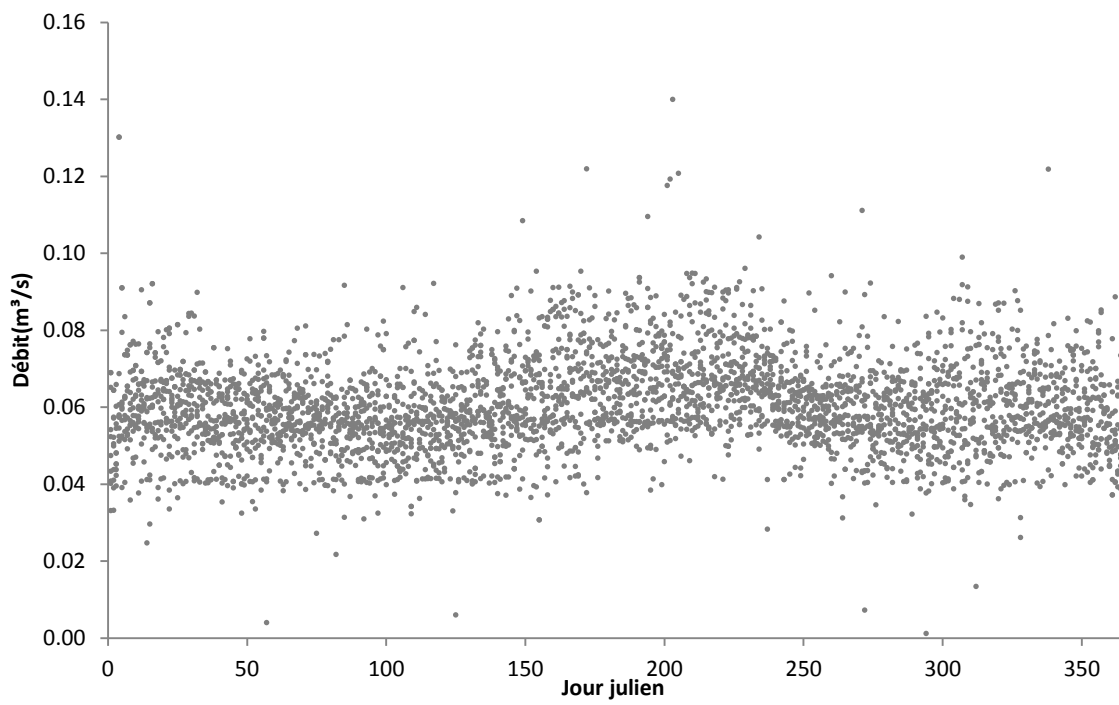
Tel que mentionné précédemment, deux prises d'eau sont présentes sur le tronçon de rivière à l'étude, soit la prise d'eau de Ski Bromont et la prise d'eau de la ville de Bromont.

La prise d'eau de la ville de Bromont fournit l'eau brute pour les besoins de la ville. Le certificat d'autorisation permet un soutirage de 0.25 m³/s. L'eau non-consommée par la ville de Bromont est rejetée dans la rivière Yamaska par le biais de l'émissaire de la station d'épuration des eaux usées qui se déverse dans le ruisseau Dozois. Les débits pompés à la prise d'eau sont disponibles de 2001 à 2011. La figure 2.9 présente un nuage de points des 11

années de données journalières disponibles. Il est possible de voir sur la figure que la moyenne se situe autour de  $0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le maximum historique est de  $0.14 \text{ m}^3/\text{s}$  et il est survenu l'été. Lorsque les années sont observées séparément, il est possible d'observer une augmentation de la consommation moyenne en eau brute entre 2001 et 2011. En 2011, la consommation moyenne de la ville de Bromont était de  $0.07 \text{ m}^3/\text{s}$  et le débit journalier maximum était de  $0.14 \text{ m}^3/\text{s}$ . Le débit moyen à l'exutoire de la station d'épuration pour cette même année était de  $0.09 \text{ m}^3/\text{s}$ .

L'eau pompée à la prise d'eau de Ski Bromont est destinée à la production de neige fabriquée pour la station de Ski. Le prélèvement est effectué en période hivernale, souvent caractérisée par de faibles débits, et retourne à la rivière lors de la fonte associée la crue printanière. Le certificat d'autorisation permet de pomper  $0.35 \text{ m}^3/\text{s}$  entre novembre et mars. La ponction en eau de Ski Bromont est dépendante du débit de la rivière et du débit pompé à la CTE. Le débit réservé écologique à la CTE en période hivernale a été établi à  $1.20 \text{ m}^3/\text{s}$  dans le rapport de Bergeron *et al.* [2008]. Ski Bromont peut pomper de l'eau uniquement lorsque le débit de la rivière est plus grand que la somme du débit réservé écologique et du débit pompé à la CTE. Pour effectuer ce calcul et le suivi des débits, Ski Bromont a instauré un système de suivi en temps réel. Les données sont accessibles directement sur Internet.

---



**Figure 2.9 - Données de consommation en eau brute**

## CHAPITRE 3           ÉTAT DE L'ART

### 3.1 Les étiages

#### 3.1.1 Définition et indicateurs de faibles débits

Selon Smakhtin [2001] , un étiage se veut un phénomène saisonnier décrivant un état hydrologique de faible débit faisant partie intégrante du régime d'écoulement de la rivière. Il est différent d'une sécheresse; cette dernière se veut un phénomène plus général étant caractérisé par plusieurs autres facteurs que le débit d'eau dans une rivière. En période d'étiage, l'eau dans les rivières provient de deux sources : un débit de surface provenant des lacs et des marais et un débit souterrain provenant de la nappe phréatique. Dans le cas des étiages critiques, le débit d'eau de la rivière provient uniquement de l'apport de la nappe phréatique [Smakhtin, 2001] . L'abaissement de la nappe phréatique peut engendrer une diminution et/ou un arrêt des apports souterrains aux cours d'eau et aux milieux humides lorsqu'ils sont hydrauliquement connectés. Lors d'un abaissement plus sévère, un phénomène d'infiltration à partir du cours d'eau vers la nappe phréatique peut se produire [Konikow et Kendy, 2005] . Dans les pays froids, la dynamique des étiages est différente en hiver puisque les précipitations sont stockées sous forme de neige. Le débit en rivière provient majoritairement de la nappe phréatique. Il peut être moindre que l'apport de cette dernière puisque l'eau contribue à la formation du couvert de glace.

L'amplitude et la fréquence d'occurrence des débits d'étiage sont quantifiables par des approches statistiques. La courbe des débits classés est l'une des méthodes les plus efficaces pour représenter l'étendue des débits d'une rivière. Elle représente le pourcentage de temps où une valeur de débit est égalisée ou dépassée. Elle est construite en classant les débits du plus grand au plus petit et en les exprimant en fonction de leur rang en pourcentage. La courbe peut être construite pour différents horizons de temps, soit journalier, hebdomadaire, mensuel, annuel, etc. Cette courbe permet d'extraire des indices de débit

d'étiage, notamment le Q90 et le Q95. Le Q90 représente la valeur de débit étant dépassée 90 % du temps.

La courbe de fréquence des débits d'étiage permet quant à elle d'exprimer la période de récurrence lors de laquelle le débit tombe en deçà d'une certaine valeur. La courbe est construite pour des débits minimums annuels extraits d'une série de données. Comme pour la courbe des débits classés, la courbe de fréquence des débits d'étiage peut être construite à partir de moyennes effectuées sur différentes durées (1 jour, 3 jours, 7 jours, etc.) observées lors de périodes de l'année où le débit est minimum, soit typiquement l'été et l'hiver. Le nombre d'observations pour la construction de la courbe est habituellement insuffisant pour effectuer une analyse de fréquence fiable des événements extrêmes. Ainsi, des lois de distribution théoriques sont utilisées pour extrapoler au-delà des observations et pour améliorer l'estimation des débits d'étiage [Smakhtin, 2001]. Le critère d'information d'Akaike (AIC) ou le critère d'information bayésien (BIC) permet de déterminer la meilleure loi de distribution à utiliser [Zeestraten, 2012]. Les lois de Weibull, Gumbel, Pearson de type III et log-normal sont les plus utilisées en hydrologie. La loi de Weibull est identifiée dans Haan [1977] comme étant adaptée pour les étiages. Les autres lois sont plus adaptées pour les extrêmes de grande amplitude. Plusieurs indices d'étiage peuvent être extraits de ces courbes; ils s'expriment comme étant le débit « m » jours consécutifs de récurrence « n » années (mQn). Aux États-Unis et au Canada, les indices d'étiage les plus utilisés sont le 7Q2, le 7Q10 et le 30Q5 [Smakhtin, 2001].

Des indices non statistiques peuvent être utilisés pour exprimer un débit d'étiage tel qu'une fraction du débit moyen annuel (QMA), une fraction du débit moyen calculé sur une donnée (QMP) ou le débit médian d'une période ( $Q_{50}$ ) [Belzile *et al.*, 1997].

---



### 3.1.2 Les étiages et les changements climatiques

Avec les changements climatiques, les patrons de précipitation changent et ils ont un impact direct sur les apports de surface en période d'étiage. Selon Cheng *et al.* [2011] , pour le centre sud du Canada, les événements de plus de 25 mm de pluie par jour augmenteront de 10 à 35 % de 2046 à 2065 et de 35 à 50 % de 2081 à 2100. La hauteur de pluie totale augmentera de 15 à 20 % de 2046 à 2065 et de 20 à 30 % de 2081 à 2100. Pour les débits en rivière, ces augmentations de précipitation se traduisent par une augmentation du débit moyen de 25 à 35 % pour les deux mêmes périodes de temps. La fréquence d'occurrence des débits au-delà du 95e centile augmentera de 25 à 55 % de 2046 à 2065 et de 25 à 90% pour 2081 à 2100. Même si les précipitations moyennes et les débits moyens augmentent, plusieurs études canadiennes démontrent une augmentation de la sévérité et de la fréquence des étiages. L'étude de Rivard *et al.* [2009] dénote une baisse du débit d'étiage 7 jours en dessous de la latitude 55°N pour l'ouest et l'est du pays. Selon l'étude, les tendances dépendent des changements climatiques et des activités anthropiques. Pour le centre sud du Canada, selon Cheng *et al.* [2011] , la fréquence d'occurrence des débits situés en deçà du cinquième centile augmentera de 60 à 100 % de 2046 à 2065 et de 100 à 160 % de 2081 à 2100. L'atlas hydroclimatique du Québec méridional indique une diminution de 15% du débit d'étiage 7Q2 pour l'été et l'automne avec un consensus très fort des projections climatiques (plus de 90 %). Le nombre de jours sous le débit 7Q2 estimé pour la période été-automne de référence augmentera de 15 à 30 jours avec un consensus très fort des projections climatiques (plus de 90 %) [CEHQ, 2013] .

Les apports souterrains en rivière subissent également des modifications. Pour ce qui est du niveau de la nappe phréatique au Canada, Rivard *et al.* [2009] n'observent aucune tendance générale à l'échelle nationale. Les tendances sont observées à l'échelle régionale. Par exemple, les provinces de l'Atlantique présentent un appauvrissement de la nappe phréatique de 20 %. Aucune donnée pour le Québec n'était disponible pour l'étude. Rivard *et*

---

*al.* [2009] spécifient que les différentes tendances sont causées par les changements climatiques et les activités anthropiques.

### 3.1.3 Les étiages et les prises d'eau en rivière

Avec les prévisions de la diminution de l'amplitude et de l'augmentation de la fréquence des débits d'étiage, quelques auteurs québécois s'intéressent aux impacts de ces phénomènes sur les prises d'eau. Rousseau *et al.* [2004] soulignent quelques impacts sur la qualité de l'eau brute en rivière. Notamment, ils soulignent que « la modification du régime hydraulique pourrait entraîner [...] une modification des panaches de mélange des affluents ou de rejets dans un cours d'eau. Ainsi, une prise d'eau qui pouvait initialement se trouver hors d'un panache d'un affluent ou d'un rejet pourrait se retrouver, suite à une modification du régime hydraulique, à l'intérieur de ce panache. » Par ailleurs, toujours selon Rousseau *et al.* [2004], l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements de précipitation seront susceptibles d'accroître le nombre de refoulements, d'inondations et de débordements au niveau du drainage urbain, ce qui a comme impact la détérioration de la qualité de l'eau du milieu récepteur. Ils soulignent également que ces événements auront comme impact en milieu agricole une augmentation de la pollution diffuse (ex. : fertilisants), advenant le cas où ils surviennent dans la période de croissance des cultures.

D'autres auteurs s'intéressent au côté quantitatif du problème. Carrière *et al.* [2007] s'intéressent aux niveaux d'eau critiques pour l'approvisionnement des prises d'eau du St-Laurent. Ils calculent le niveau d'eau critique selon deux conditions limites pour lesquelles une prise d'eau sera dans l'impossibilité de pomper l'eau brute. La condition « a » de la figure 3.1 représente le cas où la prise d'eau est émergée et la condition « b » considère le cas où la tête d'eau n'est pas suffisante pour combattre les pertes de charge dues au pompage. Ils concluent que quelques prises d'eau, dont celle de Montréal, sont vulnérables aux bas

---

niveaux d'eau du Fleuve St-Laurent. Cette étude s'attarde à la vulnérabilité de l'infrastructure en place, mais néglige la vulnérabilité du milieu naturel à la quantité d'eau pompée.

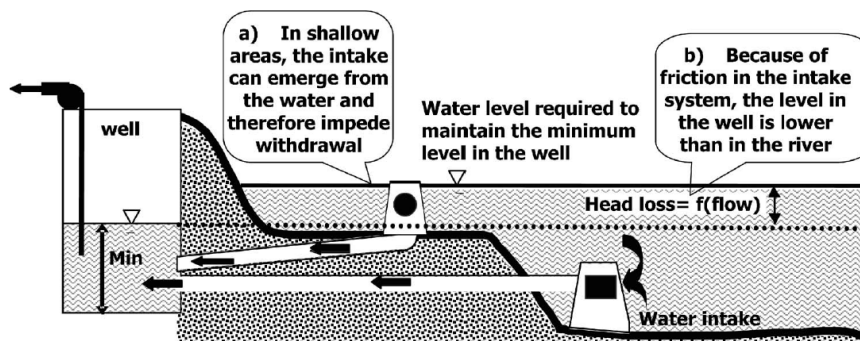


Figure 3.1 - Conditions limites des niveaux critiques pour les prises d'eau

[Carrière *et al.* 2007]

Les auteurs Nantel [2006] et Bérubé [2007] optent pour une méthodologie différente pour l'évaluation de la vulnérabilité des prises d'eau. Nantel [2006] propose d'évaluer la vulnérabilité selon les critères présentés aux équations 3.1 et 3.2, et Bérubé [2007] le fait selon les critères des équations 3.1 et 3.3. La vulnérabilité devient importante lorsque l'un des critères est en deçà de 1. Techniquement, si le critère  $I_2$  est inférieur à 1, le critère  $I_1$  est également inférieur à 1. Le même raisonnement s'applique pour  $I_3$ . Les deux auteurs relèvent que quelques prises d'eau au Québec sont vulnérables selon cette approche.

$$I_1 = \frac{7Q2}{Q_{moy}} \quad (3.1)$$

$$I_2 = \frac{0.15 \times 7Q2}{Q_{moy}} \quad (3.2)$$

$$I_3 = \frac{7Q10}{Q_{moy}} \quad (3.3)$$

Où :

$I_{1,2\&3}$	Indice de vulnérabilité
$Q_{moy}$	Débit moyen annuel distribué à la prise d'eau
7Q2	Débit d'étiage moyen 7 jours de récurrence 2 ans
7Q10	Débit d'étiage moyen 7 jours de récurrence 10 ans

Nantel [2006] souligne que le facteur de pointe journalier n'est pas pris en considération dans cette méthode et elle évalue la vulnérabilité de la prise d'eau selon ce dernier. Le facteur de pointe correspond au ratio entre le débit de consommation maximal et le débit de consommation moyen sur une période définie. Ainsi, le facteur de pointe journalier correspond au débit maximum de la journée sur le débit moyen journalier. Les vulnérabilités augmentent considérablement en effectuant cet exercice, mais l'auteur conclut que les réservoirs d'emménagement des stations d'eau potable permettent d'absorber le stress temporaire et de garantir les demandes journalières. Le prélèvement en eau d'une ville est un signal variable subissant de nombreuses fluctuations dans l'année. Ainsi, les méthodes proposées par Nantel [2006] et par Bérubé [2007] négligent les vulnérabilités ponctuelles aux prises d'eau lorsque la ponction journalière est plus élevée que le débit moyen prélevé ( $Q_{jourmax}$ ).

---

### 3.1.4 Les étiages et les débits réservés écologiques

Selon Rousseau *et al.* [2004] , afin d'assurer la pérennité à long terme des approvisionnements en eau de surface, les prélèvements doivent être inférieurs à la différence entre l'écoulement naturel et les besoins en eau des écosystèmes aquatiques. L'approche proposée dans ce projet s'oriente vers l'énoncé de Rousseau et nécessite la connaissance des débits réservés écologiques en rivière.

Depuis 1999 au Québec, les besoins en eau des écosystèmes sont régis par la Politique de débits réservés écologiques pour la protection du poisson et de ses habitats [Faune et Parcs Québec, 1999] . La politique s'applique aux projets hydroélectriques, de prélèvements d'eau et de dérivations de cours d'eau. Dans cette dernière, le débit réservé écologique est défini comme étant le débit minimum requis pour maintenir, à un niveau jugé acceptable, les habitats du poisson. Une revue complète des méthodes de calcul du débit réservé écologique est effectuée dans Tharme [2003] et dans Belzile *et al.* [1997] . Cette section a pour but de présenter les méthodes de calcul du débit réservé écologique retenues pour produire les résultats du projet.

La méthode préconisée par la politique pour déterminer le débit réservé écologique en rivière est la méthode écohydrologique, développée par Belzile et al. [1997] . Cette méthode prend en considération les facteurs écologiques, hydrologiques et géographiques du cours d'eau. Elle tient compte des espèces ichtyologiques présentes et des stades critiques de leur cycle vital. Pour la région écohydrologique de la rivière Yamaska, les débits réservés écologiques en rivière pour la protection du poisson sont ceux présentés au tableau 3.1. Les espèces cibles dans cette région sont le doré jaune, l'achigan à petite bouche et l'anguille d'Amérique. Comme les périodes se chevauchent, les périodes du tableau 3.2 sont considérées.

---

**Tableau 3.1 - Indices et périodes des débits réservés écologiques selon la méthode échohydrologique**

Période	Indice
Toute l'année	0.5 QMA
1 <sup>er</sup> avril au 15 juillet	0.5 QMP
1 <sup>er</sup> mai au 30 septembre	Q <sub>50</sub> août

**Tableau 3.2 - Indices et périodes retenus des débits réservés écologiques selon la méthode échohydrologique**

Période	Indice
1 <sup>er</sup> octobre au 31 mars	0.5 QMA
1 <sup>er</sup> avril au 30 mai	0.5 QMP
1 <sup>er</sup> juin au 30 septembre	Q <sub>50</sub> août

L'État du Vermont préconise une méthode similaire à la méthode échohydrologique du Québec. Elle est présentée au tableau 3.3 [État du Vermont, 1993] .

**Tableau 3.3 - Indices et périodes des débits réservés écologiques selon la méthode du Vermont**

Période	Indice
1 <sup>er</sup> octobre au 31 mars	Q <sub>50</sub> février
1 <sup>er</sup> avril au 31 mai	Q <sub>50</sub> avril & mai
1 <sup>er</sup> juin au 30 septembre	Q <sub>50</sub> août

En France, le débit réservé écologique est systématiquement accepté comme étant le dixième du débit annuel moyen depuis la loi des pêches de 1984 [Actu-Environnement, 2013] (tableau 3.4).

**Tableau 3.4 - Indices et périodes des débits réservés écologiques selon la méthode française**

Période	Indice
Toute l'année	0.10 QMA

Finalement, la méthode du Montana a été développée avec des observations sur des cours d'eau de l'état dans les années 1970. Elle propose différentes catégories de débit basées sur le débit moyen de la rivière. Ces catégories indiquent la qualité de l'habitat du poisson. Il est à noter que la méthode française présentée au tableau 3.4 correspond aux conditions pauvres ou minimales selon la méthode du Montana. Le tableau 3.5 présente quant à lui les conditions passables de la méthode du Montana.

**Tableau 3.5 - Indices et périodes des débits réservés écologiques selon le critère de conditions passables de la méthode du Montana**

Période	Indice
Octobre à mars	0.10 QMA
Avril à Septembre	0.30 QMA

Tel qu'il a été mentionné antérieurement, plusieurs autres méthodes de calcul de débit réservés écologiques sont présentées dans la littérature [Belzile *et al.*, 1997; Tharme, 2003; Zeestraten, 2012] . Les méthodes présentées ci-haut sont toutes à caractère statistique. Il

existe une probabilité inhérente à la variabilité naturelle que le débit d'une rivière soit en deçà de chacun de ces indices. Notamment, lorsque le débit médian est utilisé comme indice, la probabilité de non-dépassement est de 50 %. Ainsi, uniquement les projets impliquant des ouvrages hydriques avec capacité d'emmagasinement seront en mesure de respecter un tel indice.

Pour le projet, il a été jugé pertinent de sélectionner plusieurs méthodes pour des fins de comparaison. Elles ont été sélectionnées en fonction de leur applicabilité et de leur utilisation au Québec. La méthode écohydrologique est le standard actuellement, c'est pourquoi elle a été retenue. Il a été jugé pertinent de retenir aussi la méthode du Vermont puisqu'elle est similaire mais demande des débits réservés écologiques plus faibles. Les conditions pauvre et passable de la méthode du Montana ont également été retenues puisqu'elles sont d'usage courant au Québec.

Le prochain sous-chapitre présente une revue des méthodes de soutien à l'étiage. Ces dernières peuvent notamment aider à maintenir les débits réservés écologiques acceptables dans les cours d'eau. Dans ce projet, le lac Brome est utilisé comme méthode de soutien à l'étiage, mais il a été jugé pertinent présenter d'autres pistes de solution.

---



## 3.2 Les méthodes de soutien à l'étiage

Les méthodes de soutien à l'étiage peuvent être classées selon plusieurs critères. Le classement retenu fait référence au type d'apports en rivière lors d'une période d'étiage. Ils sont généralement regroupés en deux catégories, soit les apports souterrains et les apports de surface. Pour effectuer le regroupement des méthodes de soutien à l'étiage, il est nécessaire d'ajouter une catégorie de méthodes de soutien d'étiage, soit la minimisation des pertes en eau. Ainsi, la gestion des apports souterrains constitue la deuxième catégorie de méthodes et la gestion des eaux de surface constitue la troisième catégorie de méthodes.

### 3.2.1 La minimisation des pertes en eau

La minimisation des pertes en eau par évapotranspiration et par interception a pour but d'augmenter le volume d'eau dans le bassin versant. Cette minimisation des pertes en eau peut être effectuée en transformant l'occupation du sol. En effet, l'évapotranspiration est majoritairement fonction de l'occupation du sol; une forêt de conifères engendre une plus grande évapotranspiration qu'un sol nu [Thomas *et al.*, 2011]. Plusieurs études ont démontré que le reboisement réduit le débit d'eau en rivière et ceci, principalement en période d'étiage [Smakhtin, 2001]. Quelques études démontrent l'impact de la transformation d'un site couvert d'une forêt vers une utilisation agricole. Verstraeten *et al.* [2005] démontrent avec le modèle de bilan hydrique WAVE que la moyenne annuelle d'évapotranspiration dans un bassin versant de Belgique est de 491 mm pour une forêt et de 398 mm pour des cultures agricoles. Dans la vallée de la rivière Mississippi aux États-Unis, le débit de base des rivières Cider, Illinois, Wabash et Ohio a augmenté de 134 %, 47 %, 59 % et 28 % respectivement entre les années 1940 et 2003. Cette augmentation est due à une augmentation de 443 % de la superficie dédiée à la culture du soya. Cette dernière engendre une moins grande évapotranspiration et consomme moins d'eau que les occupations du sol originales, des cultures pérennales et des pâturages. Il est à noter que cette augmentation est également

---

due à des pratiques de conservation du sol, mais les résultats ne sont pas séparés pour identifier les impacts respectifs [Zhang et Schilling, 2006] . L'application de cette méthode de soutien à l'étiage est limitée. Les intérêts de protection de l'environnement, de protection du paysage et de la gestion de l'eau peuvent contre-indiquer un tel changement d'occupation du sol [Thomas *et al.*, 2011] .

### 3.2.2 La gestion des apports souterrains

La section suivante présente les méthodes à utiliser pour minimiser l'impact du développement anthropique sur le niveau de la nappe phréatique. La minimisation de l'impact de l'agriculture et de l'urbanisation sera d'abord discutée. La préservation des milieux tampons fera ensuite l'objet de discussions.

En milieu agricole, les pratiques de gestion favorisant l'infiltration de l'eau dans le sol ont un impact sur la recharge de la nappe phréatique. Tel qu'il a été mentionné précédemment, certaines techniques de conservation du sol favorisent l'infiltration. Dans son article, Zhang et Schilling [2006] soulignent la culture en terrasses, les labours de conservation et une bande de protection végétale sur le périmètre des champs. Selon l'étude de Xu et Mermoud [2003] la technique de labour profond favorise également l'infiltration, elle augmente le volume de percolation de 6 % lors d'une année humide et de 3 % lors d'une année sèche. Dans leur article, Eheart et Tornil [1999] démontrent l'impact de l'irrigation agricole sur les étiages couplée avec des scénarios de changements climatiques. Les variables pour chaque scénario sont le climat, la source d'approvisionnement en eau et le type d'irrigation effectuée. L'eau pour l'irrigation peut provenir de la nappe phréatique profonde ou des plans d'eau de surface. Deux types d'optimisation sont effectués pour simuler l'irrigation, l'une maximise le profit alors que l'autre maximise le rendement. Avec une diminution de 25 % des précipitations moyennes, avec la nappe phréatique profonde comme source d'eau et avec un système d'irrigation maximisant le profit, les auteurs observent une augmentation du débit

---

en étiage de 20 %. L'irrigation contrebalance l'effet des changements climatiques puisque l'eau est puisée à une grande profondeur dans le sol. Ici, il est nécessaire de souligner que le temps de réaction du niveau de la nappe phréatique face à une diminution des précipitations est plus long que celui du cours d'eau, mais qu'ultimement, les changements climatiques auront également un impact sur ce dernier. Ainsi, cette technique de soutien à l'étiage ne peut être soutenue à long terme. Lorsque le même scénario est évalué avec l'eau de surface comme source d'approvisionnement pour l'irrigation, la fréquence d'occurrence du 7Q10 passe de 3.3 jours/année à 13.4 jours/année. Le modèle étudié dans l'étude de Eheart et Tornil [1999] est appliqué à la réalité économique et climatique de l'Illinois. Aussi Eheart et Tornil [1999] soulignent que l'adaptation en vue des changements climatiques pourrait être réalisée en changeant le type de culture du milieu agricole.

Le phénomène d'urbanisation apporte des modifications aux composantes du cycle hydrologique. Il est possible de noter la diminution du pourcentage d'eau infiltré dans le sol et la diminution de l'évapotranspiration due à l'augmentation de la surface imperméable [Thomas *et al.*, 2011; Osseyrane *et al.*, 2011]. Ces deux phénomènes sont antagonistes, mais l'effet net observé est habituellement une diminution des débits d'étiage [Thomas *et al.*, 2011]. La planification des espaces urbains d'une façon durable peut diminuer ces impacts sur le milieu récepteur et sur les étiages. Notamment, les pratiques de gestion optimales (PGO) ont pour objectif de réduire le volume de ruissellement en infiltrant l'eau dans le sol, de diminuer les débits de pointe et d'améliorer la qualité de l'eau rejetée. Le Québec s'est dernièrement doté du *Guide de gestion des eaux pluviales* pour agir dans ce domaine; le chapitre 11 couvre les pratiques de gestion optimales. L'implantation en filière des PGO réduit le coût d'implantation et combine l'effet complémentaire des différents systèmes. La filière d'implantation consiste en la prévention de la pollution, le contrôle à la source, le contrôle dans le réseau et le contrôle avant l'émissaire. Notamment, il est recommandé d'infiltrer les premiers 10 mm de pluie pour un sol de classe A, les premiers 6 mm de pluie

---

pour un sol de classe B et les premiers 2.5 mm de pluie pour un sol de classe C. Parmi les différentes PGO, il est possible de souligner les jardins de pluie pour le contrôle à la source, les fossés avec système d'infiltration pour le contrôle en réseau et les bassins d'infiltration en fin de réseau [Osseyrane *et al.*, 2011]

La conservation des milieux tampons comme les marécages, les plaines inondables et les dépôts de sol en bordure des rivières sont des méthodes de soutien à l'étiage ne faisant pas l'unanimité dans la littérature, leur impact étant remis en question. Selon Smakhtin [2001] ces formations naturelles sont des endroits où l'eau est emmagasinée en période de pluie et relâchée graduellement et continuellement en période de sécheresse.

Pour ce qui est des marécages, l'article de Bullock et Acreman [2003] compile 169 études effectuées entre 1930 et 2002 partout dans le monde. Bullock et Acreman [2003] concluent que 66 % des marécages diminuent le débit en étiage alors que 25 % l'augmente. La diminution serait directement reliée à l'évapotranspiration accrue dans les marécages observée dans 96 % des études. Pour ce qui est de la recharge de la nappe phréatique, 46 % des études soulignent une recharge minime alors que 26 % des études concluent qu'il n'y a pas de recharge. Selon Thomas *et al.* [2011], la consommation en eau des marécages devrait être caractérisée et optimisée afin de faire une meilleure gestion de ces milieux. La conservation des dépôts de sols en bordure des rivières et des plaines inondables a pour avantage de développer des milieux humides sur le pourtour des rivières où une végétation ripicole peut croître. Cette bande de végétation a comme avantages d'augmenter la stabilité du lit de la rivière, de diminuer l'érosion et le transport de sédiments, d'augmenter la qualité de l'eau, d'améliorer les habitats naturels et de fournir de l'ombre pour diminuer la température du cours d'eau. Le soutien à l'étiage est fonction de la largeur du dépôt de sol et de la conductivité hydraulique du milieu en question. Le soutien à l'étiage est rehaussé lorsque la largeur du milieu est élevée et la conductivité hydraulique basse [Ponce et Lindquist, 1990]. Cette bande de végétation ripicole est cependant une consommatrice

---

d'eau et augmente l'évapotranspiration [Ponce et Lindquist, 1990; Thomas *et al.*, 2011] . La complexité naturelle des milieux tampons ressort des multiples études. Pour les marécages, les corrélations entre les facteurs d'influence sont difficilement réalisables. Ceci serait en partie dû au manque d'une méthode de classement simple et efficace [Bullock et Acreman, 2003] .

### 3.2.3 La gestion des eaux de surface

La gestion des eaux de surface constitue la dernière classe de méthodes de soutien à l'étiage. Les réservoirs de surface, les réservoirs souterrains, le transfert d'eau entre bassins versants et la réutilisation de l'eau traitée sont les techniques de soutien à l'étiage survolées dans la présente section.

Les réservoirs de surface sont une méthode de soutien à l'étiage de plus en plus utilisée à travers le monde. Le débit excessif des rivières est stocké en période de crues. Lorsque le volume de stockage le permet, il est possible de soutenir les étiages sévères avec ce débit [Muttiah et Wurbs, 2002] . Cet objectif de soutien à l'étiage demande au réservoir le plus haut niveau d'eau possible pour aider en cas de sécheresse. Cependant, les barrages doivent aussi garder de l'espace de stockage en prévision d'une crue [Thomas *et al.*, 2011] . La coordination de ces deux objectifs conflictuels représente un enjeu majeur dans les années futures; la fluctuation du niveau des réservoirs ira en augmentant avec les changements climatiques. Aux États-Unis, l'optimisation et l'adaptation des systèmes de gestion de l'eau sont les solutions retenues en vue des changements climatiques [Medellín-Azuara *et al.*, 2008] . Le CEHQ affirme que les plans de gestion au Québec doivent être revus pour l'adaptation aux changements climatiques [Fortin *et al.*, 2007] . L'optimisation de la gestion des réservoirs existants représente une alternative moins coûteuse et moins dommageable pour l'environnement que la construction de nouveaux réservoirs.

---

Plusieurs techniques de rétention temporelle de l'eau dans le sol sont discutées dans la littérature. Ces techniques ont deux avantages majeurs; l'eau est moins sujette à l'évaporation lorsqu'elle est dans le sol [Konikow et Kendy, 2005] et un traitement de l'eau par le sol est effectué [Dillon, 2005]. Parmi les techniques figurent l'injection et le soutirage ultérieur de l'eau dans un aquifère. Selon Konikow et Kendy [2005], les aquifères épuisés constituent des réservoirs où l'eau peut être entreposée en période de surplus et utilisée en période d'étiage. Dillon [2005] cite de nombreuses autres techniques de rétention, dont l'infiltration à l'aide de dunes, l'infiltration des eaux de ruissellement urbaines et l'infiltration des eaux rejetées par les stations de traitement des eaux usées municipales, les barrières souterraines, etc. Dans tous les cas, l'eau est infiltrée à un endroit et est repompée à un autre pour des fins de consommation. En période d'étiage, la pression sur le milieu naturel est ainsi diminuée. Selon Dillon [2005], ces techniques peuvent aussi être adaptées pour supporter le débit de base en rivière.

Le transfert d'eau entre deux bassins versants distincts est une autre méthode pour contrer les étiages. Il peut s'agir d'eau de surface, d'eaux usées, d'eaux potables ou d'eaux souterraines. Cette méthode s'applique lorsqu'un des bassins versants a une grande consommation en eau potable alors qu'un bassin versant voisin a des surplus d'eau [Thomas *et al.*, 2011]. Les experts s'accordent pour dire que ces projets doivent s'intégrer dans un processus de gestion holistique, où les facteurs environnementaux sociaux et économiques sont considérés [J. Gupta et van der Zaag, 2008].

Dans les régions plus arides du globe, la réutilisation de l'eau usée traitée est une pratique courante. Elle peut être utilisée notamment pour l'irrigation; la ponction d'eau souterraine ou dans les rivières est ainsi réduite. La recharge de la nappe phréatique constitue une deuxième approche pour l'utilisation de l'eau usée traitée; l'eau est retenue temporellement dans le bassin [Thomas *et al.*, 2011]. Cette technique peut aussi aider à réduire les risques d'eutrophisation, ceci lorsque la charge en matière organique de l'effluent est trop élevée

---

pour le milieu récepteur [Hamilton *et al.*, 2007] . Cette méthode de soutien à l'étiage a des limitations. Entre autres, elle s'applique uniquement en milieu urbain. Selon Thomas *et al.* [2011] , pour irriguer 1 ha de terrain avec 1 mm d'eau, il est nécessaire d'utiliser le volume d'eau produit par 79 personnes selon les consommations allemandes. La qualité de l'eau représente une autre limitation pour cette technique. Tel que mentionné dans l'article de Dillon [2005] , le sol procure un traitement additionnel à l'eau. Dans leur étude, Hamilton *et al.* [2007] soulignent que dû à l'abondance des ressources en eau douce, les techniques de réutilisation de l'eau sont très peu utilisées au Canada. Selon Exall [2004] , cette technique est utilisée à petite échelle et de façon sporadique. Notamment, l'irrigation de champs, de terrains de golf et d'aménagements paysagers est effectuée en Colombie-Britannique et dans les Prairies.

---

### 3.3 La gestion des réservoirs

Dans le sous-chapitre précédent, les réservoirs ont été approchés comme étant une méthode de soutien à l'étiage. En réalité, les réservoirs de surface jouent souvent plus qu'un rôle de soutien à l'étiage. Ils peuvent avoir des fonctions de protection contre les crues, d'approvisionnement en eau, de production d'hydroélectricité, d'amélioration de la qualité de l'eau, de navigation, de récréation, etc [Loucks et van Beek, 2005] . Lorsqu'un réservoir doit répondre à plusieurs fonctions simultanément, une gestion de ce dernier est nécessaire puisque plusieurs fonctions sont conflictuelles.

La prochaine partie du texte a pour but de survoler les techniques pouvant être utilisées pour effectuer la gestion de réservoirs. Les critères de performance pour évaluer la gestion des réservoirs sont présentés à la deuxième section. La section 3 porte sur la gestion des réservoirs en changements climatiques.

#### 3.3.1 Les modèles informatiques

La gestion optimale de réservoirs est un domaine complexe nécessitant un appui informatique pour effectuer des décisions d'opération rationnelles. Deux grandes familles de modèles informatiques existent pour assister les gestionnaires et les opérateurs, soit les modèles de simulation et les modèles d'optimisation.

Les modèles de simulation sont appliqués depuis longtemps à la gestion et à l'opération de systèmes de réservoirs. Ces modèles sont de type descriptif. Ils utilisent des séries de données, tel que le débit en rivière ou l'évaporation, pour effectuer les simulations et pour faire des prévisions des débits en rivière, des niveaux dans le réservoir, des soutirages au barrage, etc. La modélisation peut être déterministe ou stochastique ou un mélange des deux [Loucks et van Beek, 2005] . Ils sont adaptés pour répondre aux questions de type « What if? » et pour tester la performance des alternatives de gestion. Ils représentent

---



adéquatement les opérations d'un barrage et peuvent fournir les résultats à long terme de nouvelles stratégies de gestion. Plusieurs modèles de simulation sont disponibles sur le marché, dont Hec-ResSim, STELLA, POWERSIM et VENSIM [Labadie, 2004] .

Les modèles d'optimisation sont de type prescriptif. Ils déterminent la meilleure solution ou le meilleur groupe de solutions à utiliser pour maximiser ou minimiser une fonction objective tout en respectant des contraintes données. Les modèles d'optimisation peuvent être déterministes ou probabilistes ou un mélange des deux. Ils peuvent être linéaires ou non-linéaires, statiques ou dynamiques, etc. Le mode de résolution numérique à utiliser pour résoudre le problème dépend fortement de la formulation mathématique de ce dernier [Loucks et van Beek, 2005] . Lorsqu'ils sont appliqués à la gestion de barrage et selon le modèle d'optimisation utilisé, des règles d'opérations optimales et/ou des courbes de niveau à atteindre peuvent être obtenues directement ou elles peuvent être dérivées avec différentes techniques mathématiques.

### 3.3.2 Critères de performance

Différents critères sont utilisés afin d'évaluer la performance des systèmes hydriques. Les critères présentés dans cette section sont tirés de Hashimoto *et al.* [1982] . Les critères de fiabilité, de vulnérabilité et de résilience sont présentés aux équations 3.12 à 3.14. La fiabilité représente la probabilité qu'un système soit dans un état satisfaisant, la vulnérabilité explique la sévérité des périodes d'insuccès alors que la résilience évoque la rapidité de la récupération après une période d'insuccès.

$$F = \frac{NS}{NJ} \quad (3.4)$$

---

$$V = \frac{\sum_1^{NI} VJ}{NI} \quad (3.5)$$

$$R = \frac{NR}{NI} \quad (3.6)$$

$$VJ = D/D_{max} \quad (3.7)$$

Où:

- F Fiabilité (%)
- V Vulnérabilité (%)
- R Résilience (%)
- NJ Nombre de jours de simulation
- NS Nombre de jours de succès
- NI Nombre de jours d'insuccès
- VJ Vulnérabilité journalière (m<sup>3</sup>/s ou m)
- D Dépassement journalier (m<sup>3</sup>/s ou m)
- D<sub>max</sub> Dépassement maximal (m<sup>3</sup>/s ou m)
- NR Jour de récupération (moment où l'on passe d'un état d'insuccès à un état de succès)

Ces critères ont été utilisés, entre autres, par Simonovic et Li [2003] . Dans ce projet, les notions de dépassement maximal de contrainte et de nombre de jours maximaux de dépassement seront également abordées. Le dépassement maximal peut être exprimé en m ou en m<sup>3</sup>/s dépendamment de la contrainte considérée. Le nombre de jours maximal de dépassement de contrainte est la période de jours consécutifs la plus longue où la contrainte a été dépassée sur toute la période de données.

---

### 3.3.3 La gestion des réservoirs en changements climatiques

Depuis les dernières années, beaucoup d'intérêt a été porté à l'étude des changements climatiques sur les réservoirs par la communauté scientifique. Notamment, Payne *et al.* [2004] établissent la sensibilité du réseau hydrique de la rivière Columbia aux changements climatiques. Ils concluent que dans ce système hydrique la conservation des débits écologiques en rivière se fait au détriment de la production d'hydroélectricité à cause des débits d'étiage plus sévères. Ils présentent une étude pour l'adaptation aux changements climatiques consistant en une analyse de sensibilité sur les dates de remplissage du réservoir, sur la demande en énergie et sur les niveaux minimums en période estivale. Schaepli *et al.* [2007] quantifient l'impact des changements climatiques sur un système hydrique dans les Alpes. Ils concluent que les changements climatiques auront un impact négatif sur la production d'hydroélectricité et que la plus grande source d'incertitude est induite par la génération des séries météorologiques. Durant les mêmes années au Québec, Fortin *et al.* [2007] étudient le système hydrique de la rivière St-François où les lacs St-François et Aylmer se situent. Ils concluent que des méthodes d'adaptation peuvent être appliquées pour compenser l'effet des changements climatiques. Cependant, la variabilité entre les scénarios climatiques ne permet pas de définir une méthode d'adaptation unique pour l'ensemble des scénarios. Minville *et al.* [2010] évaluent l'impact des changements climatiques et des mesures d'adaptation sur le système hydrique de la rivière Péribonka. Il a été démontré que les changements climatiques ont comme impact une hausse de la production hydroélectrique et des déversements pour la majorité des scénarios climatiques. Il s'en suit une baisse de l'efficacité des centrales. Ces résultats sont obtenus pour tous les horizons de temps et s'accroissent pour les horizons de temps lointains.

---

### 3.4 La reconstitution des apports naturels

En gestion hydrique et en modélisation, la reconstitution des apports naturels est une étape essentielle pour pouvoir comparer les données obtenues par modélisation aux données réelles. Lorsqu'un barrage est présent sur le cours d'eau, l'apport naturel ne peut pas être évalué sur le terrain. Il peut être estimé avec la méthode des bassins voisins, reconstitué par bilan hydrique ou évalué avec un modèle hydrologique.

#### 3.4.1 La méthode des bassins voisins

La méthode des bassins voisins est habituellement utilisée pour reconstituer les apports naturels sur un bassin non jaugé. Il est également possible de l'utiliser pour l'évaluation des apports naturels à un réservoir. Cette méthode consiste à effectuer une transposition des apports du bassin jaugé proportionnelle au rapport des aires des bassins versants. L'équation 3.16 est utilisée pour la transposition.

$$Q_2 = Q_1 \times \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^n \quad (3.8)$$

Où :

- $Q_1$  Débit du bassin jaugé ( $m^3/s$ )
- $Q_2$  Apports naturels ( $m^3/s$ )
- $A_1$  Aire du bassin jaugé ( $km^2$ )
- $A_2$  Aire du bassin non jaugé ( $km^2$ )
- $n$  Exposant empirique

La méthode et les critères d'utilisation pour la méthode des bassins voisins sont exposés dans le livre d'Antil *et al.* [2005] . Les critères à évaluer sont de type descriptif : superficie et altitude moyenne, nombre de cours d'eau, etc. La méthode peut être utilisée lorsque le

---

rapport des aires se situe entre 0.5 et 2. Aucune mention quant au rejet de la méthode dû à une trop grande différence entre les critères descriptifs des deux bassins n'est mentionnée.

La valeur de l'exposant empirique varie selon les sources. Anctil *et al.* [2005] proposent une valeur variant entre 0.6 et 0.9. Selon El Jabi et Rouselle [1990] , dans l'intervalle proposé :

- Les valeurs inférieures de « n » signifient de longues périodes de retour et un emmagasinement peu important;
- Les valeurs supérieures de « n » signifient des courtes périodes de retour et un emmagasinement important;
- La valeur de « n » est plus élevée pour une crue due à la fonte de neige que pour une crue due à une pluie.

### 3.4.2 Le bilan hydrique

En présence d'un réservoir, la reconstitution par bilan hydrique s'effectue à partir de l'équation 3.17.

$$A_n = Q_{out} + Q_{in} + P + E + I + \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (3.9)$$

Où :

$A_n$  Apport naturel moyen sur la période  $\Delta t$  ( $m^3/s$ )

$Q_{out}$  Débit moyen sortant au barrage sur la période  $\Delta t$  ( $m^3/s$ )

$Q_{in}$  Débit moyen provenant des barrages en amont sur la période  $\Delta t$  ( $m^3/s$ )

$P$  Pluie sur le réservoir sur la période  $\Delta t$  ( $m^3/s$ )

$E$  Évaporation sur le réservoir sur la période  $\Delta t$  ( $m^3/s$ )

$I$  Infiltration sous le réservoir sur la période  $\Delta t$  ( $m^3/s$ )

$\Delta V$  Différence de volume dans le réservoir ( $m^3$ )

---

$\Delta t$  Intervalle de temps (s)

Avec cette équation, le terme d'apports naturels dépend fortement de la précision des mesures prises sur le terrain. Notamment, les mesures limnimétriques peuvent être entachées d'erreurs dues au vent, aux précipitations, à la glace, etc. Aussi, cette équation suppose qu'il y a horizontalité du plan d'eau [Perreault *et al.*, 1995]. Ces erreurs engendrent des valeurs d'apports naturels avec des variations excessives et des valeurs négatives. Les valeurs négatives d'apports naturels sont impossibles dans les pays sous des latitudes similaires aux nôtres. En été, l'humidité de l'air est trop élevée pour poser une évaporation plus importante que le débit d'entrée, même en temps de sécheresse [Faouzi *et al.*, 1996].

La validation des données hydrométriques et des apports naturels est nécessaire afin d'effectuer une banque de données représentatives des conditions naturelles. Selon Faouzi *et al.* [2003], la validation des données devrait être le premier pas à franchir dans toute étude hydrologique.

### 3.4.3 La validation des données hydrométriques

Selon Hydro-Québec, les apports naturels « les plus probables » sont ceux ayant été filtrés [Perreault *et al.*, 1995]. Cet organisme utilise un modèle de type filtre fréquentiel. L'article de Bennis *et al.* [1996] présente les techniques multivariées (en présence de plusieurs limnimètres) de filtrage alors que l'article de Faouzi *et al.* [1996] présente les techniques univariées (un limnimètre) de filtrage. Les filtres proposés pour valider les données hydrométriques en milieu univarié sont le filtre moyenneur, le filtre à régression linéaire sur fenêtre mobile, le filtre à régression quadratique sur fenêtre mobile, le filtre médian, le filtre ébarbeur winsoriseur à priori ou à postériori, et le lisseur de Fraser. Il est également possible d'effectuer une combinaison des filtres. Lorsque les filtres sont appliqués sur une série naturelle, quatre critères sont utilisés pour les comparer, soit le coefficient d'autocorrélation,

---

la conservation des volumes totaux d'apports naturels, la conservation des pointes des crues et le contrôle du signe des apports naturels. La première étape dans la validation est de repérer les erreurs de grande amplitude en effectuant des corrections manuellement. Ensuite, il est proposé de filtrer les niveaux puisque cette série est normalement entachée d'erreurs importantes. Si les apports obtenus par bilan hydrique ne satisfont pas les critères mentionnés ci-haut, une deuxième étape de filtrage peut être appliquée sur les apports naturels [Faouzi *et al.*, 1996] .

#### 3.4.4 La modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique permet également de reconstituer les apports naturels à un site donné. Cette technique a l'avantage de pouvoir reconstituer autant d'années de données qu'il y a d'années de données météorologiques pour le site donné. Le désavantage majeur est que la série de données demeure entachée de l'incertitude de la modélisation hydrologique. Le principal défi de cette technique réside en la mise en œuvre et le calage du modèle hydrologique. Lorsque les débits observés sont manquants au site de l'étude, il est possible d'effectuer un transfert des paramètres de calage d'un bassin versant à un autre lorsque les caractéristiques de ces derniers le permettent. Il est également possible de caler le modèle à un site plus en aval et de procéder au transfert des paramètres de calage par la suite. Le prochain sous-chapitre effectue un survol des principes de la modélisation hydrologique.

---

### 3.5 La modélisation hydrologique

La modélisation du comportement hydrologique d'un bassin versant est primordiale lorsque des projets de gestion des ressources hydriques et d'aménagement du territoire sont effectués. Les modèles hydrologiques peuvent notamment servir à reconstituer des apports naturels historiques, à effectuer de la prévision hydrologique, à effectuer des analyses d'impacts (ex. impacts climatiques, impact de l'imperméabilisation des sols) et à effectuer du dimensionnement d'ouvrages hydrauliques [Hingray *et al.*, 2009] .

Le comportement hydrologique d'un bassin versant est complexe. Cette complexité provient entre autres de la complexité et de l'hétérogénéité intrinsèque des milieux naturels. Elle est également associée à la multitude de processus hydrologiques agissant à des échelles de temps et d'espace différentes. De ce fait, un modèle hydrologique est une représentation simplifiée de l'hydrosystème et de son fonctionnement. La structure des modèles est orientée vers l'échelle temporelle et spatiale des processus hydrologiques d'intérêt [Hingray *et al.*, 2009] . Plusieurs modèles hydrologiques sont utilisés actuellement en recherche et en mode opérationnel. La prochaine section effectue un court survol des types de modèles hydrologiques.

#### 3.5.1 Les types de modèles hydrologiques

De nombreuses propositions de classification des modèles hydrologiques ont été effectuées dans la littérature. Hingray *et al.* [2009] en font la synthèse.

Selon les auteurs, les modèles peuvent être classifiés selon la nature des relations utilisées pour la représentation des processus; un modèle peut être empirique, conceptuel ou à base physique. Les modèles empiriques transforment les entrées en sorties à l'aide d'équations développées et ajustées avec des observations. Ils ne cherchent pas à expliquer les processus hydrologiques. Les modèles conceptuels représentent les processus hydrologiques sans

---



nécessairement recourir aux lois de la physique. Ils se basent sur la perception que l'hydrologue a du comportement du bassin hydrologique (ex : les modèles à réservoir). Les modèles à base physique représentent le comportement hydrologique avec un couplage de sous-modèles représentant tous un processus hydrologique distinct. Ils se basent sur une discrétisation spatiale très fine du milieu.

Les modèles peuvent également être classifiés selon leur manière de représenter l'espace : un modèle peut être global, spatialisé, semi-spatialisé ou distribué. Le modèle global utilise uniquement une unité hydrologique. Les processus hydrologiques ne varient pas en fonction de l'espace dans ce modèle. Le modèle français GR4J [Perrin *et al.*, 2003] fait partie de cette catégorie. Les autres types de modèles divisent l'espace en unités spatiales distinctes. Le modèle spatialisé divise l'espace en éléments fins en respectant leur organisation dans l'espace. Ces modèles sont principalement utilisés lorsque la réponse hydrologique d'un bassin versant est fonction de sa géomorphologie. Le modèle semi-spatialisé divise l'espace en unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH). Celles-ci se vidangent les unes dans les autres ou dans le réseau hydrographique principal. Le modèle Hydrotel utilisé au CEHQ fait partie de cette catégorie. Le modèle distribué divise quant à lui l'espace en unités hydrologiques représentatives (UHR). Le comportement hydrologique du bassin versant est obtenu en effectuant la somme pondérée des UHR. L'organisation spatiale des UHR est souvent négligée dans ce type de modèle. Le modèle distribué tient son nom du fait que les UHR peuvent être discrétisées par une seule caractéristique (ex : altitude). Dans certains modèles, une loi de distribution statistique est utilisée pour décrire la distribution du paramètre et c'est pourquoi ces modèles sont nommés « distribués ». Le modèle Topmodel fait partie de cette catégorie.

Un modèle hydrologique peut être déterministe ou stochastique selon sa manière de considérer les variables hydrologiques et les relations entre ces dernières. Le modèle déterministe stipule que la relation entre les données d'entrée et les données de sortie d'un

---

modèle est univoque pour des conditions initiales et limites données. Le modèle stochastique peut quant à lui fournir différentes données de sortie pour les mêmes données d'entrée puisqu'il est en partie ou totalement relié au hasard.

Finalement, un modèle peut être événementiel ou continu selon la nature des périodes de temps considérées. Le modèle événementiel s'intéresse uniquement à un événement donné (ex : crue) et il nécessite une bonne estimation des conditions initiales. Les modèles continus peuvent simuler plusieurs années de données. Ils couvrent tous les événements hydrométéorologiques. Ces modèles doivent considérer tous les processus pouvant avoir un impact significatif sur le comportement d'un bassin versant. Ils nécessitent également la connaissance des conditions initiales. Contrairement au modèle événementiel, celles-ci deviennent négligeables après un certain laps de temps. Selon les règles de l'art, une période de chauffe de 2 ans est utilisée pour être en mesure de s'affranchir des conditions initiales.

### 3.5.2 Le calage et la validation des modèles hydrologiques

Le calage d'un modèle hydrologique est une étape délicate de la mise en œuvre. Cette étape consiste à étalonner les différents paramètres du modèle pour que la réponse hydrologique simulée du bassin versant soit semblable aux observations. L'étape de validation consiste à évaluer la performance du modèle sur une période de temps différente que celle utilisée pour le calage. Selon les règles de l'art et lorsque c'est possible, quinze années de données en calage et en validation sont souhaitées pour s'assurer de la robustesse du modèle.

Les stratégies de calage sont multiples, mais elles sont habituellement fonction de l'objectif du modèle hydrologique. Le calage d'un modèle peut être effectué manuellement, mais cette étape devient fastidieuse si le nombre de paramètres est élevé. Plusieurs algorithmes de calage automatique ont été développés pour résoudre ce problème, dont le Shuffled Complex Evolution de l'Université de l'Arizona (SCE-UA) [Duan *et al.*, 1993]. Les stratégies de

---

calage influencent la façon dont le modèle représente l'hydrosystème ainsi que la performance de ce dernier [Hingray *et al.*, 2009] .

Les équations 3.18, 3.19 et 3.20 présentent respectivement les critères de Nash, de Nash sur les logarithmes et de biais, des critères souvent utilisés en hydrologie pour le calage et la validation. La sélection du critère dépend de l'objectif de modélisation. Le critère de Nash exprime la différence relative entre l'erreur du modèle hydrologique et l'erreur d'un modèle de référence, défini par la moyenne des débits. Ce critère donne beaucoup de poids aux valeurs fortes dans l'optimisation, donc il est utilisé pour bien représenter les crues. La formulation logarithmique de l'équation 3.19 est utilisée puisqu'elle permet d'augmenter le poids des valeurs faibles. Ce critère peut être utilisé pour représenter les étiages. Finalement, le critère de biais permet de mesurer la tendance du modèle à sous-estimer ou à surestimer les volumes d'eau observés. Les critères de Nash doivent être maximisés (le maximum étant de 1) alors que le critère de biais doit être minimisé.

$$F = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o(i) - Q_s(i))^2}{\sum_{i=1}^n (Q_o(i) - Q_o)^2} \quad (3.10)$$

$$F = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_o(i) + \eta) - \ln(Q_s(i) + \eta))^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(Q_o(i) + \eta) - \ln(Q_o + \eta))^2} \quad (3.11)$$

$$F = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_o(i) - Q_s(i)) \quad (3.12)$$

Où :

F Critère à minimiser ou maximiser

Q<sub>o</sub> Valeurs observées

---

$Q_s$	Valeurs simulées
$Q_o$	Moyenne des valeurs observées
$\eta$	Fraction du débit moyen à définir ( $\eta=Q_o / 20$ )
$n$	Nombre de valeurs

Certains problèmes sont fréquents dans le calage des modèles hydrologiques comme le problème d'échelle, le problème d'unicité, le problème d'équifinalité et le problème de l'incertitude. Ils sont discutés dans Beven [2001] .

### 3.5.3 La modélisation hydrologique en changements climatiques

Les modèles hydrologiques peuvent être utilisés pour effectuer l'analyse des impacts des changements climatiques sur l'hydrologie d'un bassin versant. Pour ce faire, les données de sortie des modèles climatiques sont utilisées comme intrants dans le modèle hydrologique. Il sera question des modèles climatiques et des techniques de transfert des données utilisées dans les prochains paragraphes.

Les modèles de circulation générale de l'atmosphère et de l'océan (MCGAO) sont les modèles utilisés par les experts mondiaux pour effectuer des simulations climatiques. Ils permettent notamment d'effectuer des simulations en fonction des concentrations des gaz à effet de serre et des aérosols présents dans l'atmosphère pour simuler les changements climatiques. Le processus de circulation océanique doit être modélisé dans les MCGAO. Ce dernier peut être observé de l'intervalle de temps centenaire à l'intervalle de temps millénaire. Vu l'envergure du domaine et de la période de simulation, les temps de calcul sont élevés et la résolution des modèles est faible. Le maillage horizontal varie entre 300 à 500 km<sup>2</sup>. Le climat régional est souvent influencé par des circulations de plus petite échelle. Des biais dans les données de simulation des MCGAO peuvent être observés puisqu'il n'y a aucune variation de la circulation atmosphérique à l'échelle régionale (exemple : une chaîne

---

de montagnes très étroite crée une zone d'ombre pluviométrique à plus grande échelle) [GIEC, 2007] . Plusieurs modèles MCGAO sont utilisés actuellement à travers le globe, notamment le Modèle climatique global canadien version 3 (MCGC3) [Flato *et al.*, 2005] , le *Community Climate Model version 3* (CCSM3) [Collins *et al.*, 2006] , le *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Climate Model version 2.1* (GFDL) [Anderson *et al.*, 2004] et le *Hadley Centre Climate Model version 3* (HadCM3) [Pope *et al.*, 2000; C. Gordon *et al.*, 2000] .

Comme les études hydrologiques en changements climatiques nécessitent le climat régional comme intrants, il est nécessaire d'avoir recours à des techniques pouvant prendre l'information des MCGAO pour produire un climat régional à plus haute résolution. Ces techniques, connues sous le nom de techniques de régionalisation, peuvent être séparées en trois catégories, soit [GIEC, 2007] :

- Les modèles de circulation générale de l'atmosphère (MCGA) à haute résolution ou à résolution variable;
- Les modèles régionaux de climat (MRC);
- Les méthodes empirique/statistique ou statistique/dynamique

Les MRC et les méthodes statistiques sont connues sous le nom de techniques de mise à l'échelle pour les MCGAO. À ce jour en hydrologie, ces techniques sont les plus utilisées. Les MRC sont couverts dans le prochain paragraphe puisqu'ils seront utilisés dans le projet.

La mise à l'échelle avec les MRC est aussi dénommée mise à l'échelle dynamique. Elle consiste à piloter le MRC avec des conditions initiales et des conditions atmosphériques et océaniques aux frontières. Les données pour le pilotage peuvent provenir des MCGAO ou des « ré-analyses » des observations. Les « ré-analyses » sont une combinaison de prévisions météorologiques et d'observations. Elles servent entre autres à produire « des archives d'un grand nombre de variables atmosphériques et océaniques sur des grilles à une résolution temporelle de quelques heures pour plusieurs décennies » [Ouranos, 2013] . Les données

---

pour le pilotage peuvent notamment inclure des forçages pour les gaz à effets de serre et les aérosols pour produire différents scénarios de changements climatiques. Les MRC peuvent fournir des données de haute résolution, soit un maillage de 40 à 50 km, et sur quelques décennies. Différents MRC sont utilisés actuellement en recherche, notamment le Modèle régional de climat canadien (MRCC) [Caya et Laprise, 1999] , le *Regional Hadley Model 3* (HRM3) [PRECIS, 2011] , le *Regional climate model version 3* (RCM3) [US Santa Cruz, 2013] et le *Weather Research and Forecasting model* (WRF) [Skamarock *et al.*, 2010] . Dépendamment du domaine et de la période à l'étude, les MRC demeurent gourmands au niveau du temps de calcul. Ils assurent cependant la cohérence dans le temps et dans l'espace d'une centaine de variables climatiques [Ouranos, 2013] . Le maillage à haute résolution peut être encore trop grossier pour certaines applications particulières en hydrologie, telle que l'analyse en changements climatiques de très petits bassins versants [J. Chen *et al.*, 2011] . Des biais systématiques entre les données de simulation des MRC et les données observées peuvent survenir. Ainsi, il est nécessaire d'avoir recours à des techniques de débiaisage des données des MRC avant de les utiliser dans les modèles hydrologiques. Une des techniques utilisée est le *Local intensity scaling* (LOCI) pour les pluies [Schmidli *et al.*, 2006] .

---

## CHAPITRE 4 MÉTHODOLOGIE

Une approche par modélisation est retenue pour l'ensemble du projet puisqu'une analyse d'impacts en changements climatiques est nécessaire à l'atteinte des objectifs. L'approche retenue pour effectuer le projet est présentée à la figure 4.1. Elle indique comment les différents éléments à considérer dans l'étude sont amalgamés pour produire les résultats. Ainsi, le climat observé et l'impact des changements climatiques sont traduits par le modèle hydrologique. Ce dernier produit des séries d'apports qui seront considérées dans les scénarios. Les débits réservés écologiques sont utilisés pour rencontrer les normes environnementales et la croissance démographique est représentée par le patron de consommation de la prise d'eau. Ces deux derniers éléments ainsi que les contraintes hydriques sont également introduits dans les scénarios. Chaque scénario est traité par le modèle de simulation. Dans ce dernier, il est possible de gérer le barrage Foster de deux façons, soit avec les règles de gestion actuelles ou avec les règles de gestion adaptées. Ultiment, le modèle de simulation produit des séries temporelles de débits et de niveaux d'eau qui peuvent être analysées. Les éléments de la figure sont discutés aux sous-chapitres 4.1 à 4.5. Ensuite, le débit maximal pouvant être prélevé actuellement est déterminé au sous-chapitre 4.6. L'impact des changements climatiques est quantifié au sous-chapitre 4.7 et des mesures d'adaptation aux changements climatiques sont proposées au sous-chapitre 4.8.

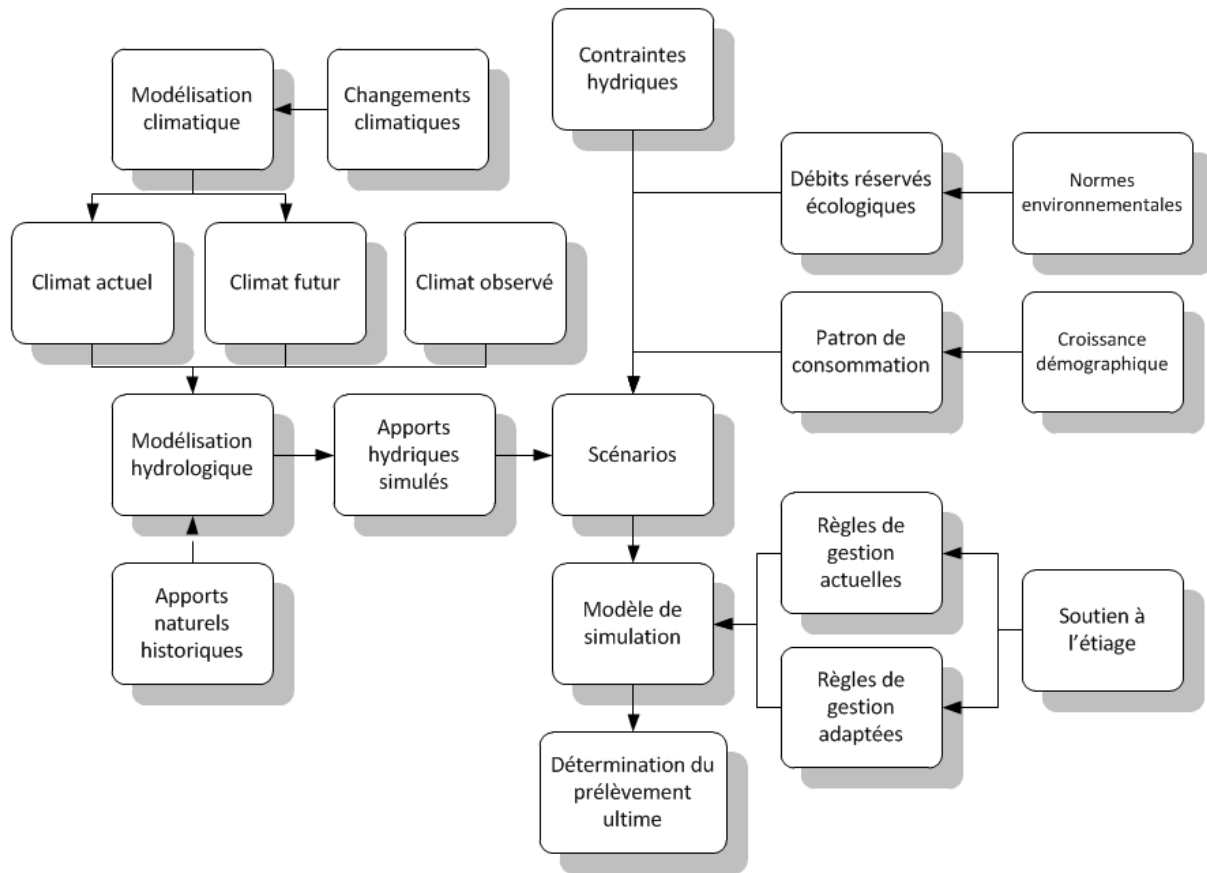


Figure 4.1 - Approche utilisée pour la modélisation du système



## 4.1 La modélisation climatique

### 4.1.1 Objectif

L'objectif de l'utilisation des modèles climatiques est de fournir des séries de données de précipitations et de températures minimales et maximales en période de référence et en période future. Ces séries de données sont nécessaires à l'analyse d'impact en changements climatiques. La période de référence considérée est de 1971 à 2000 et la période future est de 2041 à 2070.

### 4.1.2 Sélection du scénario climatique et des modèles

Pour effectuer le projet, sept projections climatiques générées avec le scénario de gaz à effet de serre SRES A2 sont utilisées. Les sept projections climatiques sont un amalgame de quatre modèles régionaux pilotés par quatre différents modèles globaux. Les sept projections climatiques proviennent du projet NARCCAP (North American Regional Climate Change Assessment Program) et sont présentées au tableau 4.1 [Mearns *et al.*, 2009] .

**Tableau 4.1 - Projections climatiques du modèle NARCCAP utilisées pour le projet**

Modèles régionaux	Modèles globaux			
	CCSM	MCGC3	GFDL	HadCM3
MRCC	•	•		
HRM3				•
RCM3		•	•	
WRF	•	•		

Les modèles régionaux utilisés sont le Modèle Régional de Climat Canadien (MRCC) [Caya et Laprise, 1999] , le *Regional Hadley Model 3* (HRM3) [PRECIS, 2011] , le *Regional Climate Model version 3* (RCM3) [US Santa Cruz, 2013] et le *Weather Research and Forecasting model* (WRF) [Skamarock *et al.*, 2010] . Les modèles globaux utilisés sont le *Community Climate Model version 3* (CCSM3) [Collins *et al.*, 2006] , la version 3 du Modèle Climatique Global Canadien (MCGC3) [Flato *et al.*, 2005] , le *Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Climate Model version 2.1* (GFDL) [Anderson *et al.*, 2004] et le *Hadley Centre Climate Model version 3* (HadCM3) [Pope *et al.*, 2000; C. Gordon *et al.*, 2000] . Toutes les données des modèles climatiques proviennent d'Ouranos, le consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques.

#### 4.1.3 Correction sur les données

Une correction de biais est appliquée sur les données de précipitations et de températures des projections climatiques pour ajuster la période de référence aux données observées. La même correction de biais est appliquée à la période future. Cette technique considère que le biais entre les résultats de simulation de la période de référence et les observations demeure le même en période future. La correction de biais pour les températures est basée sur la moyenne mensuelle. Donc, la différence entre la moyenne mensuelle des températures observées et la moyenne mensuelle des températures de référence est appliquée aux données journalières de la période de référence et de la période future. Pour les précipitations, la technique *Local Intensity Method* (LOCI) est utilisée [Schmidli *et al.*, 2006] . Elle combine une correction de biais pour le taux moyen mensuel de journées avec précipitations et la moyenne mensuelle d'intensité des journées de précipitations. Les données observées considérées ici proviennent du krigeage réalisé par le CEHQ puisque les points de grille se superposent parfaitement avec le grillage des modèles climatiques.

---

## 4.2 La modélisation hydrologique

### 4.2.1 Objectif

Le premier objectif de l'utilisation d'un modèle hydrologique est de reconstituer les apports naturels sur une longue série de données. Les années 1971 à 2000 sont sélectionnées pour la cohérence avec la période de référence des modèles climatiques. Le deuxième objectif est de simuler les débits en période de référence et en période future à partir des données de températures et de précipitations fournies par les modèles climatiques.

### 4.2.2 Sélection du modèle

Le modèle hydrologique retenu est le modèle "*Soil and Water Assessment Tool*" (SWAT) [SWAT, 2013]. Ce modèle est de type conceptuel semi empirique et distribué fonctionnant à temps continu. Il intègre les différents processus physiques sur le bassin versant. Un modèle distribué avait été sélectionné pour le projet dans l'optique d'effectuer une analyse d'impact sur l'évolution de l'utilisation du sol dans le futur. Cette analyse d'impact a cependant été écartée de l'étendue du projet en cours de route. L'étape de préparation des données d'entrée d'un modèle distribué est longue et laborieuse. Le fait que le modèle SWAT ait été implanté au lac Brome pour un projet antérieur du groupe de recherche a facilité le choix du modèle; une économie de temps substantielle a ainsi été réalisée. Un intervalle de temps journalier est retenu pour la modélisation pour la consistance avec les données observées.

SWAT peut être utilisé pour évaluer l'évapotranspiration, le ruissellement, l'écoulement des eaux souterraines, le stockage dans les réservoirs et le mouvement de l'eau. SWAT peut également être utilisé pour évaluer le mouvement des sédiments, la qualité de l'eau, la teneur en nutriments du sol et la croissance des plantes. Les données d'entrée nécessaires à la mise en œuvre de SWAT sur un bassin versant incluent minimalement la topographie, la pédologie, l'occupation des sols, les données météorologiques. La délimitation du bassin

---

versant et des sous-bassins est effectuée automatiquement avec l'interface utilisateur ArcSWAT. Cette interface fait le lien entre SWAT et le système d'information géographique ArcGIS pour faciliter la préparation des données d'entrée du modèle. Les sous-bassins sont divisés en UHR. Une UHR est une parcelle de terrain ayant la même occupation du sol, le même type de sol et la même pente sur toute sa surface. Les processus du modèle sont calculés pour chaque UHR et cumulés pour fournir une valeur totale à l'exutoire de chaque sous-bassin. En résumé, SWAT évalue la quantité et la qualité d'eau et la quantité de sédiments dans le tronçon principal de chaque sous-bassin. Le laminage de l'eau et des sédiments est effectué par la suite. Dans le modèle, chaque processus peut-être ajusté par des paramètres de calage. Ceux-ci permettent au modèle de refléter les conditions hydrologiques du bassin versant à l'étude.

#### 4.2.3 Les données d'entrée

Tel qu'il a été mentionné au chapitre 2, peu de données hydriques sont disponibles sur le sous-bassin appalachien de la rivière Yamaska. Ainsi, le modèle hydrologique s'étend en aval jusqu'à Farnham où il a été calibré et validé. Une validation supplémentaire est effectuée à l'exutoire du lac Brome avec les apports naturels calculés par bilan hydrique. La figure 4.2 représente le bassin versant de la rivière Yamaska à la hauteur de Farnham. Il a été divisé en 33 sous-bassins versant. Les points d'intérêts sur le bassin versant sont à l'exutoire d'un sous-bassin versant dans le modèle pour faciliter le transfert des données de sortie vers le modèle de simulation. La prise d'eau à Bromont est à l'exutoire du sous-bassin 20 et le barrage Foster est à l'exutoire du sous-bassin 12. Deux réservoirs sont implantés dans le modèle, soit le lac Brome (sous-bassin 12) et le réservoir Choinière (sous-bassin 1). Uniquement deux réservoirs sont implantés puisqu'ils ont été considérés comme étant les seuls à pouvoir avoir un impact significatif sur l'écoulement à Farnham. Le lac Boivin et le lac Davignon sont contrôlés par des seuils où un laminage de crue peut avoir lieu; les paramètres de calage

---

s'ajusteront en conséquence. Le lac Waterloo est, quant à lui, situé en amont du réservoir Choinière. Le contrôle au réservoir Choinière fait en sorte qu'il est possible de négliger celui au lac Waterloo.

Tel qu'il a été mentionné précédemment, les données d'entrée du modèle SWAT mis en œuvre antérieurement au lac Brome sont récupérées. Ainsi, les données topographiques, pédologiques, d'occupation du sol et de pratiques agricoles sont telles qu'elles ont été utilisées dans l'autre modèle. Les extraits suivants décrivent ces données et ont été tirés du rapport remis à lac Brome [Lacey *et al.*, 2011] .

« La topographie provient de la base de données DNEC (Données numériques d'élévation du Canada) [Géobase, 2011b] . La base de données est constituée de quadrillages d'élévation du terrain à intervalles réguliers. Les DNEC sont basés sur les éléments hypsographiques et hydrographiques des fichiers numériques de la base nationale de données topographiques [...] aux échelles 1/50 000 et de 1/250 000 ou des données de position à diverses échelles obtenues des provinces et territoires. L'intervalle dans le quadrillage est basé sur les coordonnées géographiques à une résolution de 0.75 seconde d'arc (23m). Ceci implique donc que chaque maille de 23 m de côté est caractérisée par une altitude moyenne. » [Lacey *et al.*, 2011]

« La carte des sols du bassin versant provient de la base de données ITC (Inventaire des terres du Canada) [Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2013] . L'ITC est un inventaire complet et pluridisciplinaire des terres rurales du Canada. Le potentiel des terres pour l'agriculture, la foresterie, les loisirs, la faune y est cartographié. L'utilisation d'une structure standardisée permet une liaison matricielle pour afficher ou faire des requêtes de la composition du sol en terme d'unités et la caractérisation des paramètres de sol sélectionnés tels que le carbone organique, le pH, la capacité de stockage de l'eau, la profondeur du sol, la

---

fraction d'argile de sable de limon, la salinité, la classe, la texture et la granulométrie.» [Lacey *et al.*, 2011]

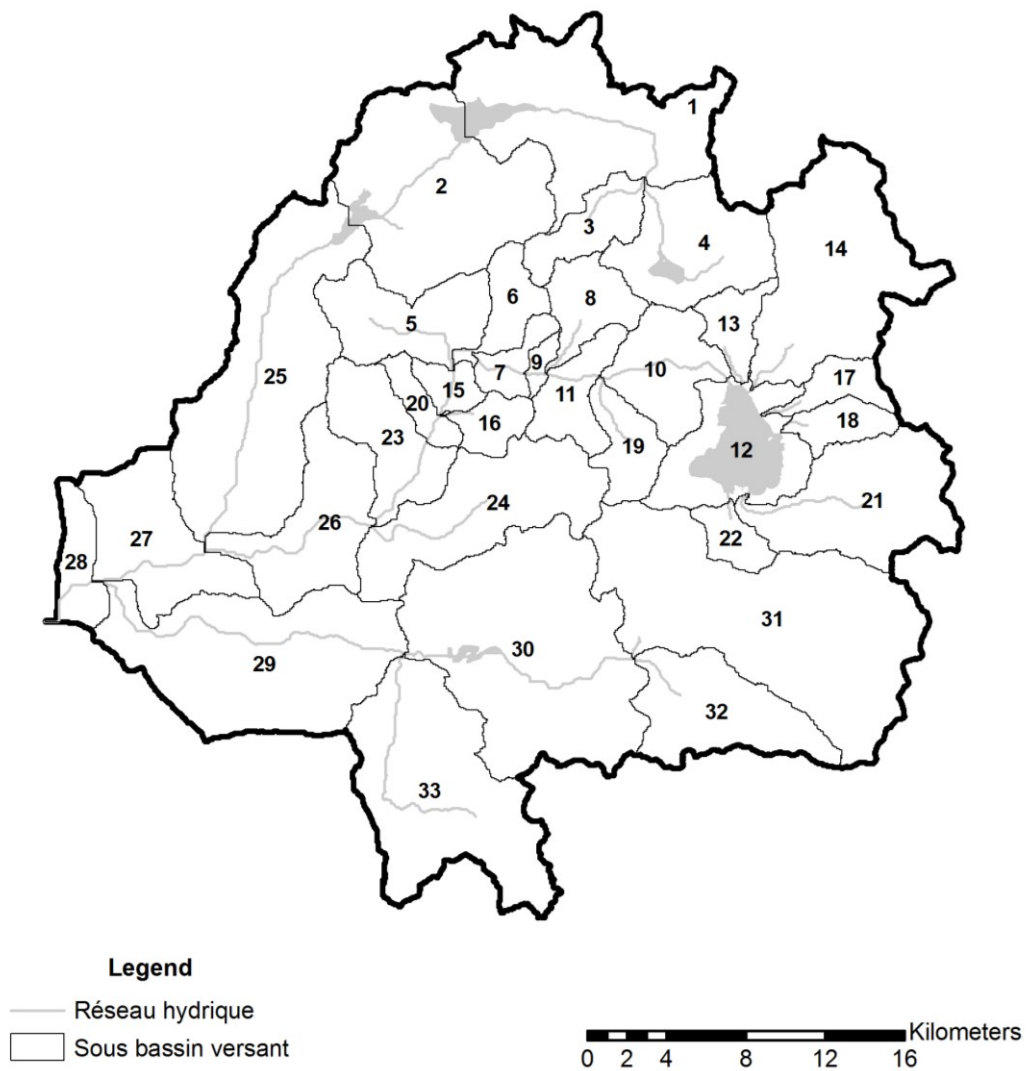


Figure 4.2 - Sous-bassins versants du modèle hydrologique

« La carte d'occupation du sol a été extraite de la base de données de couverture du sol de Géobase [Géobase, 2011a] . Les données de la couverture du sol sont le résultat de la vectorisation de données matricielles thématiques issues de la classification d'orthoimages Landsat5 et Landsat7 des zones forestières et agricoles du Canada et des territoires du Nord. La couverture forestière provient du projet d'Observation de la Terre pour le développement durable des forêts [...], initiative du Service canadien des forêts [...], de concert avec l'Agence spatiale canadienne [...] et réalisée en partenariat avec les provinces et les territoires. La couverture agricole provient du Service National d'information sur les terres et les eaux [...] d'Agriculture et Agroalimentaire Canada [...]. » [Lacey *et al.*, 2011]

SWAT nécessite cinq types de données climatiques pour sa mise en œuvre, soit la précipitation, les températures minimale et maximale, le rayonnement solaire, la vitesse du vent et l'humidité relative. Les précipitations et les températures sont des séries de données fournies au modèle à des intervalles de temps journalier. Deux séries de données observées sont utilisées avec le modèle. Elles sont présentées au sous-chapitre 2.2. Les données manquantes des stations d'Environnement Canada ont été interpolées par la méthode du rapport normal pour les précipitations et par la moyenne des stations environnantes pour les températures. Le calage du modèle est effectué avec cette série de données. Le krigeage du CEHQ peut être utilisé tel quel dans le modèle. Pour l'étude en changements climatiques, les séries de données provenant des sept projections climatiques en période de référence et en période future présentées au sous-chapitre 4.1 sont utilisées. Dans tous les cas, le rayonnement solaire, la vitesse du vent et l'humidité relative sont simulées dans le modèle par un générateur de climat WXGEN que l'on retrouve dans SWAT. Les données d'entrée nécessaires au fonctionnement du générateur de climat sont présentées en détail dans la documentation de SWAT [SWAT, 2013] . Elle consiste en des indices climatologiques et statistiques pouvant être calculés à partir d'une station météorologique. Pour le projet, ces données proviennent de la station 7028123 à Sherbrooke [Environnement Canada, 2012] .

---

Cette station a été sélectionnée puisqu'elle est la plus proche du site de l'étude à fournir toutes les données nécessaires.

#### 4.2.4 Le calage et la validation

Le calage du modèle est effectué avec les données de la station hydrométrique 030302 située à Farnham [CEHQ, 2012] . Les débits à cette station sont influencés en amont par le réservoir Choinière et par le lac Brome. Les débits observés disponibles à ces deux stations sont forcés aux barrages dans la période de calage et de validation. Telles que présentées au sous-chapitre 2.2, les données sont disponibles de 2005 à aujourd'hui au lac Brome et de 1974 à aujourd'hui au réservoir Choinière. Lorsque les données ne sont pas disponibles, le modèle simule le débit au barrage en mode « naturel », donc comme s'il n'y avait pas de barrage. La période de calage s'étend de septembre 1998 à août 2012. La sélection de cette plage de données permet d'inclure les années de contrôle au lac Brome et accélère l'atteinte de l'équilibre dans le modèle puisque aucun couvert de neige n'est présent au début de la période de simulation. La période de validation est de septembre 1984 à 1996. Deux années de chauffe sont considérées en calage et en validation.

La fonction objective pour le calage, présentée à l'équation 4.1, est une combinaison du critère de Nash et du critère de Nash sur les logarithmes. Cette fonction objective permet de bien simuler les crues sans négliger les périodes d'étiage. La minimisation de F est souhaitée lors du calage. Le modèle est calé par méthode automatique; l'algorithme utilisé est le Shuffled Complex Evolution de l'Université de l'Arizona (SCE-UA) [Duan *et al.*, 1993] . Il est à noter que la méthode de calage utilisée n'est pas celle incluse dans SWAT. La méthode de calage de SWAT permet uniquement d'utiliser le critère de Nash, c'est pourquoi elle n'a pas été utilisée. Le SCE-UA a été utilisé dans l'environnement Matlab et des codes ont été développés afin de changer les paramètres de calage automatiquement dans les fichiers d'entrée du modèle. Le calage du modèle a donc été effectué totalement à partir de

---



l'environnement Matlab. Les résultats du calage et de la validation sont présentés au sous-chapitre 5.2.

$$F = 2 - Nash - Nash_{log} \quad (4.1)$$

Où :

Nash Critère présenté à l'équation 3.18

Nash<sub>log</sub> Critère présenté à l'équation 3.19

#### 4.2.5 La mise en œuvre en changements climatiques

Une fois le calage terminé, quelques manipulations dans le modèle hydrologique sont nécessaires pour effectuer l'analyse d'impact en changements climatiques et pour le transfert des données vers le modèle de simulation. Le modèle est roulé en mode « naturel » au lieu du mode « contrôlé » pour effectuer l'analyse en changements climatiques puisque les débits au barrage en période future ne sont pas connus. Les stations météorologiques d'Environnement Canada utilisées lors du calage sont remplacées par les points de grille du krigeage du CEHQ et des projections climatiques. Les données des stations météorologiques d'Environnement Canada sont utilisées lors du calage dans le but d'avoir le plus d'années de données qui chevauchent les années de données au lac Brome. Pour le reste de l'étude, le modèle hydrologique simule les débits avec le krigeage du CEHQ ( $Q_{actuel}$ ) et les données des projections climatiques ( $Q_{ref\&fut}$ ). Une analyse de sensibilité relative à cette modification est présentée à la section 5.2.2. Tel qu'il sera présenté au sous-chapitre 4.3, le modèle de simulation nécessite les apports à deux endroits sur le bassin versant, soit au barrage Foster et à la CTE. La donnée journalière à la CTE doit représenter l'apport du bassin intermédiaire à partir du barrage Foster. Pour obtenir cette donnée, il est nécessaire de « déconnecter » le bassin versant en amont du barrage Foster. Ceci a été effectué en modifiant le fichier texte « fig.fig » dans les données d'entrée de SWAT.

---

## 4.3 Le modèle de simulation

### 4.3.1 Objectif

L'objectif d'utiliser un modèle de simulation est de connaître les débits à la CTE en fonction des décisions au barrage Foster. Ainsi, il est possible de prendre des décisions au barrage selon les règles de la convention et selon les règles de gestion modifiées selon les mesures d'adaptation sélectionnées.

### 4.3.2 Sélection du modèle

La création d'un modèle de simulation maison dans l'environnement Matlab créé sur mesure pour les besoins du projet a été jugée le choix le plus judicieux. La création du modèle de simulation maison facilite, accélère et rend plus flexible l'analyse des données. Finalement, aucun module d'acheminement de crue n'est nécessaire étant donné l'intervalle de temps journalier utilisé et le temps de parcours entre le barrage Foster et la CTE. Ceci diminue la complexité du modèle.

### 4.3.3 Le fonctionnement général

La figure 4.3 présente les différents processus hydrauliques et le cheminement pour la prise de décision au barrage du modèle de simulation. Les prochains paragraphes décrivent en détail les processus et les hypothèses posées lors de la modélisation.

#### **Informations pour décision au barrage**

Pour prendre une décision au barrage, deux informations sont disponibles, soit le niveau et le stockage du réservoir au temps  $t-1$  et le débit à la CTE au temps  $t-1$ . Il a été posé comme hypothèse que le débit à la CTE pouvait être connu avec le système de suivi en temps réel de

---

Ski Bromont. Le débit au temps  $t-1$  a été considéré pour ne pas prendre une décision au barrage en fonction d'une valeur instantanée de débit.

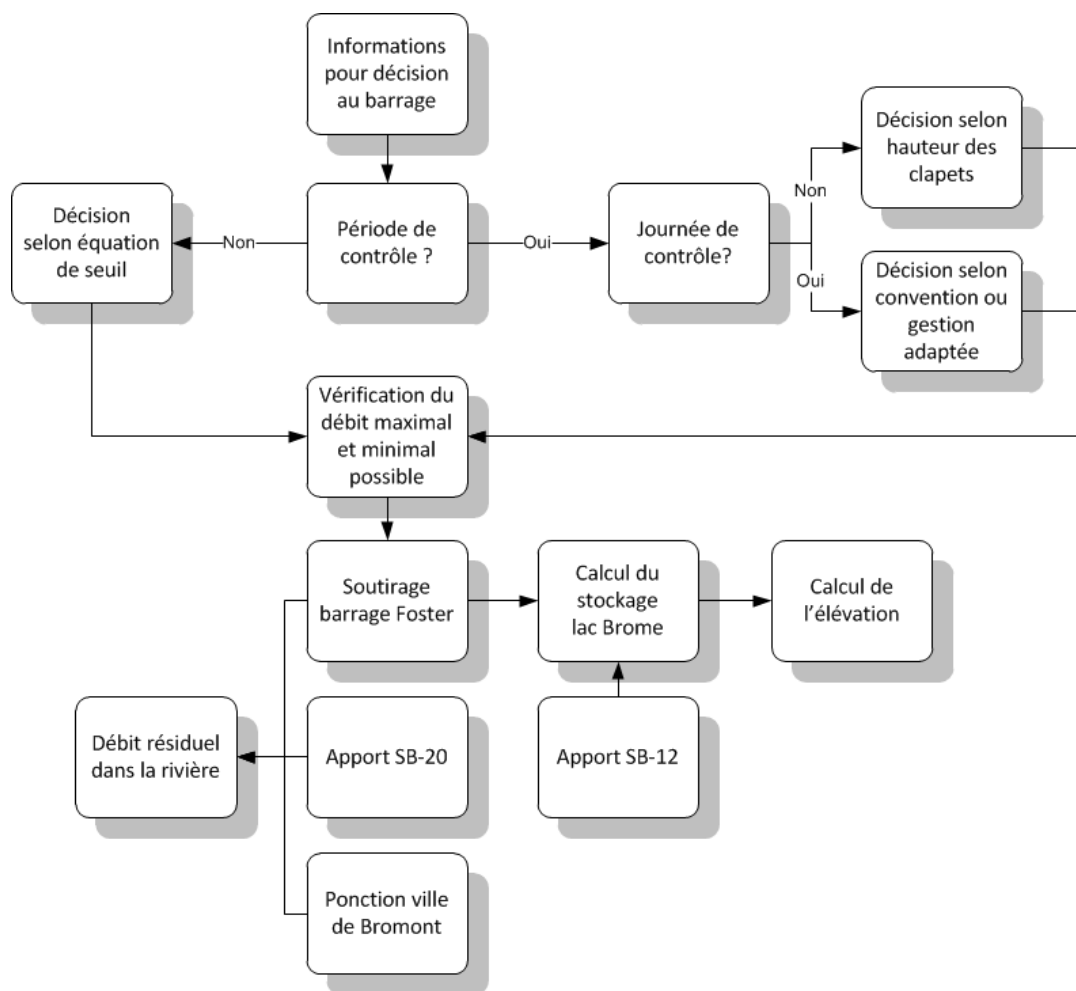


Figure 4.3 - Processus et prise de décision du modèle de simulation

### **Période de contrôle**

Tel que présenté au sous-chapitre 2.3, le barrage est contrôlé uniquement en période estivale. Dans le modèle de simulation, les dates de début et de fin du contrôle sont fixes et elles sont basées sur les observations. Le contrôle débute en moyenne le 19 avril (jour julien 109) et se termine le 30 novembre (jour julien 334). La période de contrôle peut être modifiée par l'utilisateur dans les données d'entrée du modèle de simulation.

### **Journée de contrôle**

Selon les informations recueillies lors du projet, l'intervalle de temps de gestion varie de un à quelques jours. L'intervalle de temps retenu pour les décisions au barrage est de 3 jours. Cette option peut également être modifiée facilement par l'utilisateur. L'intervalle de temps du modèle de simulation est quant à lui de un jour. Ainsi, la décision au barrage est effectuée différemment pour les journées de contrôle et celles de non contrôle. Il est à noter que les justifications de la décision sur l'intervalle de temps journalier sont présentées au sous-chapitre 4.2.

### **Décision selon l'équation de seuil**

Tel qu'expliqué à la section 2.3.1, lors de la période de non contrôle, les clapets au barrage sont complètement ouverts. Il est à noter qu'une coupe présentant le fonctionnement d'un clapet est présentée à la figure 2.5. Une relation niveau-débit est nécessaire dans le modèle à ce moment pour prendre une décision automatiquement. La relation de seuil à parois épaisses présentée à l'équation 4.2 est retenue. Les équations de cette section sont tirées du livre de White [2008].

$$Q = ab H^{1.5} \quad (4.2)$$

---

Où :

Q	Débit (m <sup>3</sup> /s)
$\alpha$	Coefficient de débit
b	largeur du seuil (m)
H	Hauteur d'eau au-dessus du seuil prise à quelques mètres en amont du seuil

Le coefficient «  $\alpha$  » est présenté à l'équation 4.3. La largeur « b » est de 13.1 m. Elle représente la largeur des 5 clapets de 2.62 m du barrage Foster. La valeur « H » n'est pas mesurée au barrage. Elle a plutôt été calculée avec l'équation 4.4. Les paramètres  $\alpha$  et  $H_{seuil}$  sont calibrés manuellement à partir d'observations du niveau du Lac Brome et du débit au barrage Foster. Le critère de Nash est utilisé. Les données utilisées lors du calage sont les données observées en période de non contrôle. Les résultats sont présentés au sous-chapitre 5.3.

$$\alpha = \frac{2}{3} C_d \sqrt{g} \quad (4.3)$$

$$H = H_{lb} - H_{seuil} \quad (4.4)$$

Où :

$C_d$	Coefficient de débit
$H_{lb}$	Niveau d'eau au lac Brome (m)
$H_{seuil}$	Niveau du seuil

### Décision selon la convention ou la gestion adaptée

En période et en journée de contrôle, deux modes de décision sont possibles au barrage, soit celui de la convention et celui de la gestion modifiée en fonction des mesures d'adaptation aux changements climatiques. Le fonctionnement de la convention est présenté au sous-

---

chapitre 4.5 tandis que la gestion modifiée selon les mesures d'adaptation est présentée au sous-chapitre 4.8.

### Décision selon la hauteur des clapets

En période de contrôle et en journée de non contrôle, une équation est nécessaire au barrage pour effectuer le soutirage automatiquement. Pour ce faire, l'équation 4.2 est retenue en utilisant un coefficient de seuil à parois mince. La valeur de « b » est toujours de 13.1 m. Ainsi, l'hypothèse que l'opérateur ouvre toujours les 5 clapets à la même hauteur est posée. La hauteur de H est calculée selon l'équation 4.4. Dans ce cas-ci, la hauteur du seuil est variable. Cette dernière est déduite à partir de l'équation 4.4 en isolant « H » lors de la journée de contrôle. La valeur est conservée en mémoire en vue d'être utilisée lors des journées de non contrôle. Finalement, la valeur de  $C_d$  pour un seuil à parois mince peut être déterminée avec l'équation 4.5 [White, 2008] . Les journées où les 5 clapets étaient ouverts à la même hauteur ne sont pas des données disponibles pour le projet. Puisque la valeur de H est variable au barrage, la hauteur Y est également variable. Le minimum et le maximum que peut prendre Y ne sont pas connus non plus. La valeur de  $C_d$  peut donc difficilement être déterminée. Elle est estimée à 0.61, ce qui correspond à un ratio H/Y de 0.54. Une discussion sur l'impact de cette décision ainsi que des résultats de modélisation sont présentés au sous-chapitre 5.3.

$$C_d = 0.564 + 0.0846 \frac{H}{Y} \quad (4.5)$$

Où :

Y                    Hauteur du seuil

---

### Débit maximal d'évacuation et niveau minimal pour le soutirage

Par la suite, une vérification sur le débit maximal est effectuée. Lors de la journée de contrôle, le module de gestion peut imposer au modèle de simulation de soutirer par exemple un débit moyen 40 m<sup>3</sup>/s pour atteindre le niveau cible. Cependant, un barrage à clapet possède une courbe de débit maximal pouvant être soutiré en fonction de l'élévation du plan d'eau en amont. Donc le débit de 40 m<sup>3</sup>/s ne peut pas être soutiré au barrage Foster pour n'importe quelle élévation du lac Brome. Cette vérification fait en sorte que les débits soutirés au barrage ne sont pas supérieurs à ce qui est physiquement possible compte tenu de la géométrie de l'exutoire du lac Brome et du barrage Foster. Le niveau du lac Brome peut quant à lui fluctuer librement. Donc si le niveau du lac Brome est à un niveau record dans le modèle, il sera possible d'observer un débit record au barrage Foster.

La courbe du débit maximal d'évacuation est reconstituée à partir des informations disponibles sur toute l'année aux stations 0300351 et 030350 du CEHQ [CEHQ, 2012] . Les débits sont exprimés en fonction des niveaux sur un graphique. Les débits maximums pour chaque niveau sont retenus. Finalement, une relation quadratique telle que présentée à l'équation 4.6 est utilisée pour produire les valeurs de débits maximums à chaque niveau. Si le débit sélectionné par les modules de gestion est supérieur au débit maximal, le soutirage est égal au débit maximal pour ce niveau.

$$Q = aH_{lb}^2 + bH_{lb} + c \quad (4.6)$$

Une limite sur le niveau minimal auquel un soutirage peut être effectué au barrage Foster est imposée. En effet, il est physiquement impossible de soutirer de l'eau au barrage Foster à un certain niveau. La valeur de niveau minimal imposée dans le modèle est tirée des observations.

---

Lorsque les vérifications sont terminées, le soutirage est effectué. Ce dernier servira à effectuer le bilan de masse au lac Brome et à calculer le débit résiduel à la CTE.

### Apports SB-12 et SB-20

Les apports au sous-bassin 12 (SB-12) et les apports intermédiaires au sous-bassin 20 (SB-20) proviennent du modèle hydrologique. Dans le modèle hydrologique, l'apport SB-12 inclut l'évaporation et l'infiltration au lac Brome. Ces deux processus n'ont donc pas à être représentés dans le modèle de simulation. Le modèle peut prendre en considération les apports du modèle hydrologique simulés avec le krigeage du CEHQ ou avec les données des modèles climatiques en période de référence et en période future.

### Calcul du stockage au lac Brome

Une fois la décision de soutirage au barrage Foster effectuée, le calcul du stockage est exécuté par bilan hydrique selon l'équation 4.7.

$$S_f = S_i + fQ_{in} + fQ_{out} \quad (4.7)$$

Où :

$S_f$	Stockage final du réservoir (Hm <sup>3</sup> )
$S_i$	Stockage initial du réservoir (Hm <sup>3</sup> )
$f$	Facteur de conversion
$Q_{in}$	Débit entrant du réservoir (Apport SB-12) (m <sup>3</sup> /s)
$Q_{out}$	Débit sortant du réservoir (Soutirage au barrage) (m <sup>3</sup> /s)

---



### Calcul de l'élévation au lac Brome

Lorsque le stockage est connu, il est possible de calculer le niveau du lac Brome avec une équation niveau-stockage. Cette relation est reconstituée à partir des informations trouvées dans le rapport de Besré [2010] .

### Ponction de la ville de Bromont

La ponction de la ville de Bromont est incluse dans le modèle afin de calculer le débit résiduel en rivière. La méthodologie pour effectuer la modélisation de la ponction est présentée au sous-chapitre 4.4.

### Débit résiduel dans la rivière

Le débit résiduel dans la rivière est calculé en effectuant le bilan hydrique sur le tronçon entre le barrage Foster et la CTE selon l'équation 4.8. Après le calcul du débit résiduel, ce dernier est comparé avec le débit réservé écologique pour évaluer la performance du système. Les débits réservés écologiques font l'objet du sous-chapitre 4.6.

$$Q_{res} = Q_{sout} + Q_{SB-20} - Q_{ponc} \quad (4.8)$$

Où :

$Q_{res}$	Débit résiduel à la CTE (m <sup>3</sup> /s)
$Q_{sout}$	Débit du soutirage au barrage (m <sup>3</sup> /s)
$Q_{SB-20}$	Débit provenant de l'apport naturel à l'exutoire du sous-bassin versant 20.
$Q_{ponc}$	Débit pompé à la CTE (m <sup>3</sup> /s)

---

## 4.4 La modélisation de la consommation en eau brute

### 4.4.1 Objectif

Il est nécessaire de modéliser le signal de la consommation en eau brute afin d'effectuer les calculs automatiquement dans le modèle de simulation. Le signal doit pouvoir représenter la consommation en eau brute actuelle et une augmentation graduelle de cette dernière.

### 4.4.2 Sélection du modèle et fonctionnement

Pour effectuer la modélisation du signal de la consommation en eau brute, 11 années de données journalières sont disponibles, soit les années 2001 à 2011. Les maximums journaliers pour les 11 années sont retenus pour créer un signal de référence. Cette hypothèse est effectuée pour conserver les événements critiques du signal des années de données disponibles. Le débit maximal journalier annuel du signal de référence est de 0.14 m<sup>3</sup>/s. À partir de ce point dans le texte, le signal de consommation en eau est toujours dénommé par son maximum journalier annuel.

Pour déterminer le débit ultime prélevable, des itérations sont effectuées avec le modèle de simulation. À chaque itération, le signal de référence est incrémenté de 0.025 m<sup>3</sup>/s tel que présenté à l'équation 4.9. Donc à chaque fois que le modèle de simulation est roulé, 9 itérations avec un signal de 0.15 m<sup>3</sup>/s à 0.35 m<sup>3</sup>/s sont effectuées. Les itérations sont démarrées à 0.15 m<sup>3</sup>/s pour représenter la consommation actuelle. Le débit autorisé par le certificat d'autorisation de la ville se situe au milieu de la plage de valeur. Finalement, la limite de 0.35 m<sup>3</sup>/s a été sélectionnée au cours du projet puisqu'elle est rarement atteignable en fonction des règles en vigueur et des contraintes à respecter sur le bassin versant. L'incrément de 0.025 m<sup>3</sup>/s a été sélectionné pour limiter le temps de calcul de chaque simulation.

---

$$Q_{ponc} = Q_{ref} + \Delta Q \quad (4.9)$$

Où :

$Q_{ponc}$  Débit pompé à la CTE ( $m^3/s$ )

$Q_{ref}$  Débit du signal de référence (Débit maximum journalier des années de référence) ( $m^3/s$ )

$\Delta Q$  Incrément du débit journalier maximal annuel ( $m^3/s$ )

La technique utilisée ne conserve pas la représentativité moyenne du signal. Cette hypothèse est jugée valable puisque aucun stockage d'eau n'est effectué à la CTE. La surestimation légère du débit pompé à la CTE a un impact sur le débit résiduel journalier, mais n'a aucun effet cumulatif à long terme.

La méthode utilisée n'effectue pas de corrélation directe entre la population de la ville de Bromont et le débit d'eau pompé. Ce choix est effectué puisqu'une augmentation du débit peut être engendrée autant par une augmentation de la population que par l'arrivée d'une nouvelle industrie dans la ville. Une fois le débit ultime prélevable déterminé, les gestionnaires de la ville sont en mesure d'orienter le développement municipal en fonction des indices de consommation des différents usages de l'eau tel que présenté aux chapitre 3 et 5 du livre de Brière [2006] .

---

## 4.5 La gestion du réservoir selon la convention

### 4.5.1 Objectif

Une section du modèle de simulation permet de prendre des décisions au barrage selon le mode de gestion actuel. Ce module joue le même rôle que l'opérateur du barrage. L'objectif est donc de reproduire le plus fidèlement possible les décisions prises par l'opérateur du barrage.

### 4.5.2 Le processus de décision

Le processus de décision utilisé par le modèle de simulation pour simuler les règles de gestion de la convention est présenté à la figure 4.4. Les deux informations disponibles pour effectuer la gestion sont le stockage du réservoir au temps (t-1) et le débit à la CTE au temps (t-1).

Dans un premier temps, le soutirage nécessaire pour atteindre le niveau cible est calculé selon l'équation 4.10. Selon cette équation, le débit peut être négatif, c'est pourquoi la prochaine étape du processus de décision impose un débit minimum. Le débit peut également être supérieur à la capacité de soutirage du barrage. Ceci est corrigé ultérieurement dans le modèle de simulation.

$$Q_{out} = (S_i - S_{cib})/\Delta t \quad (4.10)$$

Où :

$Q_{out}$	Débit à soutirer pour atteindre le niveau cible (m <sup>3</sup> /s)
$S_i$	Stockage initial au pas de temps (m <sup>3</sup> )
$S_{cib}$	Stockage cible (m <sup>3</sup> )
$\Delta t$	Intervalle de temps de gestion

---

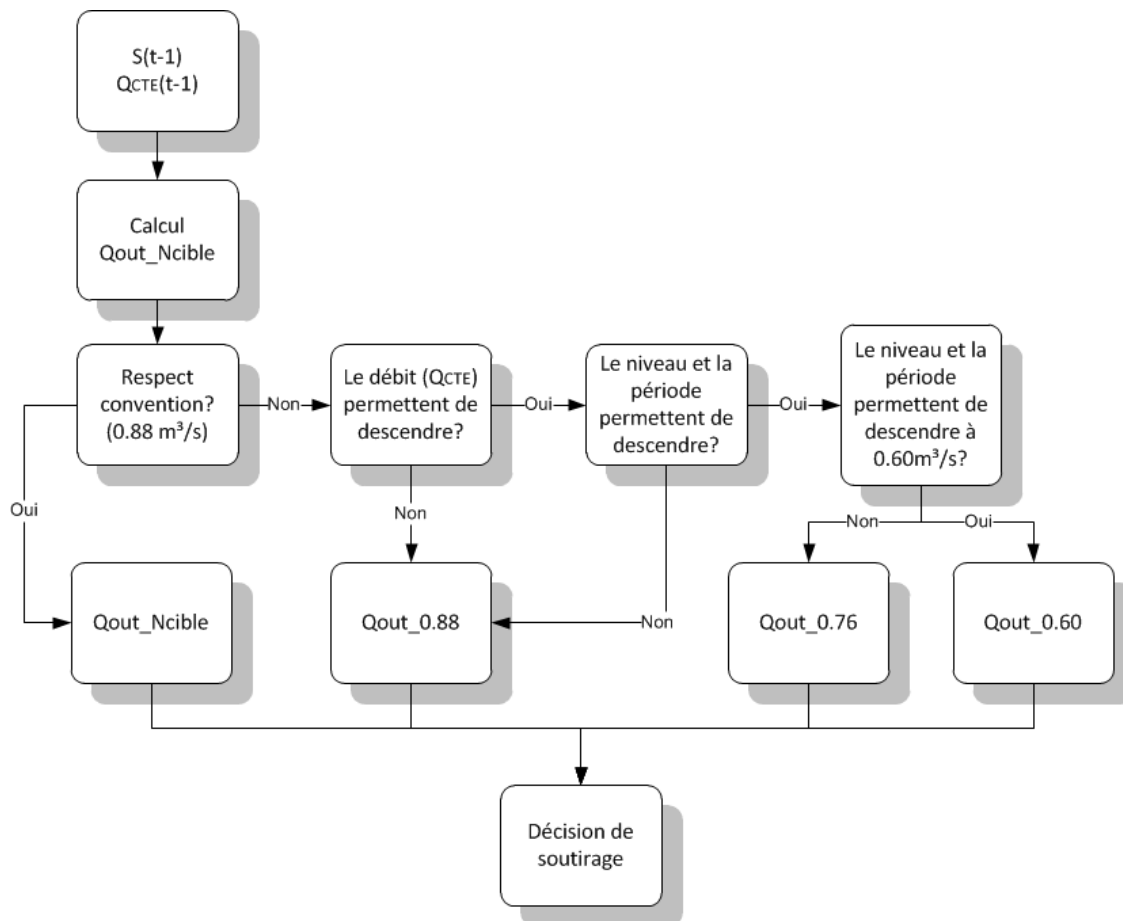


Figure 4.4 - Processus de décision selon le mode de gestion de la convention

Le niveau cible utilisé dans le projet est présenté à la figure 4.5. Il a été obtenu en lissant la courbe des niveaux moyens sur les années de données observées disponibles. Les zones grises sur le graphique représentent la période de non contrôle au barrage. Le niveau cible est imposé à 196.90 m dès le début de la période de contrôle afin de remplir le lac le plus tôt possible. En réalité, l'opérateur ne remplirait pas le réservoir à ce moment si le stock de neige était encore important pour protéger le lac contre les inondations.

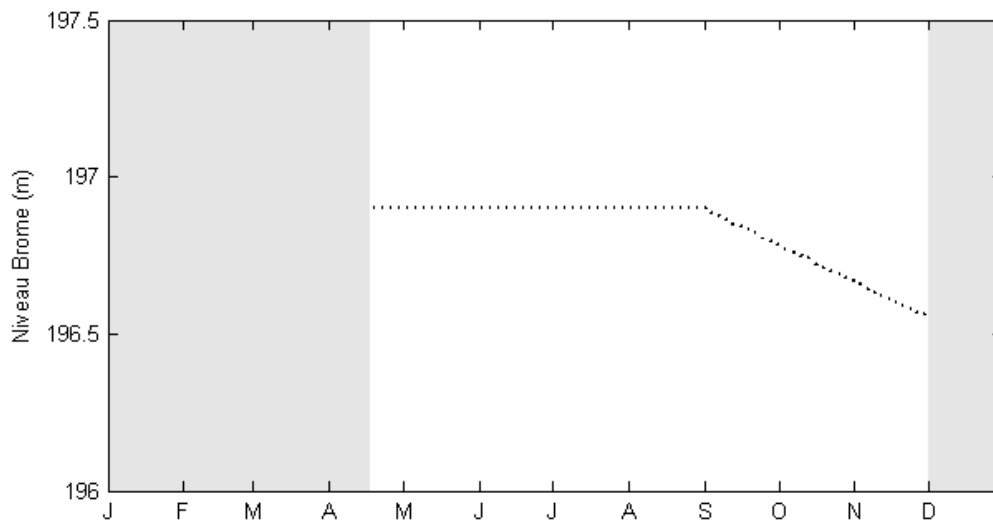


Figure 4.5 - Niveau cible au lac Brome en période de contrôle

Si le débit respecte le débit minimal de la convention, le processus de décision est terminé. Si le débit ne respecte pas le débit minimal de la convention, le modèle vérifie si les débits à la CTE permettent de soutirer moins que  $0.88 \text{ m}^3/\text{s}$ . Ceci est effectué avec la condition présentée à l'équation 4.11. Le débit journalier maximal annuel à la CTE est utilisé dans l'équation 4.11 en tout temps puisque l'opérateur au barrage ne peut pas prévoir lorsque cet événement survient. Si le débit le permet, une vérification à savoir si le niveau et la période de l'année permettent d'abaisser le débit en deçà de  $0.88 \text{ m}^3/\text{s}$  est effectuée. Cette vérification respecte les niveaux et les périodes présentés à la figure 2.7.

$$Q_{CTE(t-1)} \geq Q_{eco} + Q_{ponc\_max} \quad (4.11)$$

Où :

$Q_{CTE(t-1)}$	Débit dans la rivière au droit de CTE au temps (t-1) ( $m^3/s$ )
$Q_{eco}$	Débit réservé écologique dans la rivière au droit de la CTE ( $m^3/s$ )
$Q_{ponc\_max}$	Débit journalier maximal annuel à la CTE ( $m^3/s$ )

#### 4.5.3 La performance du module de gestion selon la convention

Pour évaluer la performance du module de gestion selon les règles de la convention, le module de simulation est lancé avec les options de contrôle du tableau 4.2. Les apports sont reconstitués par bilan hydrique, donc l'incertitude due au modèle hydrologique est exclue de l'analyse. Cependant, l'évaluation de la performance demeure entachée de l'incertitude des appareils de mesure.

**Tableau 4.2 - Options de contrôle et données pour évaluer la performance du module de gestions selon la convention**

Options	Valeurs utilisées
<b>Apports au modèle de simulation</b>	Obs. bilan hydrique
<b>Années de simulation</b>	2006-2012
<b>Intervalle de temps et type de gestion</b>	Convention - 3 jours
<b>Période de contrôle</b>	Jour julien 109 à 331

## 4.6 La détermination du débit prélevable actuellement

Dans un premier temps, les débits réservés écologiques en rivière sont déterminés. Cette étape permet de déterminer quel débit est nécessaire dans le lit de la rivière afin de ne pas avoir d'impact sur l'intégrité du milieu naturel. Une fois cette donnée connue, il est possible d'effectuer des itérations avec le modèle de simulation pour déterminer le débit pouvant être prélevé actuellement.

### 4.6.1 Les débits réservés écologiques

Selon la collecte de données effectuée et selon la ville de Bromont, les débits réservés écologiques n'ont jamais été déterminés sur le tronçon de rivière à l'étude. Une fois déterminés, ceux-ci doivent habituellement faire l'objet d'approbation par les différents ministères impliqués. Comme les débits réservés écologiques sont des données significatives pour le projet, quatre méthodes pour évaluer les débits réservés écologiques en rivière sont retenues. Il s'agit de la méthode écohydrologique ( $Q_{eco1}$ ), de la méthode du Vermont ( $Q_{eco2}$ ), de la méthode française ( $Q_{eco3}$ ) et celle du critère passable de la méthode du Montana ( $Q_{eco4}$ ). Le détail de ces quatre méthodes est présenté au sous-chapitre 3.1. Il est à noter que les débits de la méthode écohydrologique sont calculés avec la méthodologie décrite ci-dessous et non avec les équations paramétriques proposées.

Étant donné le manque de données observées sur le tronçon de rivière à l'étude, les débits réservés écologiques sont calculés à partir de séries de données reconstituées à partir de la méthode de transposition de bassins versants. L'équation 4.12 présente le calcul à effectuer. La station 030314 à Cowansville est utilisée pour effectuer la transposition. Dans son étude, Besré [2010] présente les hypothèses relatives à la transposition entre les deux bassins versants. La prise d'eau de la municipalité de Cowansville est située en amont de la station de mesure 030314. Le prélèvement en eau de la ville est représenté par une série de Fourier

---



(annexe B) et la série de données est ajoutée à la série de données observées avant d'effectuer la transposition. La valeur de 1 est utilisée pour l'exposant empirique « n » tel qu'effectué dans Besré [2010] .

$$Q_2 = (Q_1 + Q_{ponction}) * \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^n \quad (4.12)$$

Où :

$Q_2$	Débit reconstitué (m <sup>3</sup> /s)
$Q_1$	Débit de la station 030314 du CEHQ (m <sup>3</sup> /s)
$Q_{ponction}$	Débit pompé à la prise d'eau reconstitué par une série de Fourier (m <sup>3</sup> /s)
$A_2$	Aire du bassin où les débits sont reconstitués (km <sup>2</sup> )
$A_1$	Aire du bassin versant à Cowansville (km <sup>2</sup> )
n	Exposant empirique.

Les indices sont calculés pour les années 1983 à 2012. L'aire de sous-bassin versant considérée est de 188 km<sup>2</sup>, 213 km<sup>2</sup> et 348 km<sup>2</sup> pour le barrage Foster, la station 030314 et la CTE respectivement.

#### 4.6.2 Évaluation du débit prélevable actuel selon $Q_{eco1}$ à 4

Pour déterminer le débit prélevable actuellement, le modèle de simulation est lancé avec les options de contrôle du tableau 4.3. Les apports du modèle hydrologique  $Q_{actuel}$  correspondent aux apports obtenus en lançant le modèle hydrologique avec les données du krigeage de CEHQ, soit les observations.

Ensuite, la performance du système est évaluée selon les critères de fiabilité, de vulnérabilité et de résilience présentés au sous-chapitre 3.3 pour les saisons présentées au tableau 4.4.

Les indices de performance sont calculés sur différentes contraintes, soit les débits réservés écologiques et les niveaux minimal et maximal au lac Brome présenté au tableau 2.4.

**Tableau 4.3 - Options de contrôle et données pour évaluer le débit prélevable actuel**

Options	Valeurs utilisées
Apports du modèle hydrologique	Qactuel
Années de simulation	1971-2000
Débit prélevé à la CTE	9 séries de 0.15 m <sup>3</sup> /s à 0.35 m <sup>3</sup> /s
Débits réservés écologiques	Qeco1, Qeco2, Qeco3, Qeco4
Intervalle de temps et type de gestion	Convention - 3 jours
Période de contrôle	Jour julien 109 à 331

**Tableau 4.4 - Saisons pour l'analyse de la performance du système**

Saison	Période
Hiver	1er Décembre à mi-avril
Printemps	mi-avril à 31 mai
Été	1er juin à 31 septembre
Automne	1er octobre à 31 novembre

## 4.7 Impacts des changements climatiques sur le système hydrique

L'impact des changements climatiques sur le système est présenté en trois temps, soit les impacts climatiques, les impacts hydriques et les impacts sur la gestion. L'impact climatique des CC est évalué en comparant la période de référence et la période future des données provenant des sept projections climatiques. Les précipitations et les températures des deux périodes sont comparées. Pour quantifier l'impact hydrique des CC, le modèle hydrologique est lancé en mode naturel avec les sept projections climatiques pour les deux périodes. Les indices hydriques tel que le débit moyen et les indices d'étiage sont calculés et comparés pour quantifier l'impact des CC. L'impact sur la gestion est mesuré en lançant le modèle de simulation selon les informations du tableau 4.5 pour la période de référence et la période future. Les critères de fiabilité, de vulnérabilité et de résilience sont calculés et comparés entre les deux périodes pour quantifier l'impact. Les impacts sur la gestion sont évalués sur le niveau minimal au lac Brome et sur le débit minimal (débit réservé écologique) à la CTE. L'impact des changements climatiques est évalué uniquement pour deux débits réservés écologiques, soit la méthode écohydrologique ( $Q_{eco1}$ ) et la méthode française ( $Q_{eco3}$ ).

**Tableau 4.5 - Options de contrôle et données pour évaluer l'impact des CC sur la gestion du système**

Options	Valeurs utilisées
Apports du modèle hydrologique	Qref & Qfut
Années de simulation	1971-2000 & 2041-2070
Débit prélevé à la CTE	9 séries de 0.15 m <sup>3</sup> /s à 0.35 m <sup>3</sup> /s
Débits réservés écologiques	Qeco1 & Qeco3
Intervalle de temps et type de gestion	Convention - 3 jours
Période de contrôle	Jour julien 109 à 331

## 4.8 Mesures proposées d'adaptation aux changements climatiques

Une fois l'impact des changements climatiques quantifié, des mesures d'adaptation sont proposées. Les mesures d'adaptation visent à réduire la vulnérabilité de la prise d'eau aux changements climatiques sans augmenter la vulnérabilité au lac Brome face au niveau minimal. Pour chaque mesure d'adaptation, les options de contrôle du modèle de simulation sont présentées du tableau 4.6 au tableau 4.11.

La première méthode d'adaptation consiste à devancer la période de contrôle de deux semaines. En effet, comme la crue survient plus tôt, il est supposé que la glace au barrage fondra plus rapidement et que le contrôle au barrage pourra être devancé. Cette méthode d'adaptation vise la vulnérabilité au lac Brome, elle a pour but de remplir le réservoir le plus tôt possible pour se prémunir contre les périodes des faibles apports naturels.

**Tableau 4.6 - Mesure d'adaptation 1 : Devancement de la période de contrôle**

<b>Options</b>	<b>Valeurs utilisées</b>
<b>Apports du modèle hydrologique</b>	Qref & Qfut
<b>Années de simulation</b>	1971-2000 & 2041-2070
<b>Débit prélevé à la CTE</b>	9 séries de 0.15 m <sup>3</sup> /s à 0.35 m <sup>3</sup> /s
<b>Débites réservés écologiques</b>	Qeco1 & Qeco3
<b>Intervalle de temps et type de gestion</b>	Convention - 3 jours
<b>Période de contrôle</b>	<b>Jour julien 95 à 331</b>
<b>Niveau cible au lac Brome</b>	196.90 m

La deuxième méthode d'adaptation consiste à effectuer la gestion avec un intervalle de temps d'une journée. Cette méthode d'adaptation a pour but d'assurer en tout temps le débit minimal de 0.88 m<sup>3</sup>/s pour diminuer la vulnérabilité à la prise d'eau. Tel qu'il sera discuté ultérieurement, lorsque la gestion est effectuée aux trois jours et en période de faibles apports naturels, le débit peut tomber en deçà de 0.88 m<sup>3</sup>/s à cause du niveau du lac.

**Tableau 4.7 - Mesure d'adaptation 2 : Diminution de l'intervalle de temps de gestion**

<b>Options</b>	<b>Valeurs utilisées</b>
<b>Apports du modèle hydrologique</b>	Qref & Qfut
<b>Années de simulation</b>	1971-2000 & 2041-2070
<b>Débit prélevé à la CTE</b>	9 séries de 0.15 m <sup>3</sup> /s à 0.35 m <sup>3</sup> /s
<b>Débites réservés écologiques</b>	Qeco1 & Qeco3
<b>Intervalle de temps et type de gestion</b>	<b>Convention - 1 jour</b>
<b>Période de contrôle</b>	Jour julien 109 à 331
<b>Niveau cible au lac Brome</b>	196.90 m

La troisième mesure d'adaptation combine les deux premières : elle devance la période de contrôle et effectue la gestion au barrage chaque jour.

La quatrième méthode d'adaptation consiste à augmenter le niveau cible du lac en période estivale. Quatre itérations sont effectuées en augmentant le niveau cible de 5 cm à chacune d'elles. Cette méthode d'adaptation inclut la gestion au jour le jour et le devancement de la période de contrôle. Cette méthode d'adaptation a pour but de réduire la vulnérabilité au lac Brome. Si la réduction est marquée, cette méthode d'adaptation devrait permettre d'augmenter le débit minimum au barrage Foster sans avoir d'impact au lac Brome. Il est à

noter qu'à partir de ce point, les méthodes d'adaptions incluent systématiquement les précédentes.

**Tableau 4.8 - Mesure d'adaptation 3 : Devancement de la période de contrôle et diminution de l'intervalle de temps de gestion**

Options	Valeurs utilisées
Apports du modèle hydrologique	Qref & Qfut
Années de simulation	1971-2000 & 2041-2070
Débit prélevé à la CTE	9 séries de 0.15 m <sup>3</sup> /s à 0.35 m <sup>3</sup> /s
Débits réservés écologiques	Qeco1 & Qeco3
Intervalle de temps et type de gestion	Convention - 1 jour
Période de contrôle	Jour julien 95 à 331
Niveau cible au lac Brome	196.90 m

**Tableau 4.9 - Mesure d'adaptation 4 : Augmentation du niveau cible en période estivale**

Options	Valeurs utilisées
Apports du modèle hydrologique	Qref & Qfut
Années de simulation	1971-2000 & 2041-2070
Débit prélevé à la CTE	9 séries de 0.15 m <sup>3</sup> /s à 0.35 m <sup>3</sup> /s
Débits réservés écologiques	Qeco1 & Qeco3
Intervalle de temps et type de gestion	Convention - 1 jour
Période de contrôle	Jour julien 95 à 331
Niveau cible au lac Brome	196.95m, 197.00m, 197.05m, 197.10 m

La cinquième méthode augmente le débit minimum de la convention pour augmenter la fiabilité de la prise d'eau à la CTE. Ainsi, le débit minimum de 0.88 m<sup>3</sup>/s est augmenté lors de 3 itérations, d'abord à 0.95 m<sup>3</sup>/s, puis à 1.00 m<sup>3</sup>/s et à 1.05 m<sup>3</sup>/s. Il est à noter que toutes les conditions de la convention demeurent les mêmes sauf pour le débit minimum de 0.88 m<sup>3</sup>/s. Pour cette méthode d'adaptation, le niveau cible en période estivale est établi à 197.00 cm puisque ce niveau fournit une diminution suffisante de la vulnérabilité face au niveau minimum.

**Tableau 4.10 - Mesure d'adaptation 5 : Augmentation débit minimum**

<b>Options</b>	<b>Valeurs utilisées</b>
<b>Apports du modèle hydrologique</b>	Qref & Qfut
<b>Années de simulation</b>	1971-2000 & 2041-2070
<b>Débit prélevé à la CTE</b>	9 séries de 0.15 m <sup>3</sup> /s à 0.35 m <sup>3</sup> /s
<b>Débts réservés écologiques</b>	Qeco1 & Qeco3
<b>Intervalle de temps et type de gestion</b>	Convention - 1 jour – Qmin=0.95m <sup>3</sup> /s, 1.00 m <sup>3</sup> /s et 1.05 m <sup>3</sup> /s
<b>Période de contrôle</b>	Jour julien 95 à 331
<b>Niveau cible au lac Brome</b>	197.00 m

Finalement, la dernière méthode d'adaptation testée est d'utiliser un système de gestion plus souple au barrage Foster combiné à un système de prévision. Cette méthode d'adaptation utilise des règles de gestion différentes de celles de la convention. Le processus de décision de la figure 4.4 est remplacé par le processus de décision de la figure 4.6.

Dans un premier temps, l'hypothèse que les apports naturels entre le barrage Foster et la CTE sont connus est émise. Si cette méthode d'adaptation est implantée, elle implique donc

qu'un système de prévision des étiages soit utilisé. Il est à noter que la prévision utilisée pour l'essai est dite « parfaite ». Ceci veut dire que les débits prévus sont toujours les débits qui arriveront dans le futur. En réalité, une prévision n'est jamais parfaite, le modèle hydrologique, les intrants et les variables d'état font en sorte qu'il y aura toujours une erreur sur la prévision. Les résultats de cette méthode d'adaptation seront donc optimistes. Si cette méthode d'adaptation fonctionne, il sera nécessaire de la tester avec un module de prévision.

Dans le processus de décision, l'équation 4.10 demeure la même. Ensuite, une vérification à savoir si l'apport naturel actuel et des deux prochains jours entre le barrage Foster et la CTE est en mesure de subvenir aux besoins en eau de la CTE est effectuée selon l'équation 4.13. La vérification est effectuée sur les deux prochains jours afin de fournir un facteur de sécurité. Si l'apport naturel n'est pas assez élevé, un soutien à l'étiage est effectué au lac Brome selon l'équation 4.14. Ainsi, le barrage Foster fournira le débit nécessaire lorsque Bromont est dans le besoin.

**Tableau 4.11 - Mesure d'adaptation 6 : Contrôle au barrage sur toute l'année**

<b>Options</b>	<b>Valeurs utilisées</b>
<b>Apports du modèle hydrologique</b>	Qref & Qfut
<b>Années de simulation</b>	1971-2000 & 2041-2070
<b>Débit prélevé à la CTE</b>	9 séries de 0.15 m <sup>3</sup> /s à 0.35 m <sup>3</sup> /s
<b>Débits réservés écologiques</b>	Qeco1 & Qeco3
<b>Intervalle de temps et type de gestion</b>	<b>Gestion modifiée</b>
<b>Période de contrôle</b>	<b>Jour julien 95 à 331</b>
<b>Niveau cible au lac Brome</b>	<b>196.90m</b>



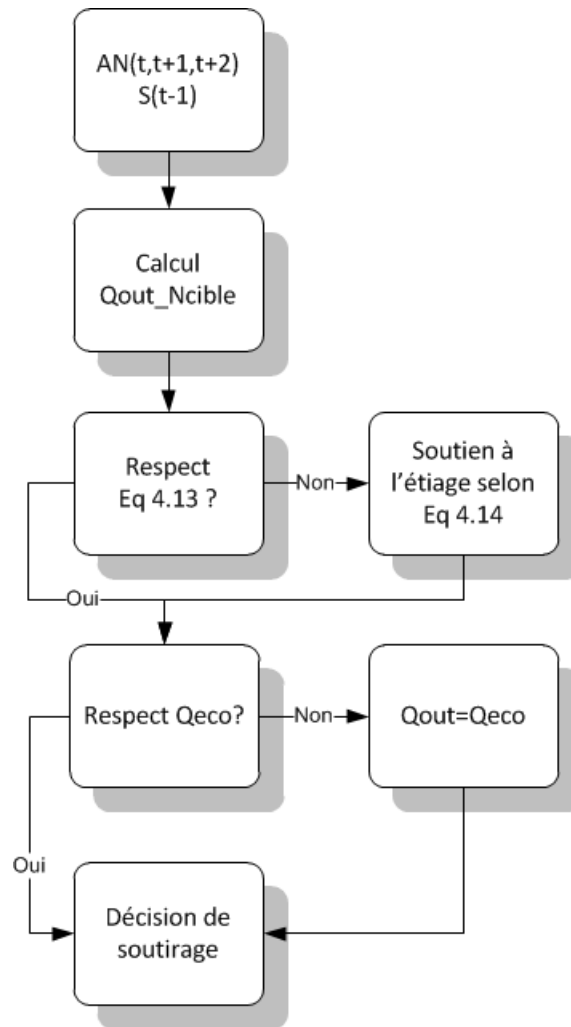


Figure 4.6 - Processus de décision de la gestion modifiée

$$AN_{CTE(t,t+1,t+2)} \geq Q_{eco} + Q_{ponc\_max} \quad (4.13)$$

$$Q_{out} = Q_{eco} + Q_{ponc\_max} - \min(AN_{CTE(t)}, AN_{CTE(t+1)}, AN_{CTE(t+2)}) \quad (4.14)$$

Une fois cette opération terminée, une vérification à savoir si le débit réservé écologique au barrage Foster est respecté est effectuée. Le débit minimum au barrage Foster est donc le débit réservé écologique de chaque méthode utilisée. Il est à noter que la période de contrôle est devancée et que la gestion est effectuée au jour le jour. Aussi, le niveau cible du lac demeure à 196.90 m. Le détail de cette méthode d'adaptation est présenté au tableau 4.11.

---

## CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET DISCUSSION

Cette section du travail présente les résultats du projet en suivant la même structure que celle du chapitre 4. Ainsi, les résultats ayant trait à la modélisation sont présentés aux sous-chapitres 5.1 à 5.5. Les résultats pour parvenir aux objectifs de recherche sont présentés aux sous-chapitres 5.6 à 5.8.

### 5.1 La modélisation climatique

Les données de la modélisation climatique proviennent de l'organisme Ouranos. Elles sont corrigées avec les techniques de débiaisage présentées au sous-chapitre 4.1. Les figures présentant le résultat de la correction de biais sont présentées à l'annexe C.

Sur toutes les figures, il est possible d'observer que la variabilité des données des sept projections climatiques est moins grande pour la température que pour les précipitations. Cela est dû à la méthode de correction du biais utilisée. La méthode de débiaisage des températures considère uniquement la moyenne mensuelle. La méthode de débiaisage de LOCI [Schmidli *et al.*, 2006] combine quant à elle une correction de biais pour le taux moyen mensuel de journées avec précipitation et la moyenne mensuelle d'intensité des journées de précipitations. Lorsque les distributions des précipitations des données observées et des données de la période de référence sont très différentes, la méthode de LOCI performe moins bien pour ajuster la moyenne mensuelle des précipitations.

Pour toutes les stations, la donnée de température observée se situe à l'intérieur de l'étendue des projections climatiques. Il en est de même pour les données de précipitation sauf pour les mois d'avril et de mai où les données débiaisées sous-estiment les précipitations d'environ 5 mm par mois. Une discussion à ce sujet est présentée à la section 5.2.2.

## 5.2 La modélisation hydrologique

Les résultats de modélisation hydrologique sont présentés en deux parties. La performance du modèle en période de calage et en période de validation est tout d'abord discutée. La deuxième section expose une brève analyse de robustesse du modèle lorsque les stations météorologiques sont modifiées. Elle présente ensuite les hydrogrammes obtenus avec les données météorologiques observées et les données météorologiques simulées en période de référence.

### 5.2.1 Le calage du modèle hydrologique

Les indices obtenus lors du calage et de la validation du modèle hydrologique à Farnham sont présentés au tableau 5.1. Tel que présenté à la section 4.2.4, la période de calage s'étend de 1998 à 2012 et la période de validation s'étend de 1986 à 1996. Moriasi et al. [2007] stipulent qu'un modèle est valide si le Nash est supérieur à 0.5 et que le critère de biais est inférieur à 25 %. En période de calage ainsi qu'en période de validation, le modèle respecte ces critères. Il est à noter que le critère de biais n'est pas inclus dans la fonction de calage. Cependant, il a été calculé dans le but de valider les volumes totaux en eau. Le modèle performe aussi bien en période de validation qu'en période de calage. Le critère de biais négatif signifie que le modèle sous-estime légèrement les volumes d'eau. En période de validation, une surestimation de 0.41 % se produit.

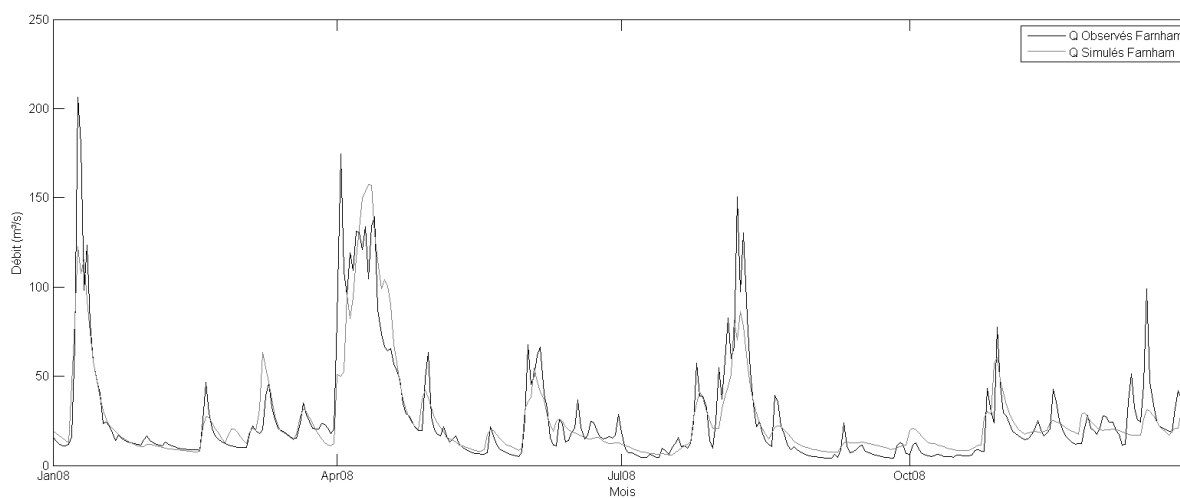
La figure 5.1 présente une année typique de simulation du modèle hydrologique à Farnham. Il est possible d'observer sur cette figure que les pointes des crues dues aux redoux hivernaux et les pointes des crues automnales peuvent être de la même envergure ou sinon plus importantes que la crue printanière. Le modèle hydrologique synchronise bien les évènements avec les observations. La fonte est bien représentée, mais le redoux hivernal et

---

la crue automnale sont sous-estimés. Les processus de récession du débit après la crue, les étiages estivaux et les étiages hivernaux sont aussi bien représentés.

**Tableau 5.1 - Critères de Nash, de Nash sur les logarithmes et de biais du modèle hydrologique à Farnham pour la période de calage (1998-2012) et de validation (1986-1996)**

Critère	Calage	Validation
Nash	0.67	0.68
Nash sur les log	0.80	0.77
Biais (%)	-6.00	0.41



**Figure 5.1 - Comparaison entre les débits journaliers observés et simulés pour l'année 2008 à Farnham**

Le tableau 5.2 présente les résultats de la validation supplémentaire effectuée sur les apports reconstitués par bilan hydrique au lac Brome (équation 3.17). Le critère de Nash obtenu est satisfaisant et le critère de biais est bon.

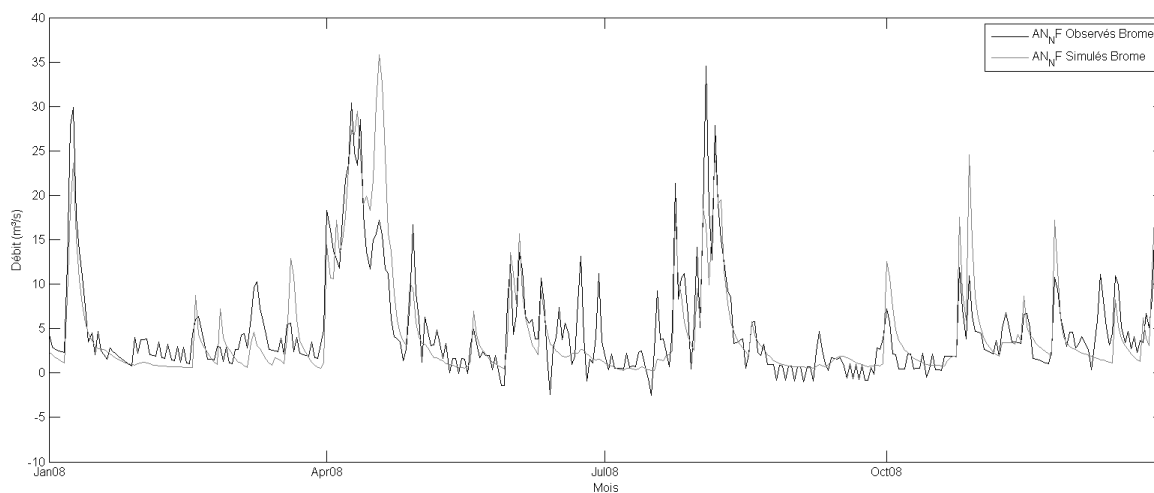
**Tableau 5.2 - Validation supplémentaire du critère de Nash et de biais du modèle hydrologique au lac Brome pour la période 2005 à 2012**

Critère	Calage
Nash	0.67
Biais (%)	-1.10

La figure 5.2 présente les résultats de la validation supplémentaire au lac Brome. Les apports naturels reconstitués par bilan hydrique sont bruités. Ce phénomène est discuté au sous-chapitre 3.4. La validation des données hydrométriques n'est pas effectuée puisque cette étape consiste en une validation supplémentaire afin de vérifier les tendances. La figure 5.2 permet d'apprécier la performance du modèle hydrologique. Le redoux hivernal et la crue automnale sont encore sous-estimés, tel qu'il a été observé à la figure 5.1. La fonte est bien représentée jusqu'au dernier moment où la pointe est surestimée par le modèle. Les tendances de faibles débits sont très bien représentées tout au long de l'année. Des figures supplémentaires sont présentées à l'annexe G.

Le calage du modèle hydrologique est jugé satisfaisant pour les besoins de l'étude. Deux critères sont particulièrement importants dans le projet, soit la conservation des volumes et la représentativité des périodes d'étiage. Une bonne conservation des volumes est nécessaire lorsque le modèle hydrologique est utilisé pour effectuer de la gestion hydrique. La bonne représentativité des périodes d'étiage est nécessaire lors des périodes critiques à la

prise d'eau. Les résultats précédents démontrent de façon satisfaisante le respect des deux critères.



**Figure 5.2 - Comparaison entre les débits journaliers d'apports naturels reconstitués et les débits journaliers simulés de l'année 2008 au lac Brome**

### 5.2.2 La mise en œuvre en changements climatiques

Tel qu'il a été mentionné au chapitre 4, la mise en œuvre du modèle hydrologique en changements climatiques nécessite de rouler le modèle en mode « naturel » plutôt qu'en mode « contrôlé ». Le barrage est donc considéré comme un seuil naturel. Pour le modèle de simulation, ceci n'a aucun impact puisque les apports naturels peuvent être lus en évitant la gestion au barrage tel qu'expliqué à la fin de la section 4.2.5.

---

Ensuite, le remplacement des stations météorologiques d'Environnement Canada qui ont servi pour le calage du modèle hydrologique par celles du krigeage du CEHQ doit être effectué pour la mise en œuvre en changements climatiques. Une vérification de la robustesse du modèle par rapport à une modification de l'emplacement des stations météorologiques est effectuée. Ainsi, la performance du modèle est évaluée en mode naturel pour les débits simulés avec les données d'Environnement Canada (EC) et pour les débits simulés du krigeage du CEHQ. Les résultats à Farnham sont présentés au tableau 5.3 et les résultats au lac Brome sont présentés au tableau 5.4. Le critère de Nash demeure élevé lorsque le remplacement des stations météorologiques est effectué.

**Tableau 5.3 - Critères de Nash du modèle hydrologique à Farnham calculés entre les débits observés et les débits simulés avec les données d'Environnement Canada et entre les débits observés et les débits simulés avec les données du CEHQ**

Comparaison	Nash
Qobservé vs Qsim EC	0.65
Qobservé vs Qsim CEHQ	0.62

**Tableau 5.4 - Critères de Nash du modèle hydrologique à au lac Brome calculés entre les débits observés et les débits simulés avec les données d'environnement canada et entre les débits observés et les débits simulés avec les données du CEHQ**

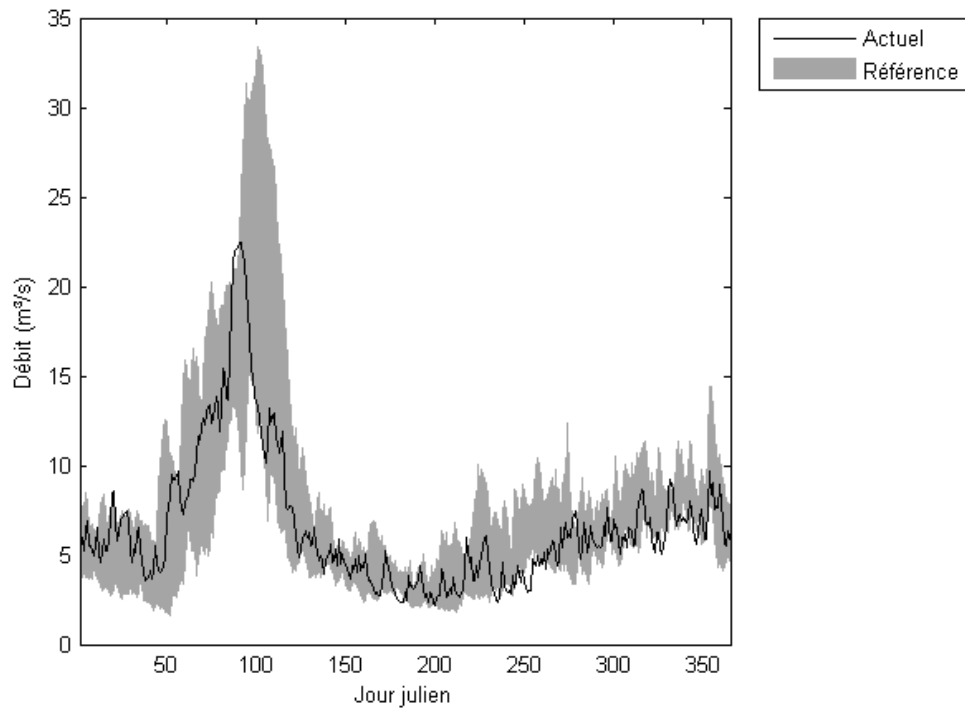
Comparaison	Nash
Qobservé vs Qsim EC	0.68
Qobservé vs Qsim CEHQ	0.63



La figure 5.3 présente les débits journaliers obtenus avec les données météorologiques observées (krigeage du CEHQ ( $Q_{\text{actuel}}$ )) et les débits journaliers obtenus avec les données météorologiques simulées en période de référence (sept projections climatiques ( $Q_{\text{ref}}$ )). Ceci est effectué pour vérifier que le modèle hydrologique fournit des résultats représentatifs avec les données météorologiques des projections climatiques couvrant la période de référence. Le débit  $Q_{\text{ref}}$  représente bien le débit  $Q_{\text{actuel}}$ , la distribution des débits  $Q_{\text{ref}}$  est généralement centrée sur le débit  $Q_{\text{actuel}}$ . À quelques endroits, la distribution des débits  $Q_{\text{ref}}$  sous-estime ou surestime le débit  $Q_{\text{actuel}}$ . Cependant, ce phénomène se produit sur de courts laps de temps. La crue de la période de référence est retardée et est de plus grande amplitude par rapport à la période actuelle à cause des scénarios 4 et 7. La distribution des températures hivernales de ces scénarios explique ce phénomène. Des explications détaillées sont présentées à l'annexe M. Le reste des scénarios représentent très bien la crue. Des figures sont présentées à l'annexe M pour le démontrer.

Les données de la période de référence sous-estiment les précipitations de 5 mm par mois pour avril et mai tel qu'il a été mentionné au sous-chapitre 5.1. Bien que ce volume d'eau ne soit pas très important, la sous-estimation engendre un remplissage légèrement plus lent au lac Brome ce qui implique que les débits minimums doivent être conservés un peu plus longtemps. Dès que le niveau du lac a atteint son niveau cible, la sous-estimation n'a plus d'impact. L'impact de la sous-estimation des volumes d'eau est également minimisé puisque l'analyse en changements climatiques compare la période de référence et la période future. Pour la prise d'eau, cette sous-estimation n'a pas d'impact puisque les débits à ce moment de l'année sont plus que suffisants pour répondre aux besoins de la ville.

---



**Figure 5.3 - Comparaison des débits journaliers moyens des 7 projections climatiques de la période de référence (ensemble gris) et des débits journaliers moyens de la période actuelle à Bromont sur les années 1971-2000**

## 5.3 Le modèle de simulation

Ce sous-chapitre présente majoritairement les résultats de calage des équations utilisées dans le modèle de simulation. Les résultats sont présentés en quatre sections, soit l'équation de seuil en période de non contrôle, les décisions selon la hauteur des clapets, la vérification des débits maximal et minimal et le calcul de l'élévation au lac Brome.

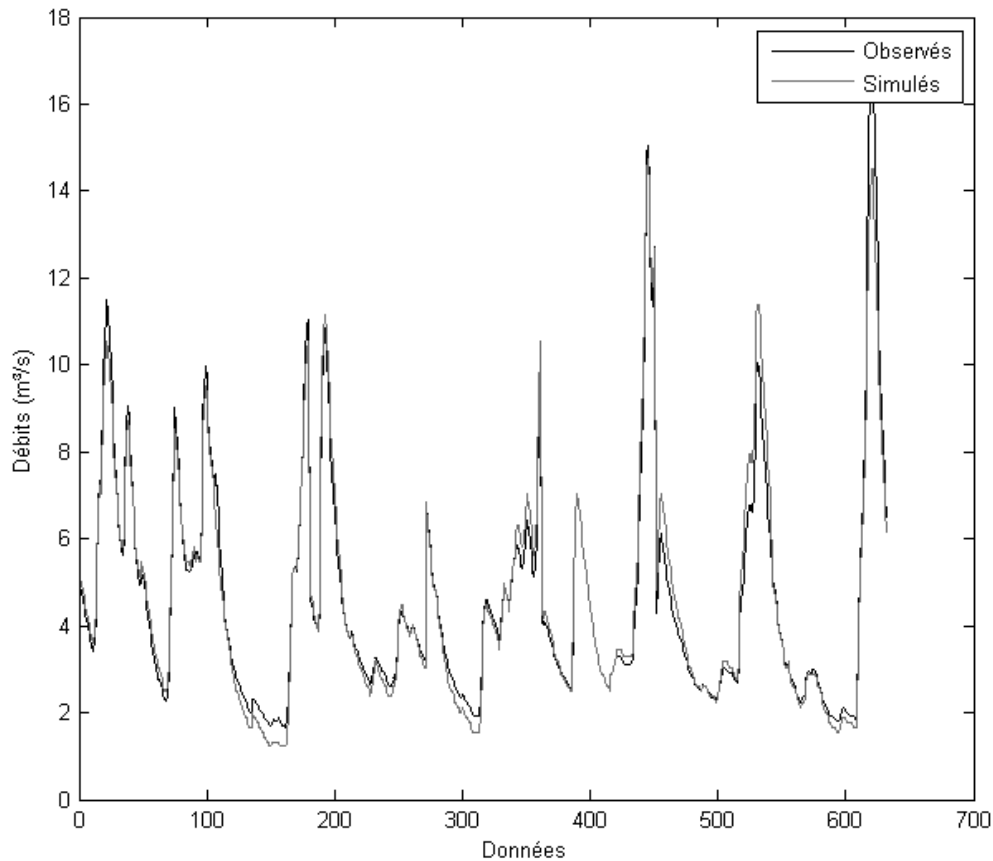
### 5.3.1 L'équation de seuil en période de non contrôle

Les coefficients  $\alpha$  et  $H_{\text{seuil}}$  des équations 4.2 et 4.4 sont calibrés pour que l'équation 4.2 représente les débits au barrage Foster en période de non contrôle. Un Nash de 0.97 est obtenu avec les valeurs présentées au tableau 5.5.

La figure 5.4 présente les débits observés et les débits simulés en période de non contrôle. Il est à noter que la série de données est en fait une juxtaposition des périodes de non-contrôle des années 2005 à 2012. Il est possible d'observer que l'adéquation entre les deux courbes est excellente. L'étendue des valeurs de calage est d'environ 1 m<sup>3</sup>/s à 18 m<sup>3</sup>/s pour des niveaux variant de 196.1 m à 196.9 m.

**Tableau 5.5 - Valeur retenues des paramètres pour l'équation de seuil (équation 4.2)**

Paramètre	Valeur retenue
$\alpha$	1.21
$H_{\text{seuil}}$ (m)	195.92



**Figure 5.4 - Comparaison des débits journalier simulés et observés pour l'équation de seuil au barrage Foster pour la juxtaposition des périodes hivernales entre les années 2005 à 2012**

### 5.3.2 Décision selon la hauteur des clapets

Tel qu'il a été discuté à la section 4.3.3, la valeur du coefficient  $C_d$  est estimée à 0.61 puisque des données nécessaires à sa détermination selon l'équation 4.5 sont manquantes pour le projet. La figure 5.5 présente un résultat de simulation. Le 24 juillet 2012, l'opérateur effectue un contrôle au barrage. Les débits diminuent lors des jours subséquents à cause de l'abaissement du niveau du lac Brome. L'équation est testée du 25 juillet au 29 juillet en imposant les niveaux observés dans l'équation. Les débits simulés suivent la bonne

---

tendance : ils s'abaissent lorsque le niveau diminue. Les débits simulés sous-estiment légèrement les débits observés au barrage. Aussi, il est possible de remarquer que les débits observés suivent une pente constante : l'opérateur n'a pas effectué de manœuvre pendant les jours présentés sur la figure. À ce stade, il est nécessaire de rappeler que l'hypothèse que tous les clapets sont abaissés au même niveau est effectuée. Pour le cas présenté à la figure 5.5, seulement 1 clapet est habituellement ouvert. Comme le nombre de clapets ouverts est à la discrétion de l'opérateur, le phénomène est difficilement modélisable. Pour la suite du projet, cette décision de modélisation a un impact pour les résultats du sous-chapitre 5.6. En effet, les décisions au barrage sont prises aux 3 jours. Pour le cas présenté à la figure 5.5, la simulation sous-estime le débit de  $0.07 \text{ m}^3/\text{s}$  au troisième jour. Cette valeur est du même ordre de grandeur que les débits de la prise d'eau de Bromont. Pour mieux caractériser la relation hauteur et débit au barrage ainsi que le type de décision prise par l'opérateur au barrage, il serait nécessaire de collaborer avec la ville de Lac-Brome. Ultimement, les décisions seront prises au jour le jour et cette relation ne sera plus nécessaire dans la prise de décision au barrage.

### 5.3.3 Vérification des débits maximal et minimal

Les coefficients retenus pour l'équation quadratique 4.6 sont présentés au tableau 5.6 et les résultats sont présentés à la figure 5.6. La hauteur minimale retenue pour effectuer un soutirage est de 196.00 m ( $2.85 \text{ Hm}^3$ ) puisque le niveau minimal observé sur la série de données de la station 030351 est de 196.11 m.

### 5.3.4 Calcul de l'élévation au lac Brome

Les paramètres retenus pour l'équation quadratique élévation-stockage sont présentés au tableau 5.7. Plus de détails sont présentés à l'annexe D.

---

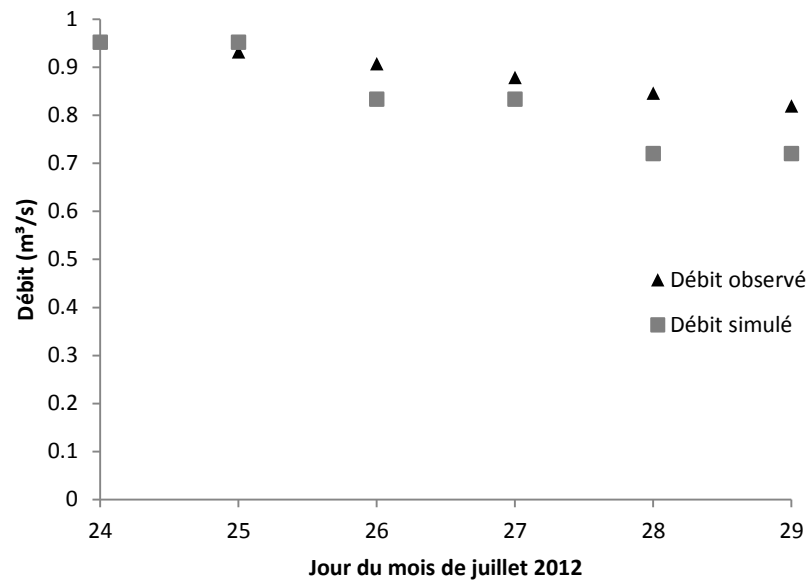


Figure 5.5 - Comparaison des débits journaliers observés et simulés avec décision selon la hauteur des clapets (équation 4.5) au barrage Foster du 24 au 29 juillet 2012

Tableau 5.6 - Valeur des paramètres pour l'équation de débit d'évacuation maximal (équation 4.6)

Paramètre	Valeur retenue
a	17.53
b	6869.90
c	67 2954.30

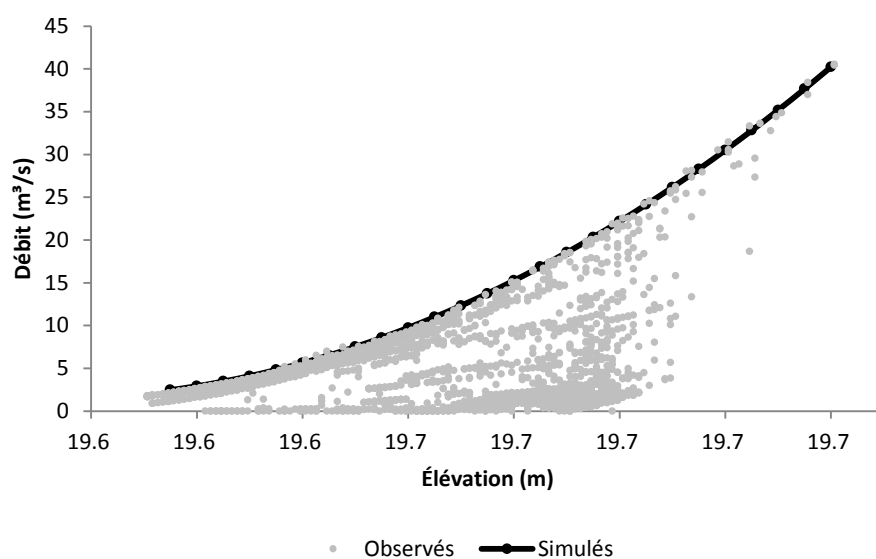


Figure 5.6 - Comparaison des débits journaliers observés et simulés pour l'équation de débit maximal au barrage Foster pour les années 2005 à 2012

Tableau 5.7 - Valeur des paramètres pour l'équation de niveau-stockage (équation 4.7)

Paramètre	Valeur retenue
a	0.68
b	251.58
c	23243.60

## 5.4 La modélisation de la consommation en eau brute

La modélisation de la consommation en eau brute est effectuée en suivant la méthodologie du sous-chapitre 4.4. La figure 5.7 présente les résultats de cinq des neuf ponctions modélisées. Il est à noter que chaque série de débit est dénommée par son maximum journalier annuel. Le signal conserve les pointes de consommation en eau brute observées de la figure 2.9; l'objectif de modélisation est atteint.

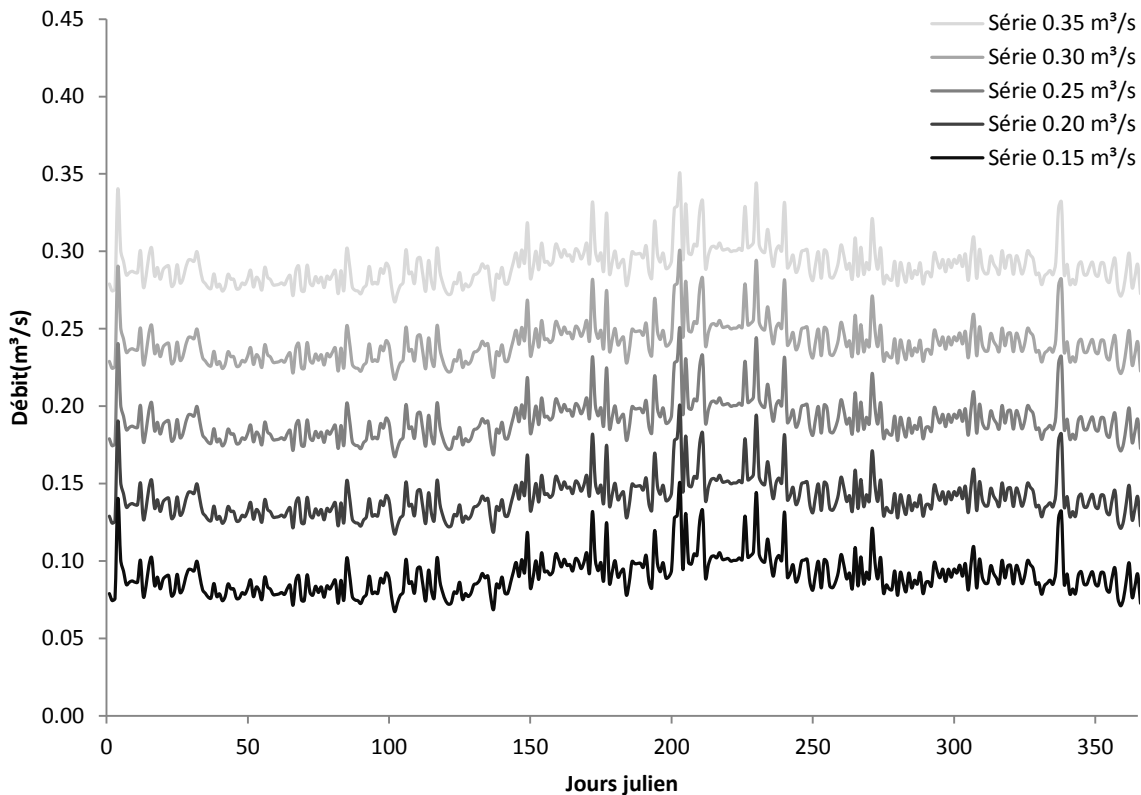


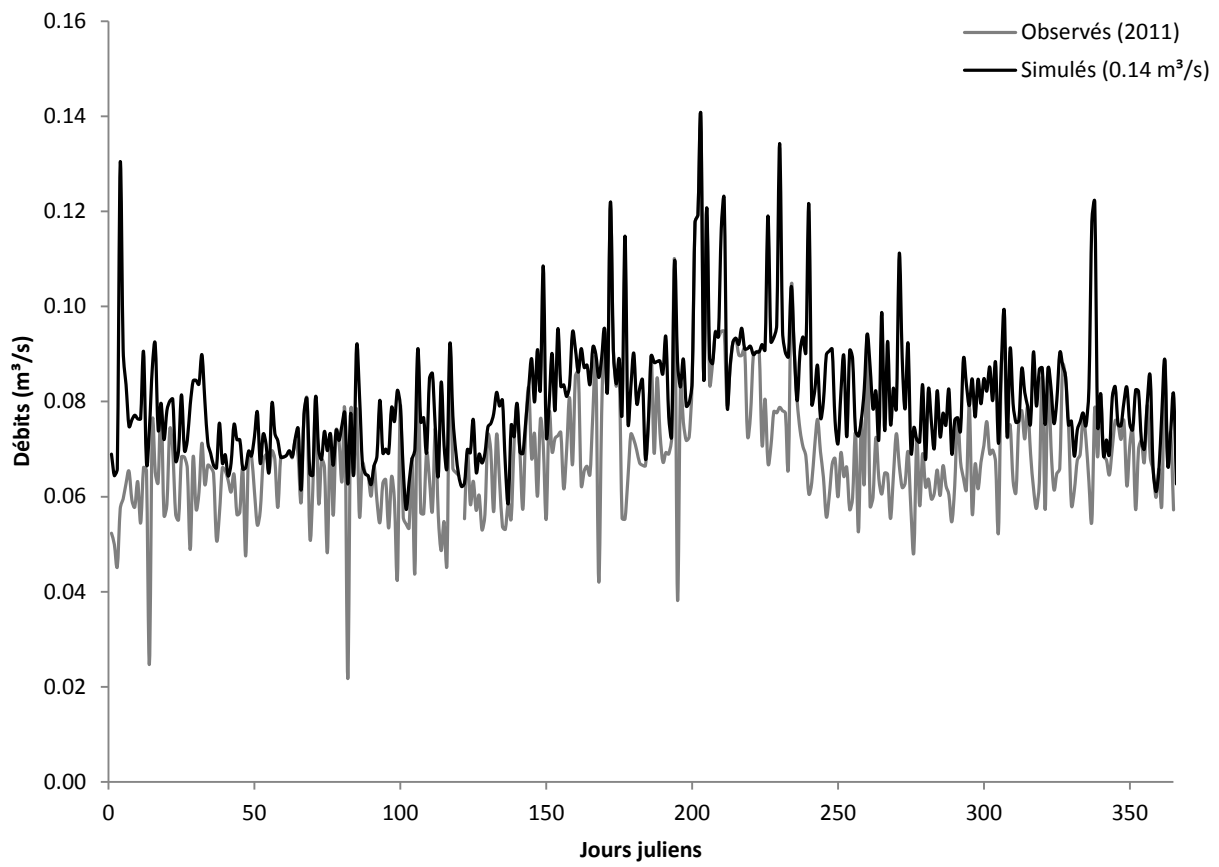
Figure 5.7 - Consommation en eau brute journalière typique modélisée pour les séries 0.15, 0.20, 0.25, 0.30 et 0.35 m<sup>3</sup>/s



Cette technique utilise la même séquence annuellement, donc le maximum annuel survient toujours au mois de juillet, ce qui n'est pas le cas en réalité. Le maximum annuel de consommation pourrait aussi bien survenir en août. Il y a donc un risque que le modèle de simulation ne prenne pas en considération la pire situation dans l'année dû à sa nature déterministe. La technique de modélisation est cependant considérée très conservatrice, puisqu'elle utilise le pire événement journalier des années 2001 à 2011. Le risque de ne pas considérer le pire événement est ainsi diminué.

La figure 5.8 présente une comparaison entre le signal observé de 2011 et le signal de référence à  $0.14 \text{ m}^3/\text{s}$ . Sur la figure, il peut être observé que les données du signal simulées sont systématiquement supérieures aux données observées. Tel qu'il a été mentionné au sous-chapitre 4.4, le signal simulé de  $0.14 \text{ m}^3/\text{s}$  utilise la pire pointe journalière des années 2001 à 2011. Une analyse de sensibilité effectuant la comparaison entre les deux signaux pour valider les hypothèses émises est présentée ultérieurement.

---



**Figure 5.8 - Comparaison entre la consommation en eau brute observée pour l'année 2011  
et la consommation typique modélisée pour le signal à 0.14  $\text{m}^3/\text{s}$**

## 5.5 La gestion du réservoir selon la convention

Ce sous-chapitre analyse la performance du module de gestion en observant les résultats obtenus avec la méthodologie décrite au sous-chapitre 4.5. Les figures 5.9 à 5.11 présentent les résultats de niveaux et de débits pour les années 2008, 2010 et 2012. Des résultats supplémentaires sont présentés à l'annexe E.

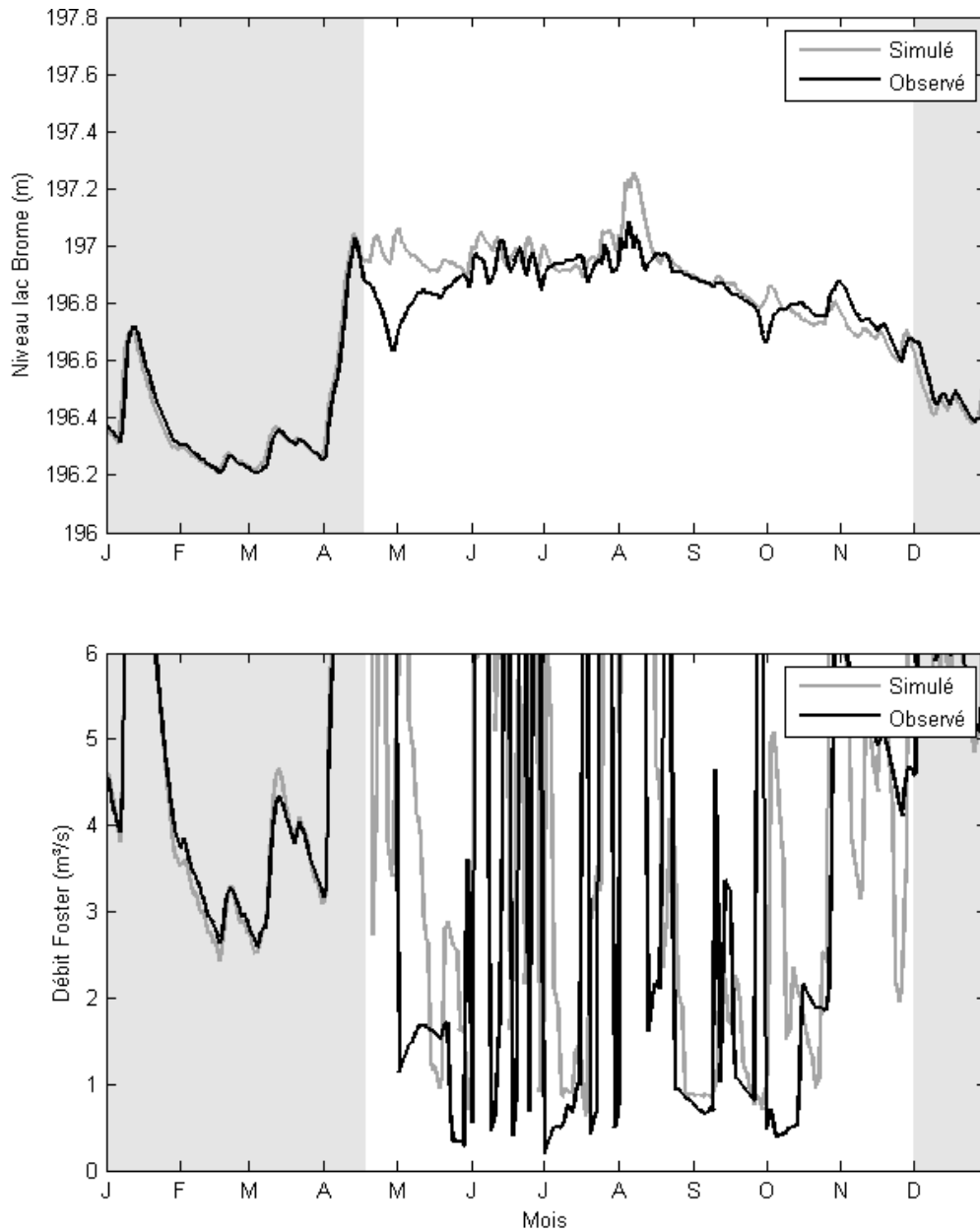
Pour les niveaux et les débits, l'adéquation entre les observations et les simulations est excellente en période hivernale, lorsque les décisions au barrage sont prises avec l'équation de seuil épais. En période estivale, la performance du modèle dépend des décisions du module de gestion. Ce dernier considère une date fixe pour le début du contrôle et un intervalle de temps de gestion de 3 jours. En réalité, la date de début du contrôle est variable et les contrôles ne sont pas toujours effectués aux trois jours. Ceci explique une grande partie des différences entre les observations et les simulations.

En examinant les figures, quelques points intéressants ressortent. En 2010, au début de la période de contrôle, les débits observés sont abaissés plus bas que la limite permise. Ceci a comme effet d'augmenter le niveau du lac plus rapidement. Ensuite, à la fin du mois d'août, les faibles débits observés et simulés sont similaires. En 2008, l'opérateur a débuté le contrôle au barrage au début du mois de mai. Il est possible de voir cette décision par le relèvement des niveaux observés (ligne noire) au début mai. Ceci explique le décollement majeur débutant à la mi-avril entre le niveau observé et simulé au début de la période estivale. Le contraire se produit en 2012, où l'opérateur a débuté le contrôle après la première semaine du mois d'avril.

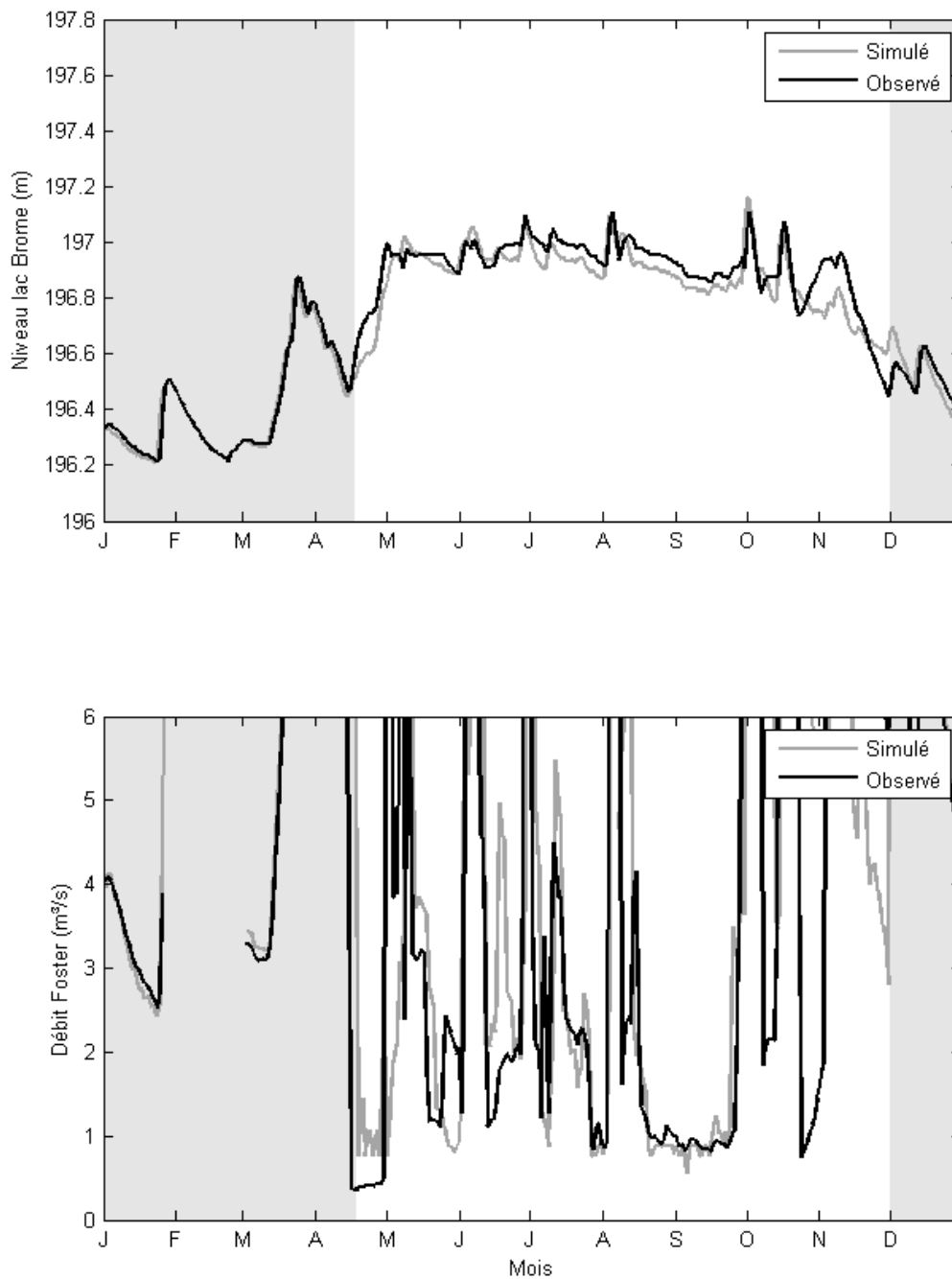
Les règles de gestion actuelles au lac Brome dépendent grandement des décisions de l'opérateur. Sur les figures de débits, les simulations ne s'agencent pas parfaitement aux observations. Les règles de gestion au barrage Foster sont flexibles. Elles permettent plusieurs bonnes décisions pour rencontrer les objectifs de gestion. Dans cet ordre d'idées,

---

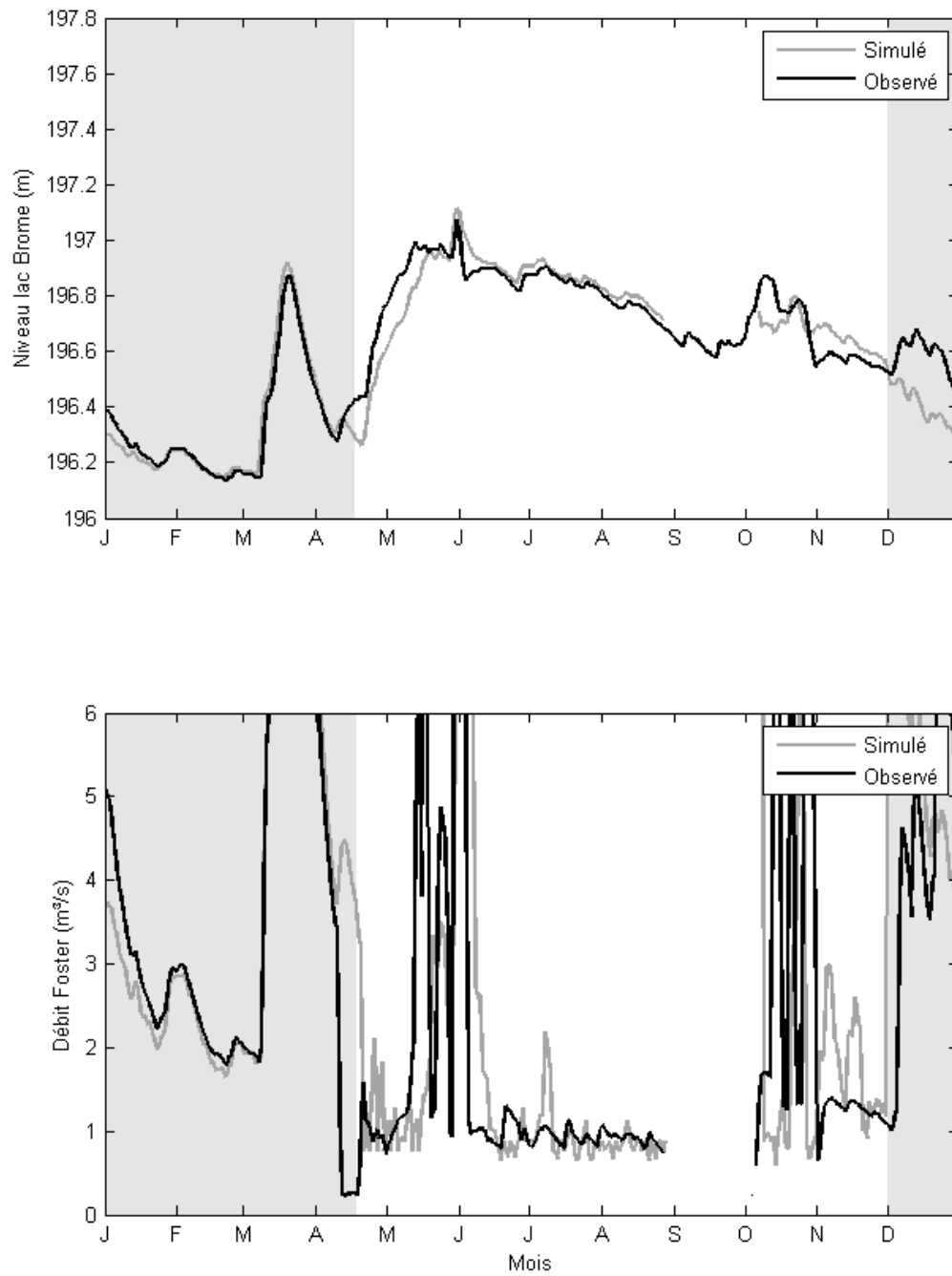
les simulations auraient également pu être observées au lac Brome. Ainsi, il est jugé que le module de gestion selon les règles de la convention effectue un travail adéquat.



**Figure 5.9 - Comparaison des niveaux et des débits journaliers observés et simulés au lac Brome pour l'année 2008**



**Figure 5.10 - Comparaison des niveaux et des débits journaliers observés et simulés au lac Brome pour l'année 2010**



**Figure 5.11 - Comparaison des niveaux et des débits journaliers observés et simulés au lac Brome pour l'année 2012**

## 5.6 La détermination du débit prélevable actuel

Les résultats pour parvenir aux objectifs de recherche sont présentés à partir de ce sous-chapitre. Les résultats du débit pouvant être prélevés actuellement sont présentés en deux étapes. Dans un premier temps, les débits réservés écologiques sont présentés et ensuite l'évaluation du débit prélevable selon les débits réservés écologiques est effectuée.

### 5.6.1 Les débits réservés écologiques

Les débits réservés écologiques calculés selon la méthodologie présentée au sous-chapitre 4.6 sont comparés aux figures 5.12 et 5.13. Il est à noter que les méthodes  $Q_{eco1}$ ,  $Q_{eco2}$ ,  $Q_{eco3}$  et  $Q_{eco4}$  correspondent respectivement à la méthode écohydrologique, à la méthode du Vermont, à la méthode française et au critère passable de la méthode du Montana. Le détail des valeurs obtenues est présenté à l'annexe F.

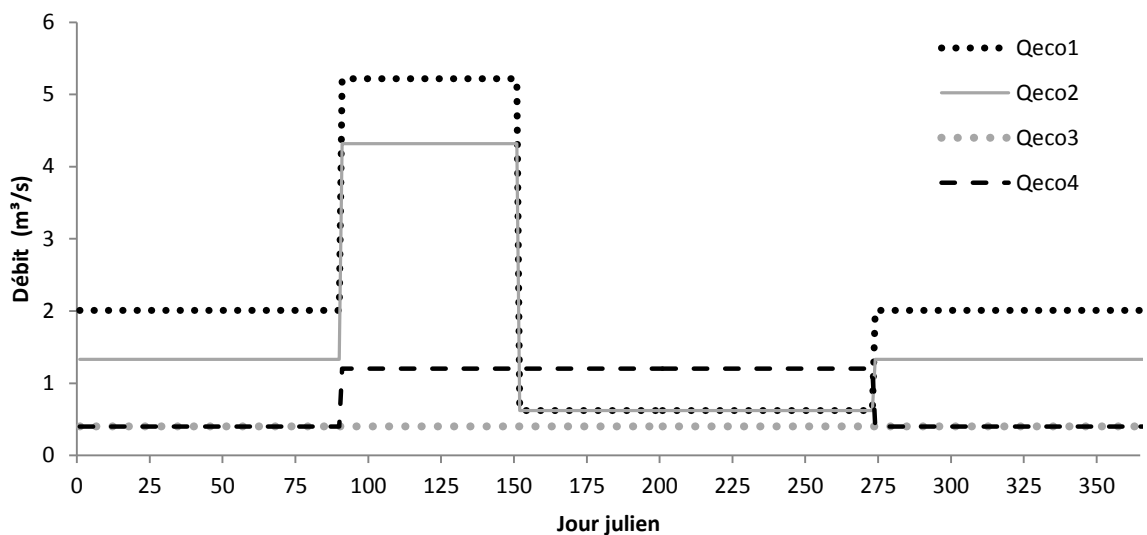


Figure 5.12 - Débits réservés écologiques journaliers au barrage Foster selon les débits  $Q_{eco1}$  à  $Q_{eco4}$  en fonction du jour de l'année

Les tendances sont similaires sur les deux figures. Il est possible de remarquer que les valeurs obtenues varient de façon substantielle selon la méthode utilisée. Les méthodes  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco2}$  suivent les cycles naturels en rivière. La méthode  $Q_{eco1}$  est cependant plus restrictive en période hivernale et en période de crue. La méthode  $Q_{eco4}$  suit une tendance inverse aux deux méthodes précédentes. Ainsi, les débits nécessaires en période hivernale sont moins élevés que les débits nécessaires en période estivale. Cette méthode est la plus restrictive en période estivale. La méthode  $Q_{eco3}$  est quant à elle la moins restrictive sur toutes les périodes. En période hivernale, les débits sont 4 fois plus élevés selon la méthode  $Q_{eco1}$  que selon la  $Q_{eco3}$  et la  $Q_{eco4}$ . En période de crue, les débits de la méthode  $Q_{eco1}$  sont 10 fois plus élevés que la méthode  $Q_{eco3}$ . En période estivale, les débits sont plus similaires.

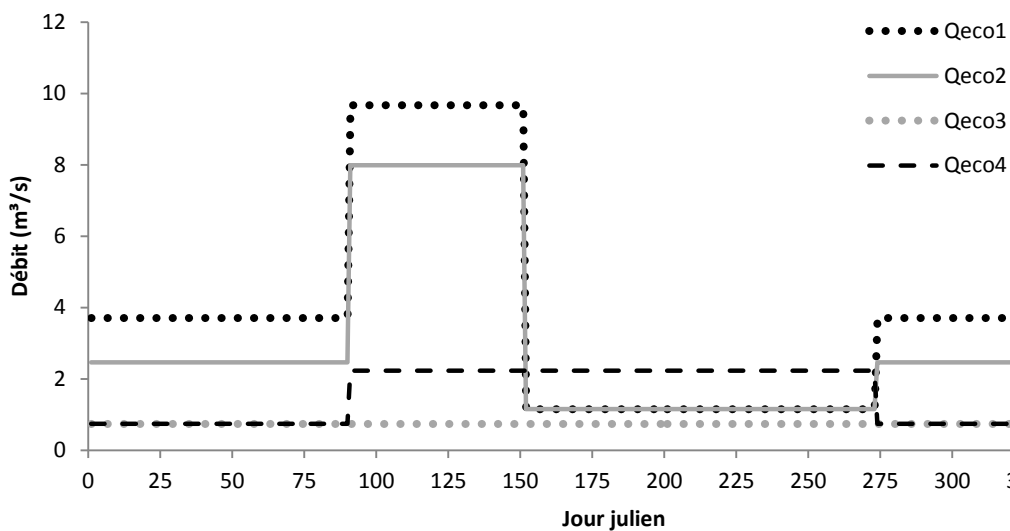


Figure 5.13 - Débits réservés écologiques journaliers à la CTE selon les débits  $Q_{eco1}$  à  $Q_{eco4}$  en fonction du jour de l'année



### 5.6.2 Évaluation du débit prélevable actuel selon $Q_{eco1}$ à $Q_{eco4}$

Une fois les débits réservés écologiques déterminés, le débit pouvant être prélevé actuellement est quantifié. Cette étape est effectuée selon la méthodologie présentée au sous-chapitre 4.6. Il est à noter qu'une analyse de sensibilité portant sur la modélisation de la ponction en eau brute est présentée à l'annexe L. Les figures 5.14 à 5.17 présentent l'évolution du niveau au lac Brome et des débits au barrage Foster et à la CTE pour les 30 années de données évaluées pour une ponction de  $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ . Sur les figures, les lignes noires sont les contraintes à respecter et la ligne pointillée noire est le niveau cible au lac Brome. Les quatre figures de niveaux se ressemblent énormément. Les décisions prises au barrage le sont majoritairement en fonction du niveau cible au lac Brome, ce qui explique la ressemblance. L'équation 4.11 fait en sorte qu'ils sont légèrement différents : avec un débit réservé écologique plus petit, la condition est plus souvent respectée.

Sur les figures de niveaux, il est possible de remarquer que les niveaux minimum et maximum sont respectés la majorité des années. Quelques fois en période de non contrôle, des épisodes d'inondations se produisent au lac Brome. Ces épisodes correspondent aux années 1976, 1986, 1990, 1994 et 2001. Les données de niveaux au lac Brome n'étant pas disponibles jusqu'à cette date, il est impossible de vérifier la représentativité de ces épisodes. Il est à noter que l'équation de seuil a été calibrée pour des niveaux en deçà de 196.90 m et pour des débits en deçà de  $18 \text{ m}^3/\text{s}$ . Les débits aux mêmes dates varient entre 21 à  $29 \text{ m}^3/\text{s}$ , ce qui est en dehors de la zone de calage. Il serait nécessaire d'avoir plus d'années de données observées pour calibrer l'équation sur une plus grande plage de valeurs. Quelques périodes d'inondation surviennent également l'été. Pour éviter ces situations, l'opérateur au barrage effectue un pré-abaissement du niveau du lac. Ce pré-abaissement n'est pas intégré dans le modèle de simulation, ce qui explique que des inondations sont observées en périodes estivales.

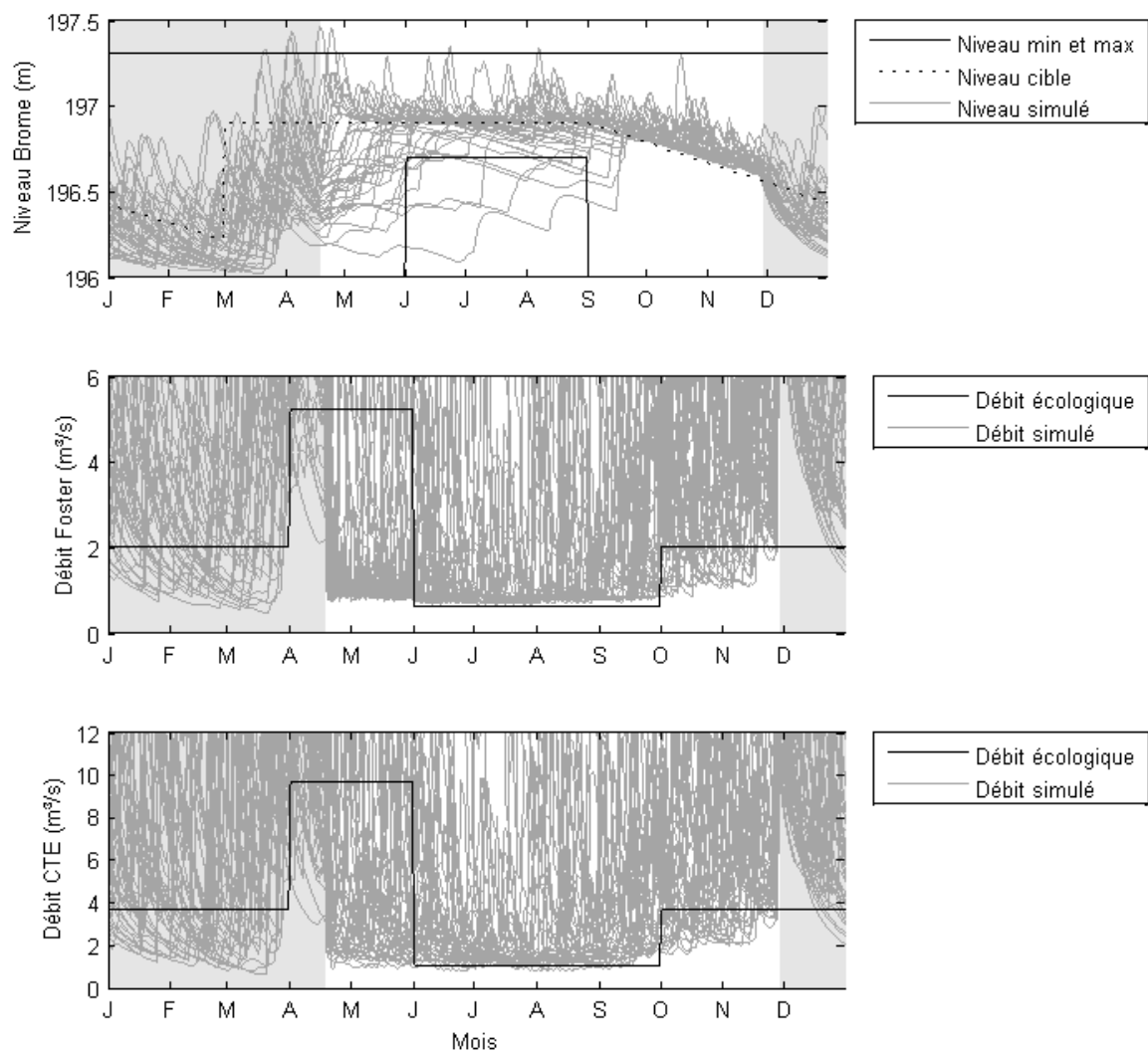
---

Pour quelques années, le niveau du lac baisse en deçà du niveau minimal désiré. Ces années sont présentées séparément à la figure 5.18 et à la figure 5.19. Encore une fois, comme les observations ne sont pas disponibles pour ces années, il est impossible de vérifier la représentativité de ces évènements. À la figure 5.18, il est possible de remarquer que pour les années 1980, 1998 et 1999, la crue survient tôt et que l'hydraulicité après la crue est faible. À la figure 5.19, il est possible de remarquer que pour les années 1975, 1977, 1979 et 1987, la crue survient également tôt. Cependant, l'hydraulicité des mois subséquents est assez élevée pour fournir le niveau minimal au lac Brome. Vers la fin de l'été, l'hydraulicité diminue, ce qui a comme impact un abaissement du lac Brome en deçà du niveau minimal. Pour toutes ces années, l'opérateur du barrage aurait probablement débuté le contrôle antérieurement puisque la crue est survenue tôt. Cela aurait eu comme impact un meilleur niveau dès le début juin.

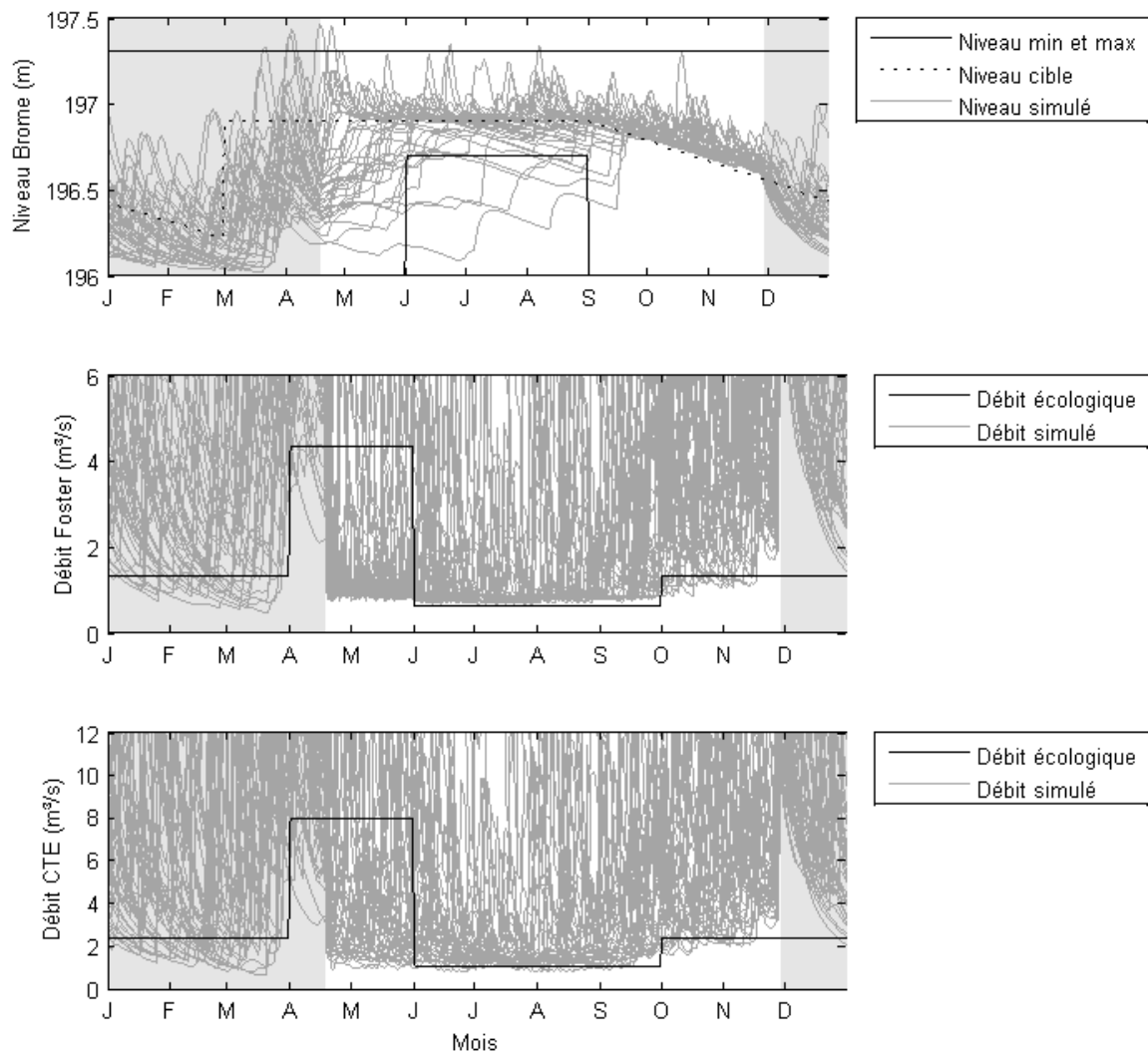
Pour les figures 5.14 à 5.17, les débits sont très similaires pour les mêmes raisons que précédemment. La ligne de contrainte de débit minimal change cependant de figure en figure. Elle permet d'apprécier le dépassement ou le non-dépassement des contraintes. Sur les figures, il est possible de remarquer que les débits minimums ne sont pas respectés en période hivernale pour les méthodes  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco2}$ . Pour les méthodes  $Q_{eco3}$  et  $Q_{eco4}$ , une seule violation du débit minimum survient l'hiver.

En période de crue, les débits minimums des méthodes  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco2}$  ne sont également pas respectés aux deux points de contrôle sur la rivière. Pour ces deux mêmes méthodes en période estivale, les débits minimums sont respectés à Foster, mais pas à la CTE. Selon la méthode  $Q_{eco3}$ , les débits minimums sont toujours respectés aux deux points de contrôle. Finalement, selon la méthode  $Q_{eco4}$ , les débits minimums ne sont pas respectés en période estivale.

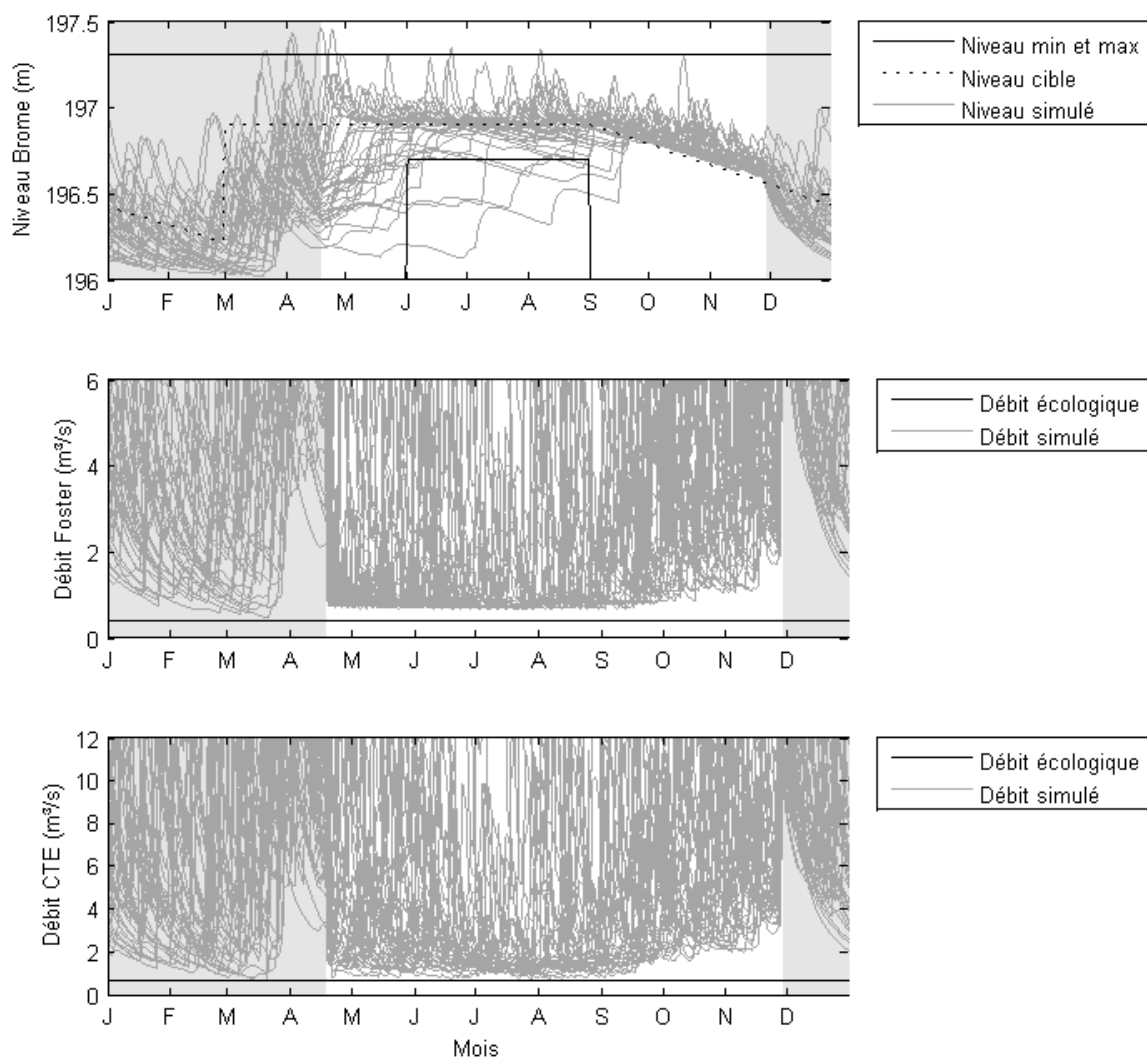
---



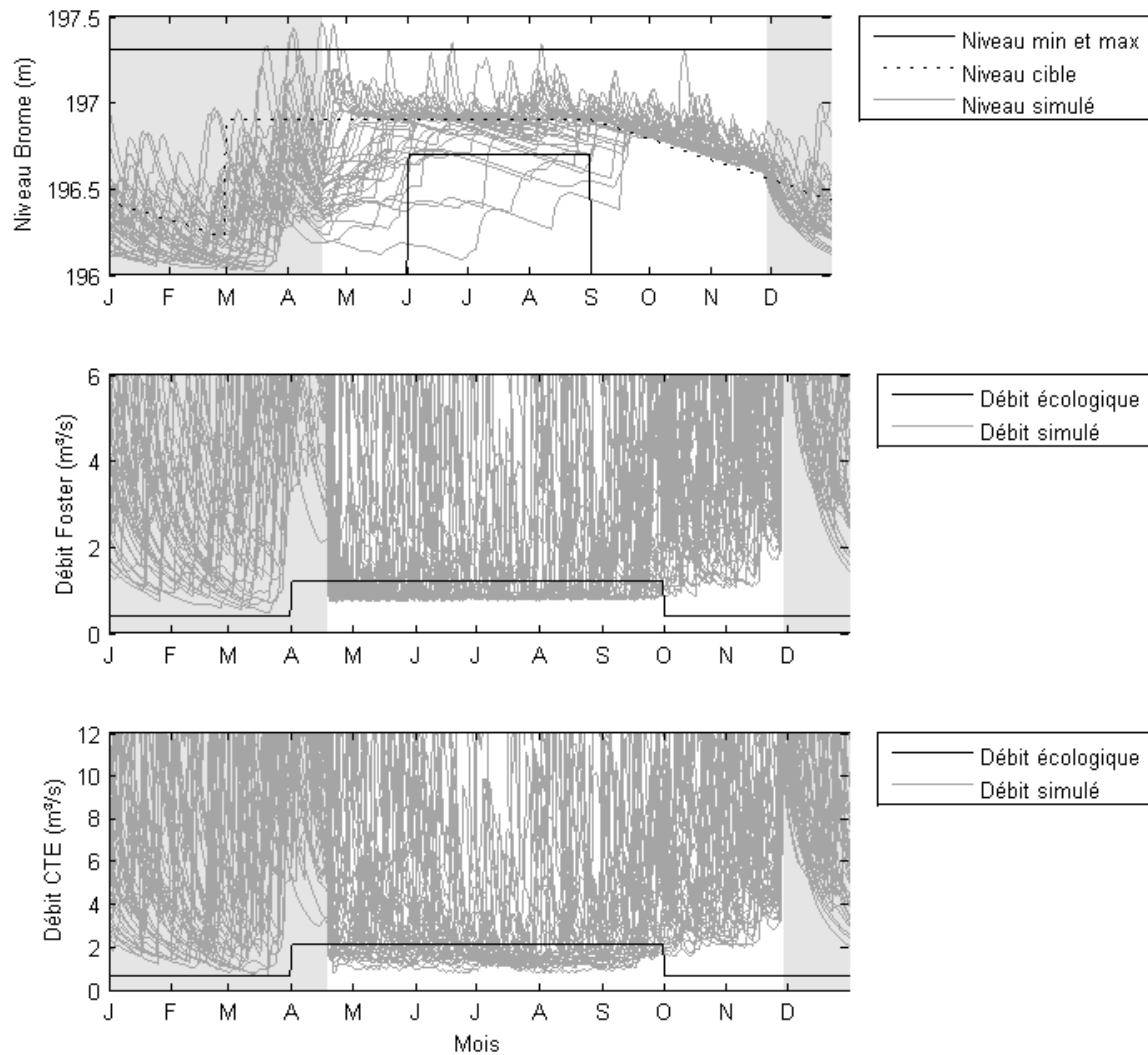
**Figure 5.14 - Comparaison entre les contraintes, les niveaux simulés au lac Brome et débits simulés au barrage Foster et à la CTE pour les années 1971 à 2000 et pour  $Q_{eco1}$  en période de contrôle (zone blanche) et en période de non-contrôle (zone grise)**



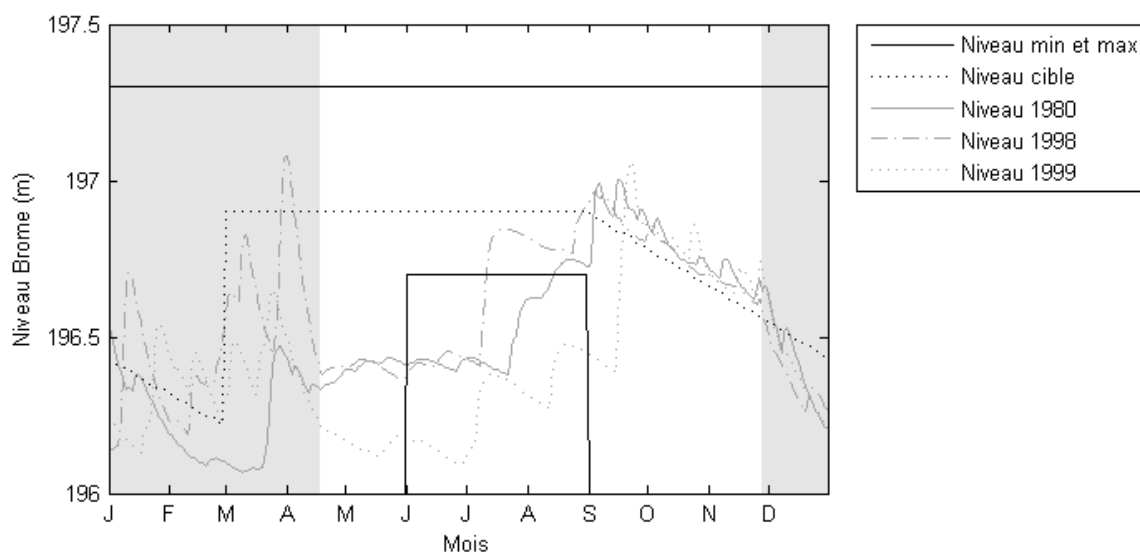
**Figure 5.15 - Comparaison entre les contraintes, les niveaux simulés au lac Brome et débits simulés au barrage Foster et à la CTE pour les années 1971 à 2000 et pour  $Q_{eco2}$  en période de contrôle (zone blanche) et en période de non-contrôle (zone grise)**



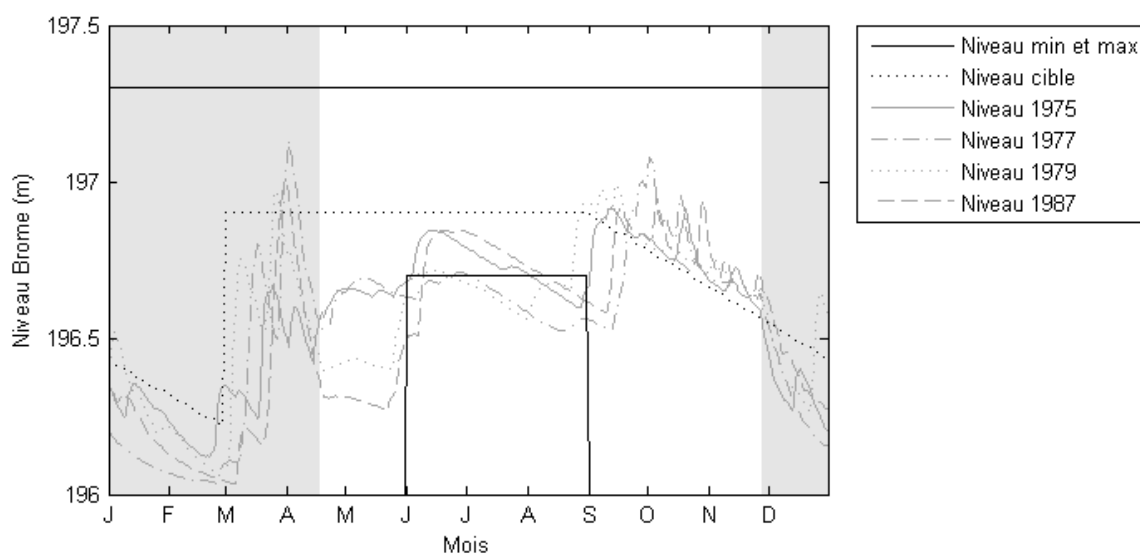
**Figure 5.16 - Comparaison entre les contraintes, les niveaux simulés au lac Brome et débits simulés au barrage Foster et à la CTE pour les années 1971 à 2000 et pour  $Q_{ec03}$  en période de contrôle (zone blanche) et en période de non-contrôle (zone grise)**



**Figure 5.17 - Comparaison entre les contraintes, les niveaux simulés au lac Brome et débits simulés au barrage Foster et à la CTE pour les années 1971 à 2000 et pour  $Q_{eco4}$  en période de contrôle (zone blanche) et en période de non-contrôle (zone grise)**

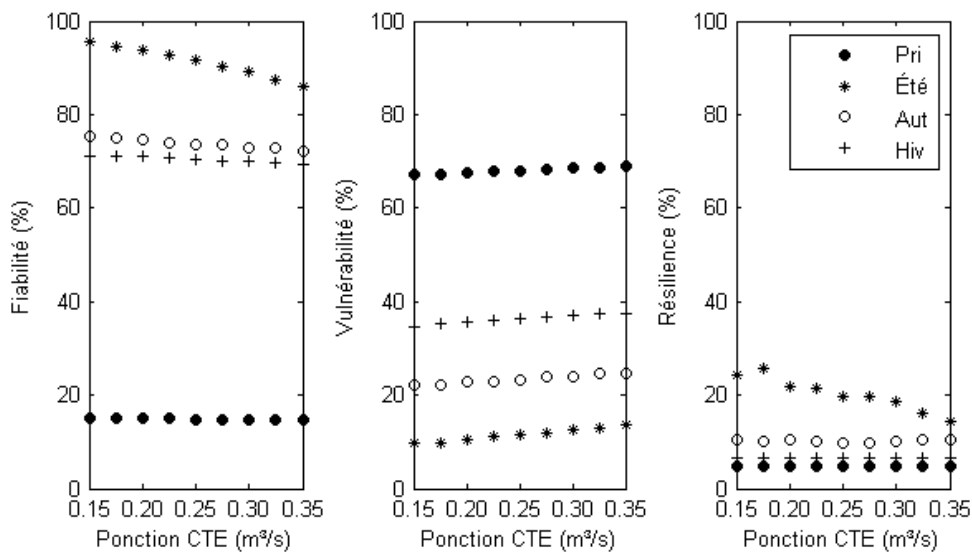


**Figure 5.18 - Comparaison entre les contraintes et niveaux simulés des années 1980, 1998 et 1999 au lac Brome en période de contrôle (zone blanche) et en période de non-contrôle (zone grise)**



**Figure 5.19 - Comparaison entre les contraintes et les niveaux simulés des années 1975, 1977, 1979 et 1987 au lac Brome en période de contrôle (zone blanche) et en période de non-contrôle (zone grise)**

Ensuite, les critères de fiabilité, de vulnérabilité et de résilience sont calculés pour toutes les simulations sur la contrainte de débit minimum. Il est à noter que les équations pour le calcul des critères sont présentées à la section 3.3. Le débit minimal correspond au débit réservé écologique. Les résultats sont présentés aux figures 5.20 à 5.23. Sur les figures, il est possible de remarquer des tendances : la fiabilité et la résilience diminuent et la vulnérabilité augmente avec l'augmentation du débit pompé.



**Figure 5.20 - Critères FVR saisonniers à la CTE pour la période actuelle sur les années 1971 à 2000 pour les neuf débits de consommation en eau brute simulés en considérant  $Q_{eco1}$**

Selon la méthode  $Q_{eco1}$ , la période la plus critique est le printemps, quand la fiabilité est en deçà de 20 %. La même conclusion peut être tirée pour la méthode  $Q_{eco2}$ . Ces deux méthodes de débits réservés écologiques demandent un débit très élevé en période de crue et les apports naturels ne sont pas toujours suffisants. Pour la méthode  $Q_{eco3}$ , la fiabilité est à 100 % pour plusieurs saisons et plusieurs débits, expliquant pourquoi les lignes sont absentes sur la figure. Ces résultats ne sont pas surprenants puisque la méthode  $Q_{eco3}$  est la moins



contraignante en termes de débit réservé écologique. Ces résultats sont présentés plus en détail ultérieurement. Selon la méthode  $Q_{eco4}$ , la saison critique est l'été, quand la fiabilité est en deçà de 50 % et la vulnérabilité supérieure à 30 %. La fiabilité la plus élevée est observée l'été pour la méthode  $Q_{eco1}$ . Pour la méthode  $Q_{eco2}$ , l'été et l'automne sont les saisons les plus fiables, dépendamment du débit pompé. Ainsi, les saisons critiques changent selon la méthode de débit réservé écologique utilisée. Les saisons où la ponction est la plus vulnérable et la moins résiliente varient également selon la méthode utilisée.

Les valeurs des indicateurs FVR calculées sur le débit minimal et le niveau minimal pour les neuf débits sont présentées à l'annexe H. Dans cette annexe, il est possible de remarquer que la fiabilité sur le niveau minimal au lac Brome en période estivale diminue légèrement avec l'augmentation du débit pompé à la CTE. Pour les débits  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco2}$ , la fiabilité varie de 88 % à 87 % pour les débits pompés 0.15 m<sup>3</sup>/s à 0.35 m<sup>3</sup>/s. Pour  $Q_{eco3}$ , la variation est de 90 % à 89 % pour les mêmes débits. Pour le débit  $Q_{eco4}$ , la fiabilité demeure à 87 %. La variation est due à l'équation 4.11. Plus souvent, la condition ne sera pas respectée. L'abaissement du débit au barrage à 0.76 m<sup>3</sup>/s n'est pas possible, donc le niveau du lac s'abaisse plus rapidement.

---

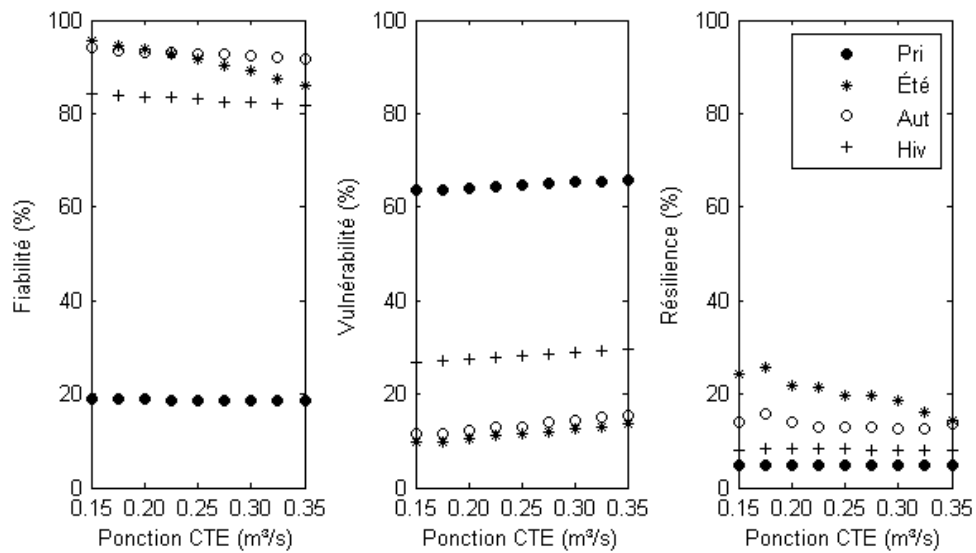


Figure 5.21 - Critères FVR saisonniers à la CTE pour la période actuelle sur les années 1971 à 2000 pour les neuf débits de consommation en eau brute simulés en considérant  $Q_{ec02}$

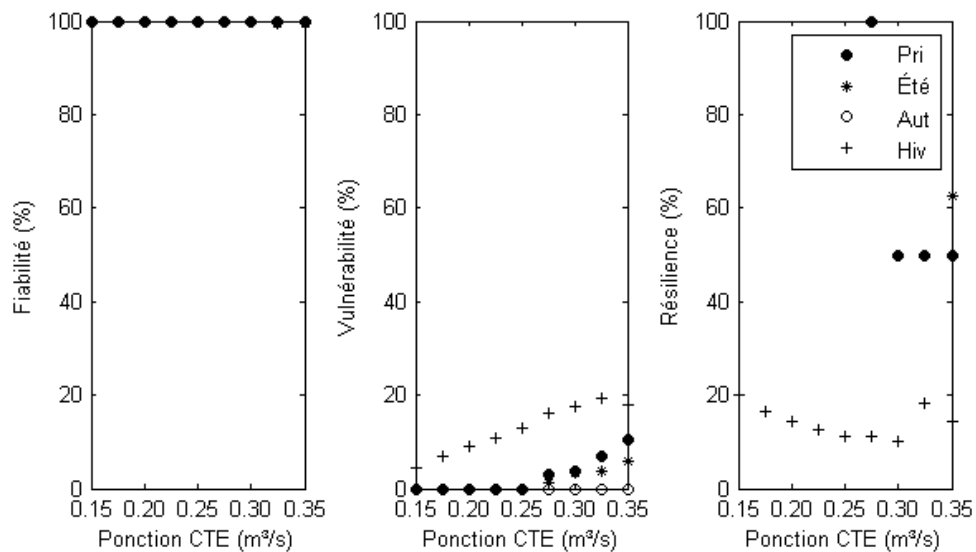
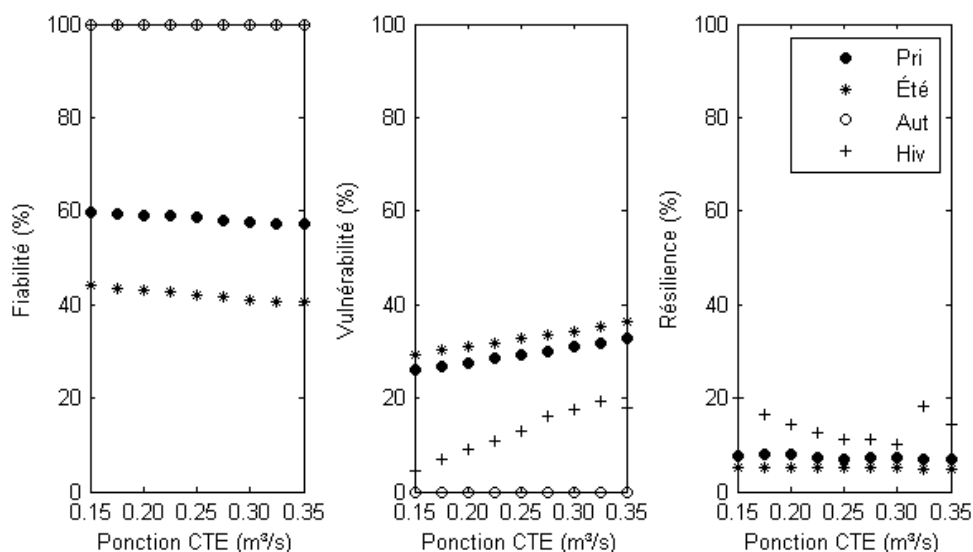


Figure 5.22 - Critères FVR saisonniers à la CTE pour la période actuelle sur les années 1971 à 2000 pour les neuf débits de consommation en eau brute simulés en considérant  $Q_{ec03}$



**Figure 5.23 - Critères FVR saisonniers à la CTE pour la période actuelle sur les années 1971 à 2000 pour les neuf débits de consommation en eau brute simulés en considérant  $Q_{eco4}$**

Le tableau 5.8 présente les résultats de fiabilité compilés pour le débit de  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ . Les résultats sont compilés pour le débit  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$  puisque ce débit correspond au débit autorisé par le certificat d'autorisation de la ville de Bromont. Avec ce tableau, il est possible de voir que seul le débit réservé écologique calculé selon la méthode  $Q_{eco3}$  peut permettre à Bromont de pomper  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$  sans avoir d'impact sur le milieu naturel en périodes printanière, estivale et automnale. À partir du débit  $0.28 \text{ m}^3/\text{s}$ , des dépassements de contraintes surviennent pour ces saisons. En période hivernale, le seul dépassement dure neuf jours et il est de  $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Il est également intéressant de s'attarder aux dépassements maximaux et au nombre de jours de dépassement maximal. Les dépassements maximaux pour le débit  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$  sont présentés au tableau 5.9 et le nombre de jours de dépassement maximal au tableau 5.10. Les résultats pour les neuf débits sont présentés à l'annexe H. En période estivale pour le

niveau minimal, le plus grand dépassement est de 0.61 m et il survient pour les méthodes  $Q_{eco1}$ ,  $Q_{eco2}$  et  $Q_{eco4}$ . Il est normal que le dépassement ne soit pas très sensible aux débits réservés écologiques considérés puisque les décisions au barrage sont prises en fonction de la convention. Pour les débits, le plus grand dépassement de contraintes survient au printemps pour la méthode  $Q_{eco1}$ , avec une valeur de 8.82 m<sup>3</sup>/s.

**Tableau 5.8 - Fiabilité sur le niveau minimal estival au lac Brome ainsi que sur le débit minimal saisonnier à la CTE pour le débit 0.25 m<sup>3</sup>/s selon les 4 débits réservés écologiques (%)**

Méthode Qeco	Nmin Lac Brome	Qmin CTE	Qmin CTE	Qmin CTE	Qmin CTE
	Été	Hiver	Printemps	Été	Automne
Qeco1	87.3	70.4	14.8	91.7	73.7
Qeco2	87.3	82.9	18.8	91.8	92.6
Qeco3	89.7	99.8	100.0	100.0	100.0
Qeco4	87.2	99.8	58.5	42.0	100.0

**Tableau 5.9 - Dépassement de contraintes maximal sur le niveau minimal estival au lac Brome ainsi que sur le débit minimal saisonnier à la CTE pour le débit 0.25 m<sup>3</sup>/s selon les 4 débits réservés écologiques (%)**

Méthode Qeco	Nmin Lac Brome	Qmin CTE	Qmin CTE	Qmin CTE	Qmin CTE
	Été (m)	Hiver (m <sup>3</sup> /s)	Printemps (m <sup>3</sup> /s)	Été (m <sup>3</sup> /s)	Automne (m <sup>3</sup> /s)
Qeco1	0.61	6.77	8.82	0.41	2.19
Qeco2	0.61	5.09	7.14	0.41	0.94
Qeco3	0.59	0.15	0	0	0
Qeco4	0.61	0.15	1.49	1.49	0

Le nombre de jours de dépassement maximal pour le niveau est identique pour les quatre méthodes puisque le niveau dépasse la contrainte pour les mois de juin à août en 1999. La pire situation pour le débit se produit pour la méthode  $Q_{eco4}$  en période estivale, le dépassement durant 106 jours.

**Tableau 5.10 - Nombre de jours consécutifs de dépassement maximal du niveau minimal estival au lac Brome ainsi que du débit minimal saisonnier à la CTE pour le débit 0.25 m<sup>3</sup>/s selon les 4 débits réservés (jours)**

Méthode Qeco	Nmin	Qmin	Qmin	Qmin	Qmin
	Lac Brome	CTE	CTE	CTE	CTE
	Été	Hiver	Printemps	Été	Automne
Qeco1	92	68	43	30	36
Qeco2	92	50	43	30	18
Qeco3	92	0	0	0	0
Qeco4	92	9	42	106	0

À la lumière des résultats, il est possible de comprendre qu'il n'est pas possible de pomper le débit correspondant au certificat d'autorisation de la ville de Bromont sans avoir un impact sur le milieu naturel. En effet, tel qu'il a été démontré au tableau 5.8, aucune méthode de débit réservé écologique n'atteint une fiabilité de 100 % pour les 4 saisons sur la contrainte du débit minimal. Pour les méthodes  $Q_{eco1}$ ,  $Q_{eco2}$  et  $Q_{eco4}$ , au plus petit débit testé, soit 0.15 m<sup>3</sup>/s, la fiabilité de 100% sur la contrainte de débit minimal n'est pas atteinte à toutes les saisons. Pour la méthode  $Q_{eco3}$ , au plus petit débit testé, la fiabilité de 100 % est atteinte pour le printemps, l'été et l'automne. À l'hiver, la fiabilité est de 99.9%, donc théoriquement, même une ponction de 0.15 m<sup>3</sup>/s a un impact sur le milieu naturel. Ainsi, le débit prélevable

actuellement est plus petit que la plage de valeurs testées dans ce travail. À ce point du projet, la méthodologie utilisée ne démontre pas qu'elle est profitable à Bromont puisqu'elle ne démontre pas que le débit correspondant au certificat d'autorisation peut être prélevé.

---

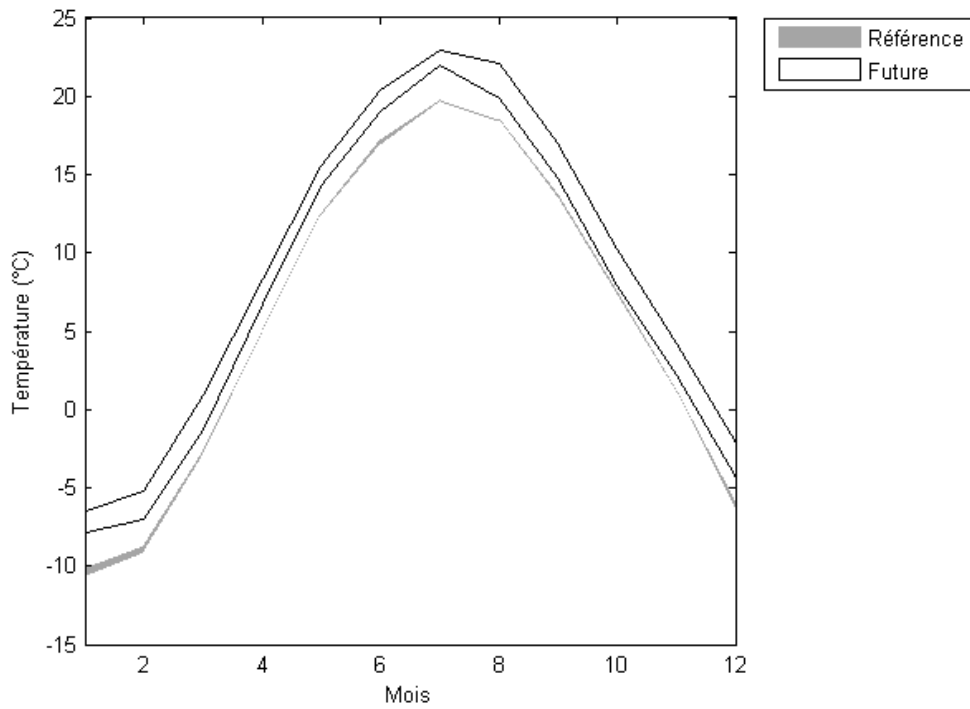
## 5.7 Impacts des changements climatiques sur le système hydrique

Ce sous-chapitre présente les résultats de l'analyse en changements climatiques en trois temps. En premier lieu, les impacts climatiques des CC sont survolés. Ensuite, l'impact sur les débits en rivière est présenté. Finalement, l'impact des changements climatiques à la CTE et au lac Brome est évalué selon deux méthodes de débits réservés écologiques ( $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco3}$ ). Il est à noter que débit  $Q_{eco1}$  a été retenu pour la suite de l'analyse puisqu'il s'agit de la norme actuelle au Québec. Le débit  $Q_{eco3}$  a été retenu puisqu'il est le moins restrictif.

### 5.7.1 Impacts climatiques

La méthodologie utilisée pour produire les résultats suivants est présentée au sous-chapitre 4.7. Les figures 5.24 et 5.25 présentent le résultat des moyennes mensuelles effectuées sur les 30 années de la période de référence et de la période future pour la station 725453, soit celle située légèrement au nord du lac Brome sur la figure 2.3. Les résultats sont présentés pour cette station puisqu'elle est centrale sur le bassin versant. La période de référence correspond aux années 1971 à 2000 et la période future correspond aux années 2041 à 2070. Les projections climatiques utilisées pour produire les résultats sont présentées au tableau 4.1. La différence entre les températures moyennes de la période de référence et de la période future est présentée à la figure 5.24. En période future, il est possible d'observer une augmentation générale de la température mensuelle. La plus petite variation est de 2.0°C, elle est observée au mois d'octobre. La plus grande variation est de 3.3°C, elle est observée au mois de janvier. L'incertitude maximale de la période future est la différence entre la plus grande et la plus petite augmentation mensuelle, elle est de 2.3°C.

---



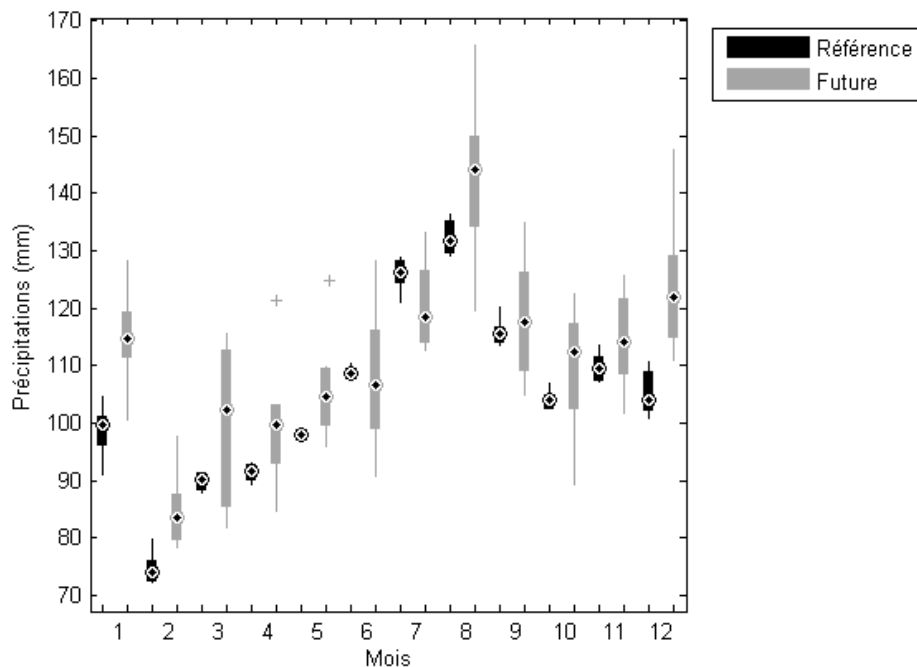
**Figure 5.24 - Comparaison des températures moyennes mensuelles en période de référence (1971-2000) et en période future (2041-2070) de la station 725453 selon les 7 projections climatiques**

La figure 5.25 présente la variation entre les précipitations mensuelles de la période de référence et de la période future. Selon la moyenne des distributions, une augmentation des précipitations peut être observée sauf pour les mois de juin et de juillet où une diminution moyenne de 1 mm et de 5 mm respectivement est obtenue. La plus grande augmentation se produit en décembre, elle est de 18 mm. La figure 5.26 présente l'évolution des précipitations annuelles liquides et solides en période de référence et en période future pour la même station (725453) et les 7 mêmes projections climatiques. L'augmentation de la quantité de précipitation est encore une fois bien visible. Même si la quantité de

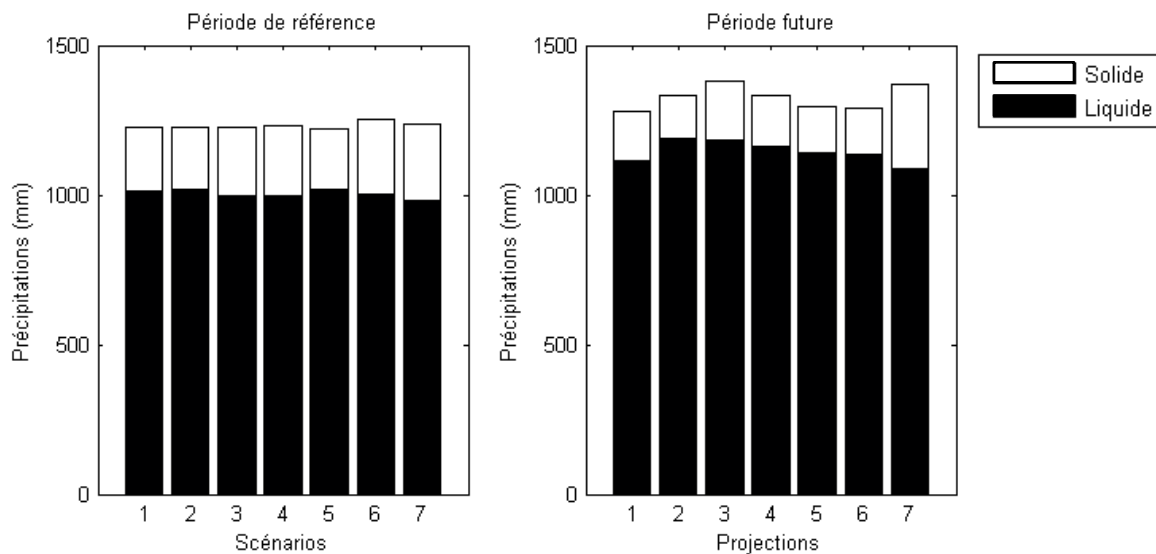
---



précipitations totale augmente, la quantité de précipitations solides diminue. Cela est conséquent avec l'augmentation des températures en période hivernale observée à la figure 5.24.



**Figure 5.25 - Comparaison entre la somme des précipitations mensuelles moyennes en période de référence (1971-2000) et en période future (2041-2070) de la station la station 725453 selon les 7 projections climatiques**

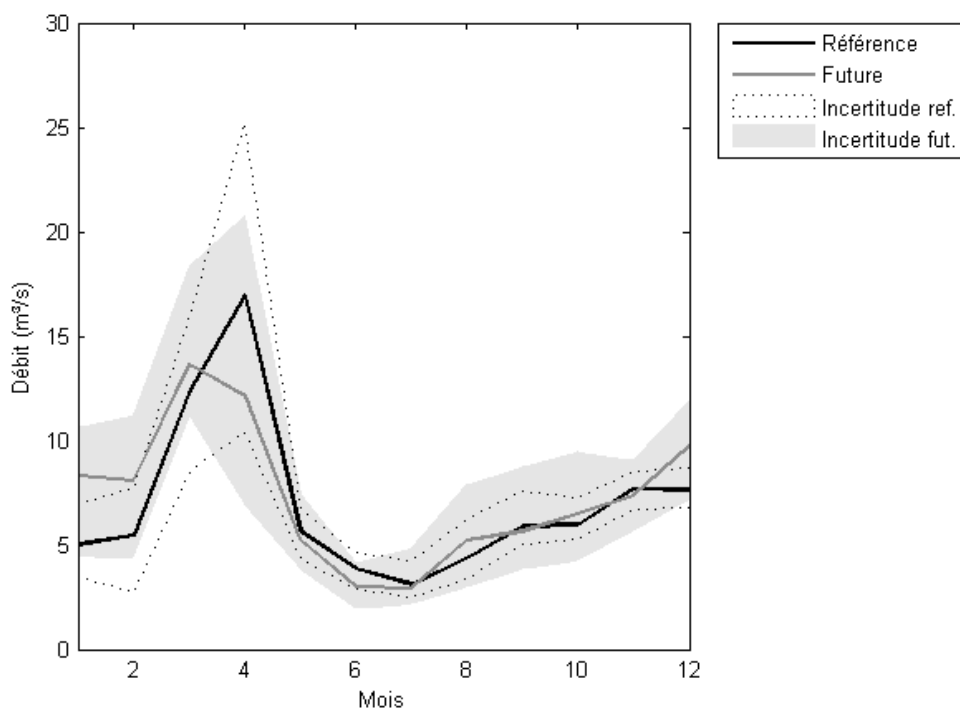


**Figure 5.26 - Précipitations annuelles liquides et solides en période de référence (1971-2000) et en période future (2041-2070) de la station 725453 selon les 7 projections climatiques**

## 5.7.2 Impacts hydriques

La figure 5.27 présente la moyenne des 30 années de données des débits mensuels moyens selon les 7 projections climatiques du tableau 4.1 à la prise d'eau de la ville de Bromont. Il est possible d'observer des débits hivernaux plus élevés. Ceux-ci sont expliqués par une augmentation des précipitations en période hivernale et une diminution du stockage sous forme solide. La figure 5.27 permet d'observer un devancement de la période de crue hivernale et une diminution de son intensité. Le devancement est expliqué par des températures plus chaudes à cette période. La réduction de l'amplitude est expliquée par la diminution du stock de neige. En période estivale, une diminution du débit moyen pour les mois de juin et juillet est observée alors qu'une augmentation est observée pour le mois d'août. Tel que présenté à la figure 5.25, cette augmentation du débit moyen au mois d'août

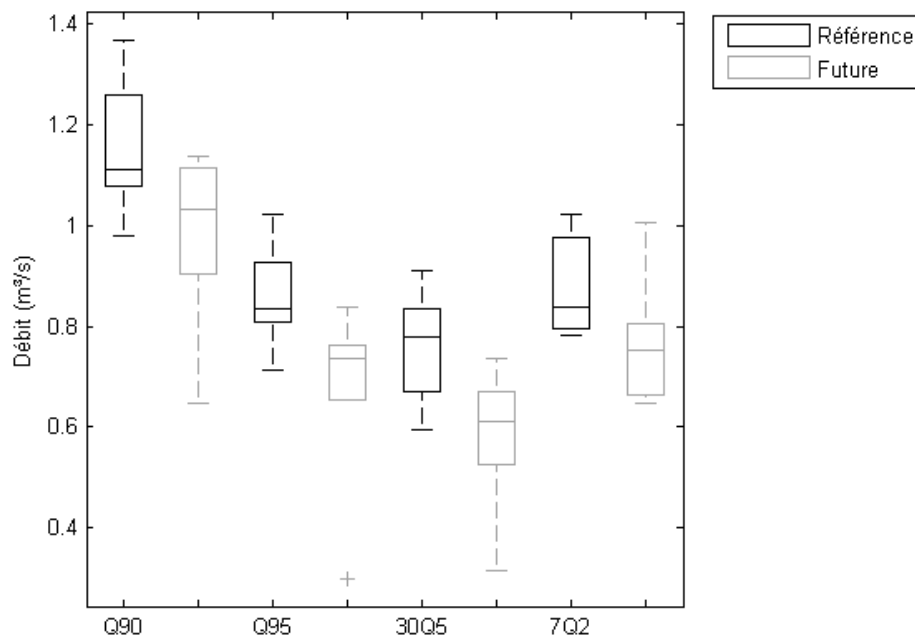
est conséquente avec l'augmentation de la somme des précipitations moyenne du même mois. Une augmentation du débit moyen peut aussi être observée à l'automne.



**Figure 5.27 - Comparaison entre le débit mensuel moyen en période de référence (1971-2000) et futur (2041-2070) à la CTE selon les 7 projections climatiques**

La figure 5.28 présente l'impact des changements climatiques sur les indicateurs de faibles débits à la prise d'eau de Bromont. Il est à noter que les distributions de probabilité utilisées pour produire les résultats sont celles utilisées par Zeestraten [2012], soit la distribution des valeurs extrêmes (GEV) pour le 30Q5 et la distribution de Gumbel pour le 7Q2. Une diminution des indices d'étiage et une augmentation de la variabilité peuvent être observées

pour tous les indices en période future. La plus grande diminution est observée pour le Q95, elle est de  $0.19 \text{ m}^3/\text{s}$ . Les diminutions pour le Q90, le 30Q5 et le 7Q2 sont respectivement de  $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $0.18 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $0.11 \text{ m}^3/\text{s}$ . Il est à noter que les diminutions sont calculées sur la moyenne des distributions.



**Figure 5.28 - Comparaison entre les indicateurs de faibles débits en période de référence (1971-2000) et en période future (2041-2070) à la CTE selon les 7 projections climatiques**

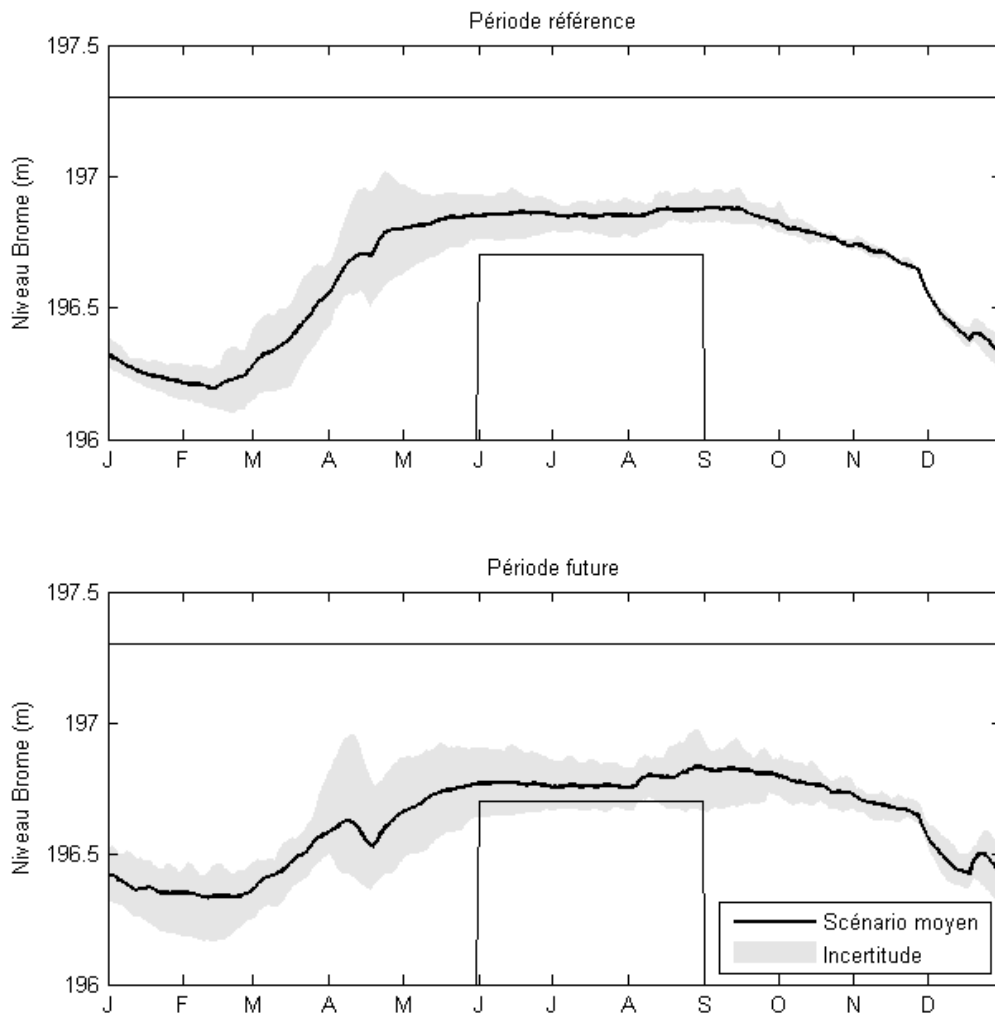
### 5.7.3 Impacts sur le système hydrique selon $Q_{eco1}$ et $Q_{eco3}$

Dans un premier temps, il est possible d'évaluer l'impact des changements climatiques sur les niveaux au lac Brome. La figure 5.29 présente l'incertitude des niveaux au lac Brome due aux sept projections climatiques en période de référence et en période future ainsi que la moyenne des niveaux de  $Q_{eco1}$ . Sur la figure, il est possible d'observer que l'incertitude due aux sept projections climatiques des périodes estivale et hivernale augmente en période future. Il est à noter que les figures de  $Q_{eco3}$  sont toujours très similaires à celles de  $Q_{eco1}$ , et elles ne sont donc pas présentées dans la suite du document. Les figures sont similaires puisque les décisions au barrage sont prises en fonction de la convention et non des débits réservés écologiques. La légère différence entre les deux figures est que les niveaux de la méthode  $Q_{eco1}$  sont légèrement plus bas puisque plus souvent la condition de l'équation 4.11 n'est pas respectée. Ces résultats sont discutés dans les figures et dans les tableaux des prochains paragraphes.

La figure 5.30 compare les niveaux moyens en période de référence et en période future de  $Q_{eco1}$ . Le niveau est plus élevé en hiver en période future, ce qui est conséquent avec l'augmentation des débits à cette période. Il est également possible d'observer qu'après la crue, les niveaux diminuent sur une plus longue période de temps pour la période future. Tel qu'il est possible de remarquer à la figure 5.27, la crue est devancée en période future. Ainsi, lorsque la date de début du contrôle au barrage Foster demeure constante en période future tel que pour la figure 5.30, le niveau du lac s'abaisse sur une plus grande période de temps avant que le contrôle débute. En période estivale, les niveaux moyens de la période future sont systématiquement inférieurs. Cette observation s'accorde avec les débits moyens inférieurs des mois de juin et juillet et avec des débits d'étiage inférieurs en général. Le niveau du lac s'abaisse puisque les apports sont moins grands sur tout le bassin versant et puisque les débits minimums à Bromont demeurent les mêmes. L'augmentation du débit moyen au mois d'août n'est pas suffisante pour pallier au manque des deux mois précédents.

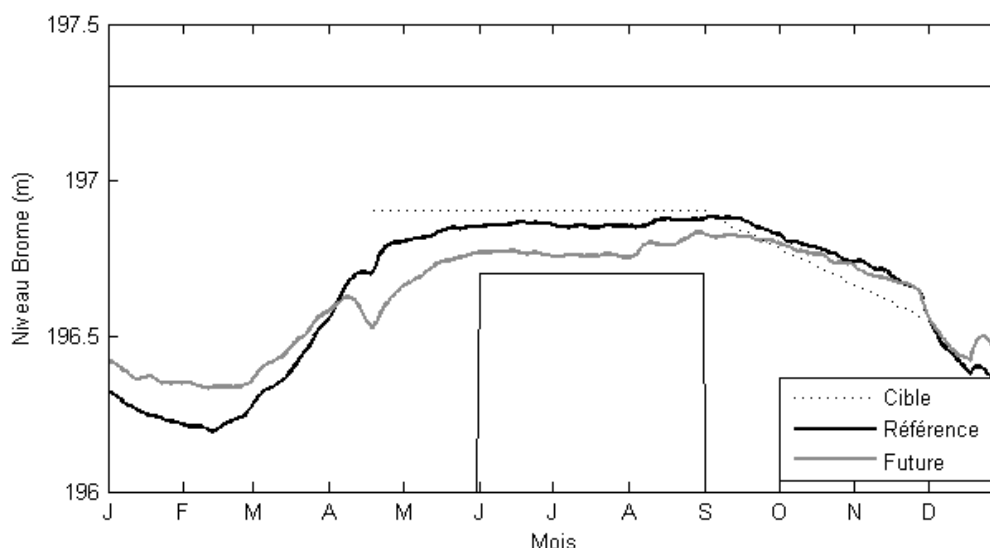
---

En moyenne, ils sont inférieurs de 8.5 cm pour  $Q_{eco1}$  et 8.1 cm pour  $Q_{eco3}$ . Finalement, à l'automne, aucun impact n'est visible.



**Figure 5.29 - Incertitude et niveaux journaliers moyens selon les 7 projections climatiques en période de référence (1971-2000) et en période future (2041-2070) au lac Brome selon**

$Q_{eco1}$



**Figure 5.30 - Comparaison entre les niveaux journaliers moyens au lac Brome selon les 7 projections climatiques de la période de référence (1971-2000) et de la période future (2041-2070) selon  $Q_{eco1}$**

Les figures 5.31 et 5.32 présentent les critères FVR sur le niveau minimal au lac Brome en période de référence et en période future selon les ponctions à la CTE pour la période estivale. La fiabilité diminue de façon marquée en période future et légèrement avec l'augmentation du débit pompé à la CTE, tel que présenté à la section 5.7.2. Dans les deux cas, la vulnérabilité augmente et l'incertitude sur la vulnérabilité est moins grande en période future. La résilience et l'incertitude sur celle-ci diminuent dans les deux cas. Ces résultats sont directement liés à la diminution des débits d'étiage observés à la figure 5.28. Les résultats sont présentés sous forme de tableau à l'annexe I. Le détail des résultats pour la ponction  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$  est présenté au tableau 5.11.

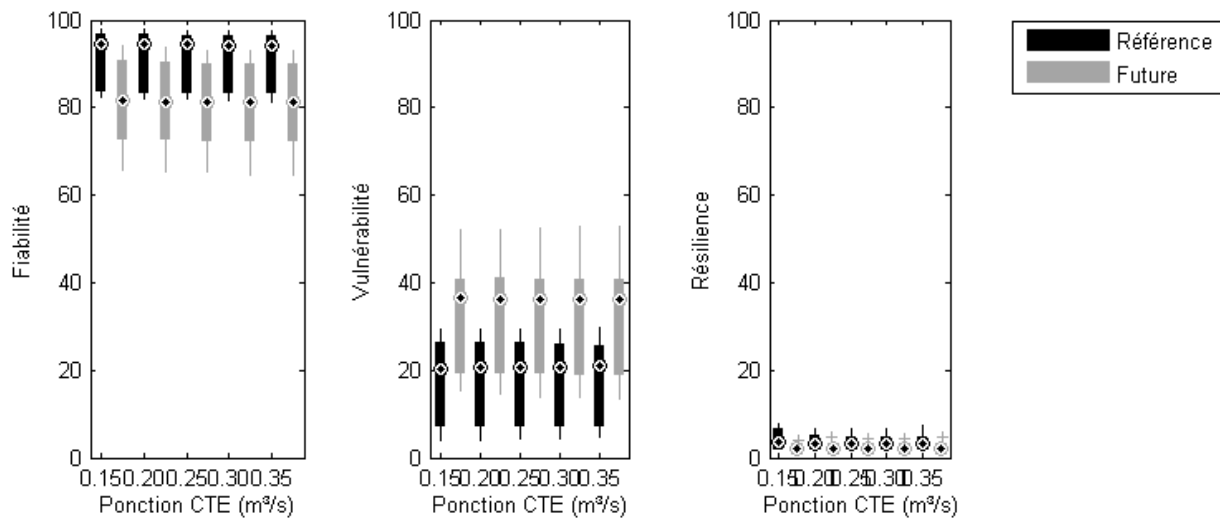


Figure 5.31 - Critères FVR saisonniers sur le niveau minimal estival au lac Brome en périodes de référence (1971-2000) et future (2041-2070) pour  $Q_{eco1}$  selon les neuf débits de consommation en eau brute simulés

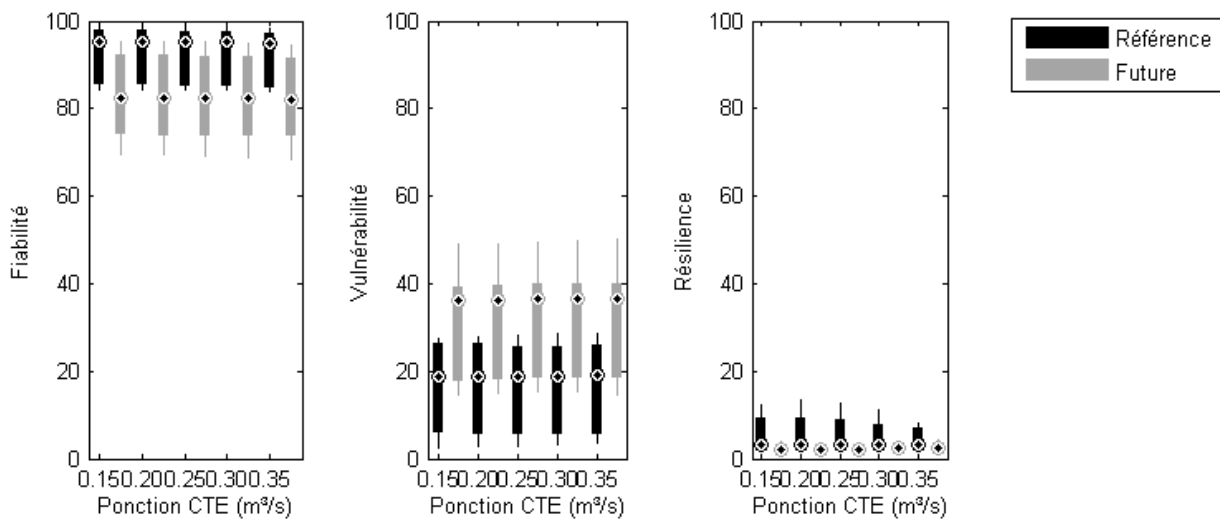


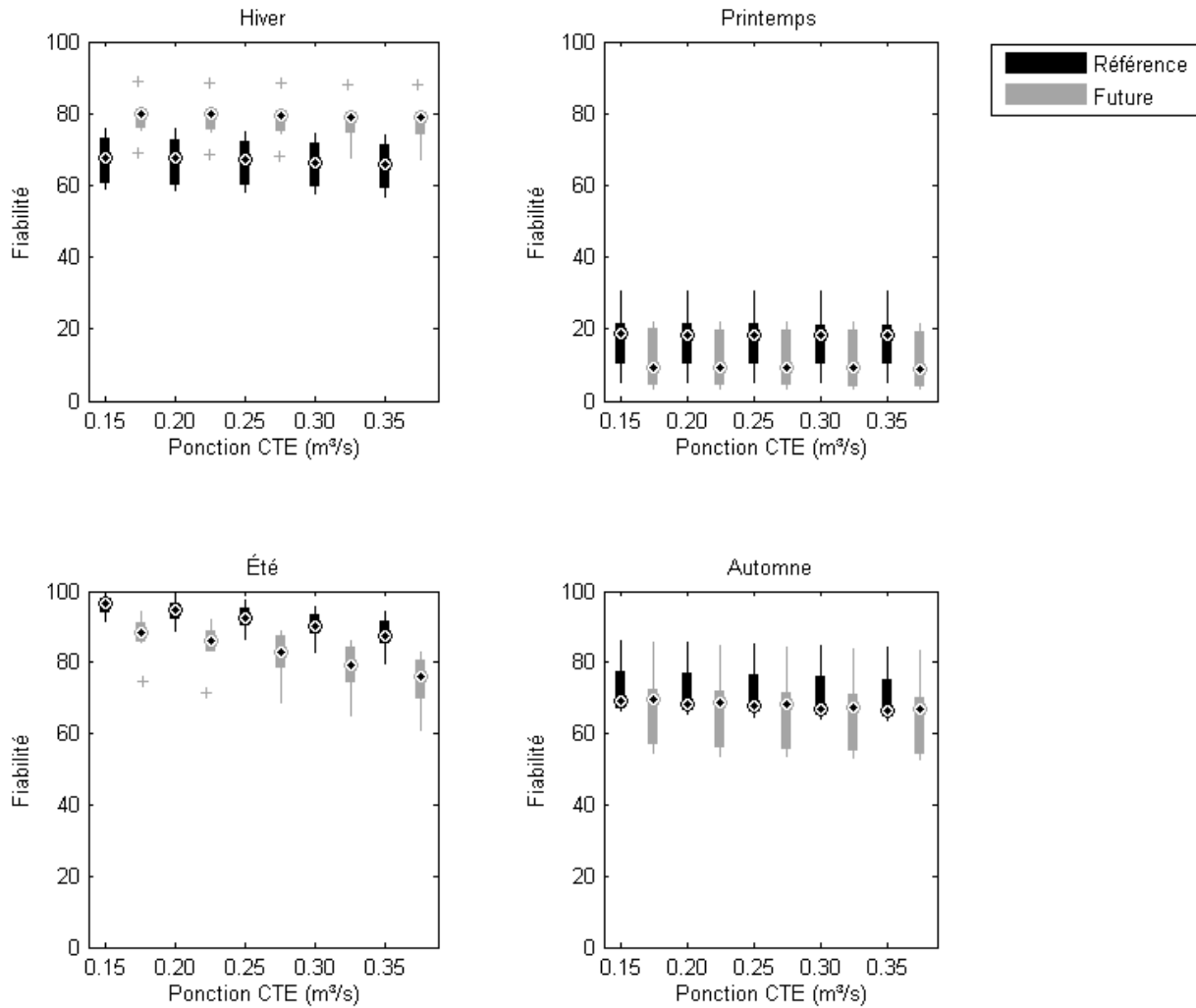
Figure 5.32 - Critères FVR saisonniers sur le niveau minimal estival au lac Brome en périodes de référence (1971-2000) et future (2041-2070) pour  $Q_{eco3}$  selon les neuf débits de consommation en eau brute simulés



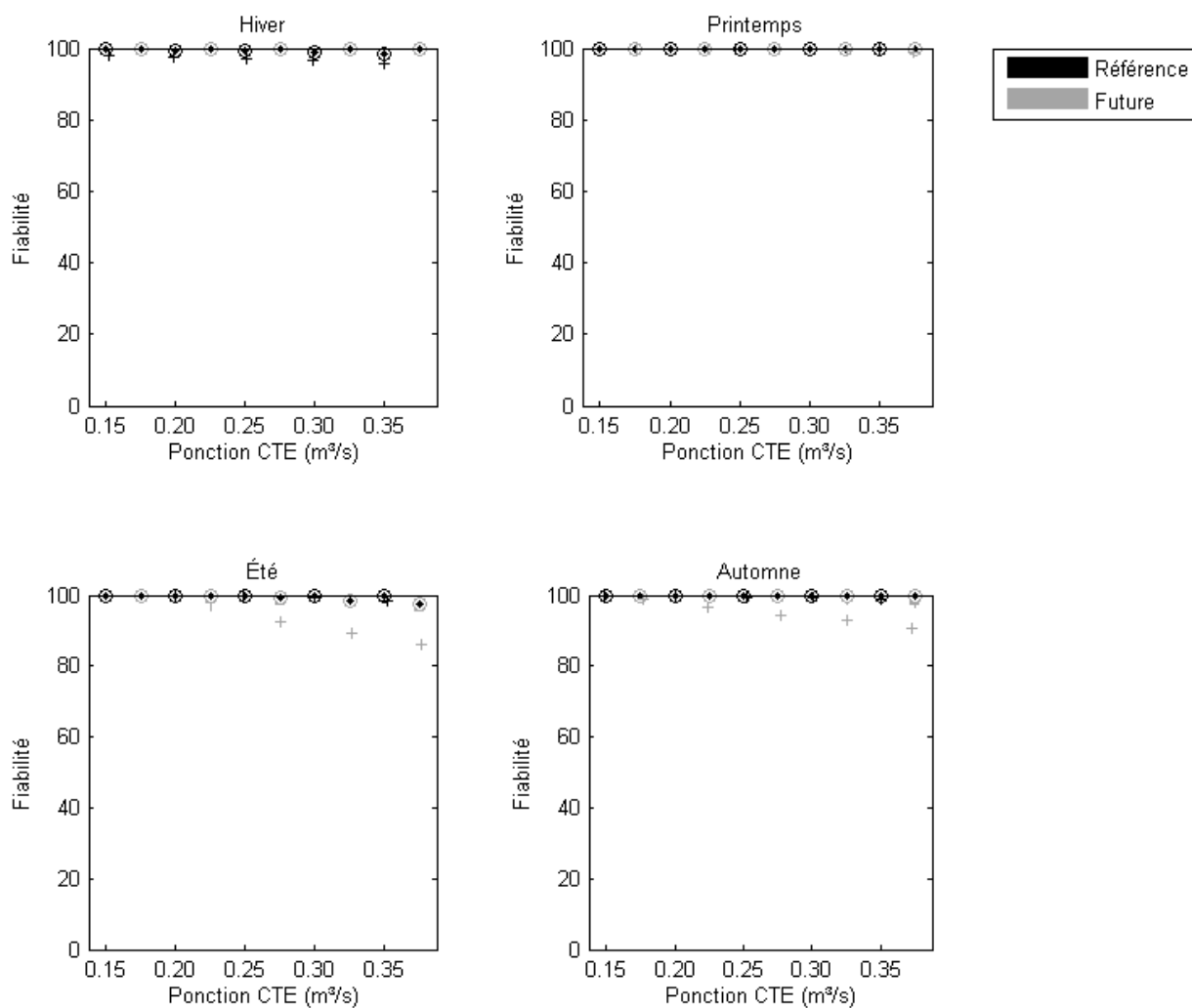
Ensuite, il est possible d'évaluer l'impact des changements climatiques sur les critères FVR à la prise d'eau. Les figures 5.33 et 5.34 présentent la fiabilité sur le débit minimal à la prise d'eau en période de référence et future pour les quatre saisons pour  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco3}$ . Pour la figure 5.33, la fiabilité augmente en période hivernale, mais diminue lors des autres saisons. Encore une fois, l'augmentation de la fiabilité en période hivernale est due à l'augmentation des débits en période hivernale. Au printemps, la réduction de la fiabilité peut être expliquée par la diminution de l'amplitude de la crue. Les débits moyens inférieurs et les étiages plus sévères diminuent la fiabilité en période estivale. À l'automne, la moyenne de la fiabilité diminue même si la médiane demeure la même. Cette observation peut être expliquée par le fait que l'incertitude des débits futurs de la figure 5.27 à l'automne s'étend sur des débits de moins grande amplitude. L'augmentation de la ponction en eau à la prise d'eau de Bromont a un plus grand impact en période estivale puisque le débit relatif de la prise d'eau par rapport au débit dans la rivière est plus grand.

Pour la figure 5.34, les fiabilités calculées sont très élevées comme au tableau 5.8 puisque les débits réservés  $Q_{eco3}$  sont moins contraignants. En période estivale, il est possible de noter une diminution de la fiabilité pour la période future due à la diminution des débits d'étiage. La diminution de la fiabilité due aux changements climatiques est moins prononcée à la figure 5.34 qu'à la figure 5.33. Ceci indique qu'en changements climatiques, les débits réservés écologiques de la méthode  $Q_{eco3}$  demeurent peu contraignants. Les figures pour la vulnérabilité et la résilience pour la contrainte de débit minimum sont présentées à l'annexe J.

---



**Figure 5.33 - Fiabilité saisonnière sur la contrainte de débit minimal à la CTE en période de référence (1971-2000) et en période future (2041-2070) pour  $Q_{eco1}$  et selon les neuf débits de consommation en eau brute simulés**

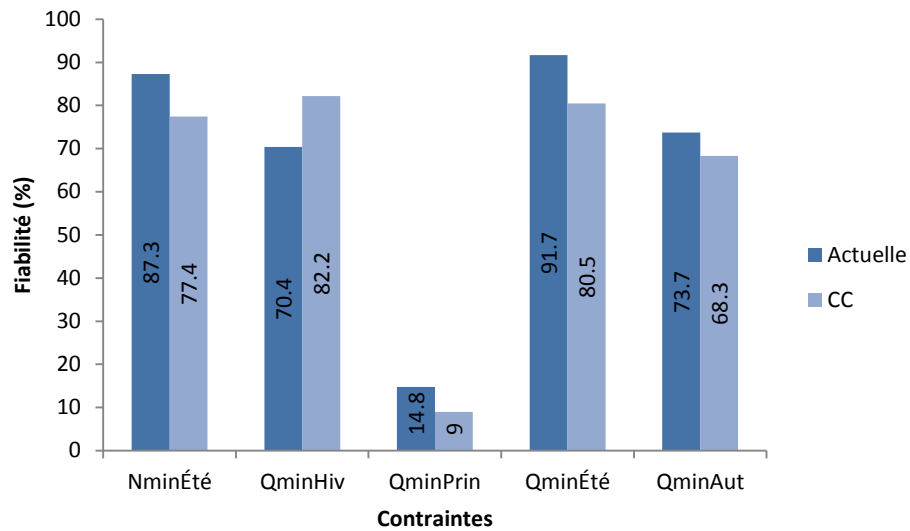


**Figure 5.34 - Fiabilité saisonnière sur la contrainte de débit minimal à la CTE en période de référence (1971-2000) et en période future (2041-2070) pour  $Q_{eco1}$  et selon les neuf débits de consommation en eau brute simulés**

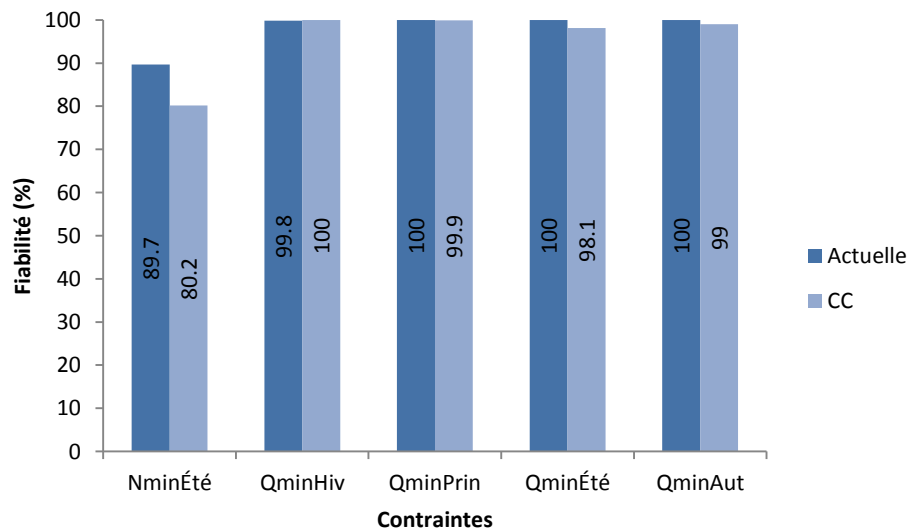
Le tableau 5.11 présente l'impact des changements climatiques sur la fiabilité pour la ponction  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ . Les résultats sont présentés sous forme de variation entre la moyenne de la période de référence et la moyenne de la période future. Les figures 5.35 et 5.36 présentent la fiabilité en période actuelle (tableau 5.8) ainsi que la fiabilité suivant l'impact des changements climatiques (tableau 5.11) pour la ponction  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$  pour les débits  $Q_{\text{eco1}}$  et  $Q_{\text{eco3}}$  respectivement. Ainsi, les valeurs « CC » des figures 5.35 et 5.36 sont obtenues en sommant les valeurs des tableaux 5.8 et 5.11.

**Tableau 5.11 - Variation de la fiabilité entre la période de référence (1971-2000) et la période future (2041-2070) sur le niveau minimal estival au lac Brome ainsi que sur le débit minimal saisonnier à la CTE pour le débit  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$  selon les débits réservés écologiques**

Méthode Qeco	Q <sub>eco1</sub> et Q <sub>eco3</sub> (%)				
	Nmin Lac Brome	Qmin CTE	Qmin CTE	Qmin CTE	Qmin CTE
	Été	Hiver	Printemps	Été	Automne
Qeco1	-9.9	+11.8	-5.8	-11.2	-5.4
Qeco3	-9.5	+0.7	-0.1	-1.9	-1.0



**Figure 5.35 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour Q<sub>eco1</sub> en période actuelle (1971-2000) et avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE**



**Figure 5.36 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour Q<sub>eco3</sub> en période actuelle (1971-2000) et avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE**

Pour les deux méthodes de débits réservés écologiques évaluées, une diminution de 9.9 % et de 9.5 % est observée l'été sur la contrainte de niveau minimum au lac Brome pour les débits  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco3}$  respectivement. Cette diminution peut également être observée aux figures 5.31 et 5.32. La diminution est légèrement plus élevée pour la méthode  $Q_{eco1}$  puisque la diminution de la fiabilité à la prise d'eau est plus marquée pour cette même méthode. Plus souvent la condition de l'équation 4.11 n'est pas respectée. Pour la méthode  $Q_{eco1}$ , la fiabilité diminue pour toutes les périodes pour la contrainte de débit minimum sauf en hiver où une augmentation marquée est observée. Pour la méthode  $Q_{eco3}$ , la fiabilité sur le débit minimum à la prise d'eau augmente de 0.7 % en hiver en période future. Pour cette méthode, la fiabilité est actuellement de 99.8 %. Avec l'augmentation de 0.7% avec l'impact des changements climatiques, une fiabilité de 100 % est donc attendue. La fiabilité actuelle en été et à l'automne pour  $Q_{eco3}$  est de 100 %. Avec les diminutions de 1.9 % et de 1.0 % pour ces périodes, la fiabilité de 100 % ne sera plus observée en période future. Ceci indique que pour la ponction à 0.25 m<sup>3</sup>/s le respect du débit réservé écologique n'est plus assuré à 100 % en période future. Il est à noter que pour le plus petit débit pompé à la CTE, la fiabilité n'est plus à 100 % pour la période future. Avec l'analyse de l'impact des changements climatiques, il est également possible d'affirmer que l'impact des changements climatiques sur la fiabilité à la prise d'eau est moindre par rapport à la sélection du débit réservé écologique. En effet, la différence entre la fiabilité à la prise d'eau à l'automne est de 26.3% entre  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco3}$ , selon le tableau 5.8, alors que l'impact des changements climatiques est respectivement de 5.4% et 1.0% selon le tableau 5.11.

---

## 5.8 Mesures d'adaptation proposées aux changements climatiques

Le détail des méthodes d'adaptation pour ce sous-chapitre est présenté au sous-chapitre 4.8. Pour chaque méthode d'adaptation, une figure du niveau moyen en période future sans méthode d'adaptation et du niveau moyen avec méthode d'adaptation est présentée. Pour chacune de ces figures, la méthode de débit réservé écologique  $Q_{eco1}$  est utilisée. La figure de la méthode  $Q_{eco3}$  n'est pas présentée puisqu'elle est très similaire pour les mêmes raisons qu'à la section précédente. Ensuite, la différence entre la fiabilité de la période future avec et sans méthode d'adaptation est présentée sous forme de tableau. La fiabilité est également présentée sous forme d'histogramme pour faciliter la compréhension par rapport à la période actuelle et à l'impact des changements climatiques. Pour chacune de ces figures, les résultats de fiabilité sont obtenus tel que pour les figures 5.35 et 5.36 en ajoutant la variation de fiabilité due à la méthode d'adaptation. Des résultats supplémentaires sont présentés à l'annexe K.

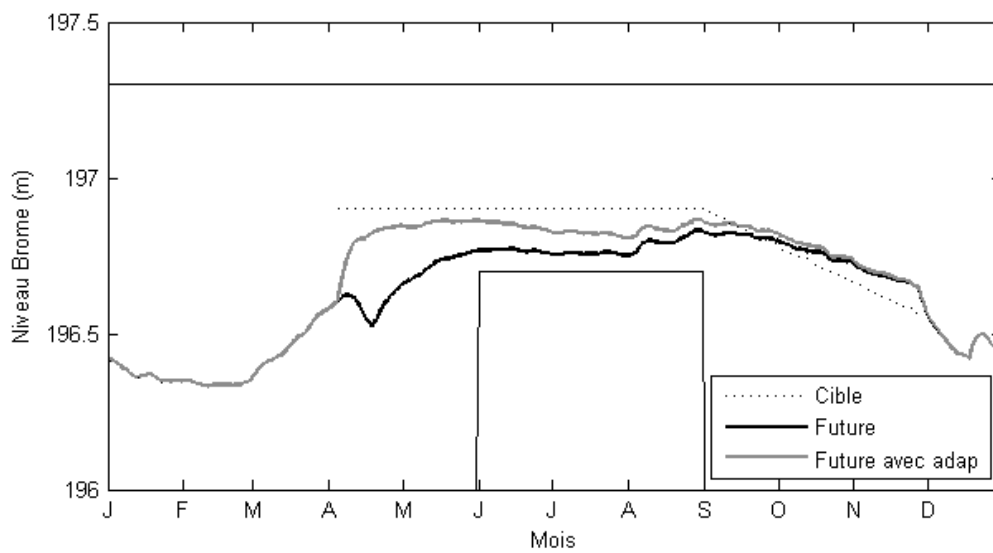
### 5.8.1 Devancement de la période de contrôle

La première méthode d'adaptation consiste à devancer la période de contrôle au barrage de deux semaines. Les résultats sont présentés aux figures figure 5.37 à 5.39 et au tableau 5.12. Le devancement de la période de contrôle a comme impact un relèvement des niveaux plus tôt dans la saison et un niveau moyen plus élevé en période estivale pour les deux méthodes de débits réservés écologiques.

La fiabilité sur le niveau minimal au lac Brome augmente de 8.4 % et 8.0% pour les méthodes  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco3}$  respectivement. Cette méthode annule presque l'impact des changements puisque la baisse de fiabilité est de 9.9% et 9.5% pour ces mêmes méthodes. Pour  $Q_{eco1}$ , une baisse de la fiabilité est observée en hiver puisque la période de contrôle débute maintenant en hiver, où le débit réservé écologique est de 3.71 m<sup>3</sup>/s. Comme l'augmentation de la

---

fiabilité due aux changements climatiques était de 11.8 %, la diminution de 2.0 % engendre quand même une augmentation totale de fiabilité par rapport à la période actuelle. Cette méthode d'adaptation ne suffit pas à retrouver la fiabilité observée en période actuelle pour l'été et l'automne pour les deux méthodes de débits réservés écologiques.



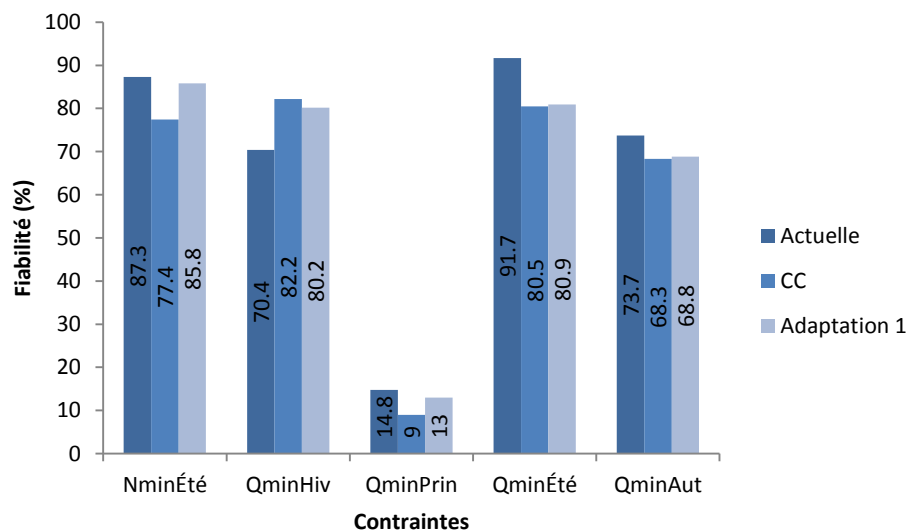
**Figure 5.37 - Comparaison entre les contraintes, le niveau cible, le niveau journalier moyen en période future (2041-2070) avec et sans la méthode d'adaptation 1 pour  $Q_{eco1}$**



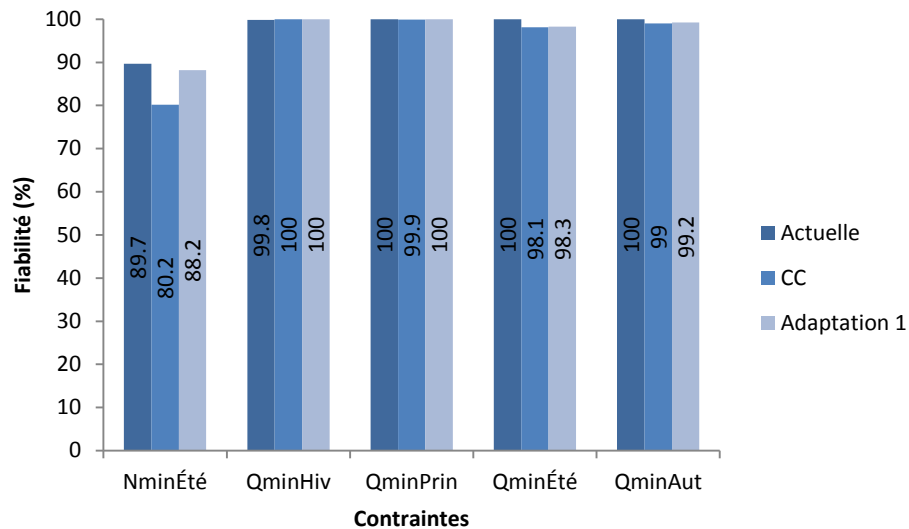
**Tableau 5.12 - Variation de la fiabilité de la période future (2041-2070) sans et avec la méthode d'adaptation 1 sur le niveau minimal estival au lac Brome ainsi que sur le débit minimal saisonnier à la CTE pour le débit 0.25 m<sup>3</sup>/s selon les débits réservés écologiques**

**Q<sub>eco1</sub> et Q<sub>eco3</sub> (%)**

Méthode Qeco	Nmin	Qmin	Qmin	Qmin	Qmin
	Lac Brome	CTE	CTE	CTE	CTE
	Été	Hiver	Printemps	Été	Automne
Qeco1	+8.4	-2.0	+4.0	+0.4	+0.5
Qeco3	+8.0	0.0	+0.1	+0.2	+0.2



**Figure 5.38 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour Q<sub>eco1</sub> en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode d'adaptation 1 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE**

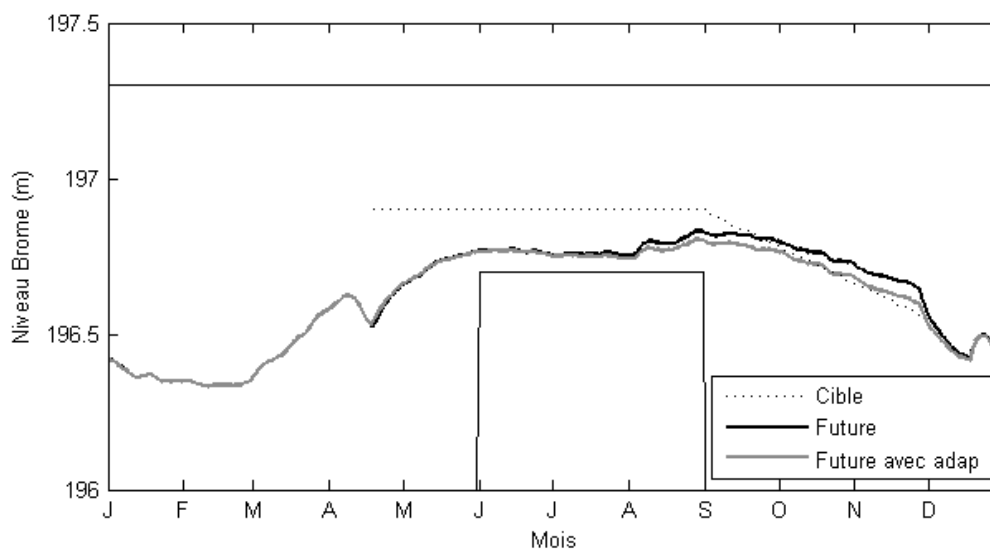


**Figure 5.39 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour Q<sub>ec03</sub> en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode d'adaptation 1 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE**

### 5.8.2 Gestion du barrage à chaque jour

Cette méthode d'adaptation consiste à effectuer la gestion du barrage à chaque jour au lieu d'effectuer la gestion aux trois jours. Elle produit les résultats de niveaux au lac Brome présentés à la figure 5.40 et les résultats de fiabilité présentés au tableau 5.13 ainsi qu'aux figures 5.41 et 5.42. Les résultats de niveaux peuvent sembler surprenants puisqu'avec la méthode d'adaptation, les niveaux du lac Brome sont plus bas. Lorsque le niveau est inférieur au niveau cible, le modèle prend la décision d'effectuer le soutirage minimum. Si le niveau du lac continue de s'abaisser lors des jours subséquents en raison d'un apport plus faible, le débit tombera en deçà des débits minimums lorsque la gestion est effectuée aux 3 jours. Ainsi, lorsque la gestion est effectuée au jour le jour, les débits ne tombent jamais en deçà

des minimums. C'est pourquoi il est possible d'observer un niveau moyen plus bas avec cette méthode d'adaptation. La gestion effectuée au jour le jour permet néanmoins de se rapprocher du niveau cible à l'automne.



**Figure 5.40 - Comparaison entre les contraintes, le niveau cible, le niveau journalier moyen en période future (2041-2070) avec et sans la méthode d'adaptation 2 pour  $Q_{eco1}$**

Tableau 5.13 - Variation de la fiabilité de la période future (2041-2070) sans et avec la méthode d'adaptation 2 sur le niveau minimal estival au lac Brome ainsi que sur le débit minimal saisonnier à la CTE pour le débit 0.25 m<sup>3</sup>/s selon les débits réservés écologiques Q<sub>eco1</sub> et Q<sub>eco3</sub> (%)

Méthode Qeco	Nmin	Qmin	Qmin	Qmin	Qmin
	Lac Brome	CTE	CTE	CTE	CTE
	Été	Hiver	Printemps	Été	Automne
Qeco1	+1.3	-0.1	-1.2	+2.7	-1.1
Qeco3	+1.1	0.0	0.0	+0.7	+0.3

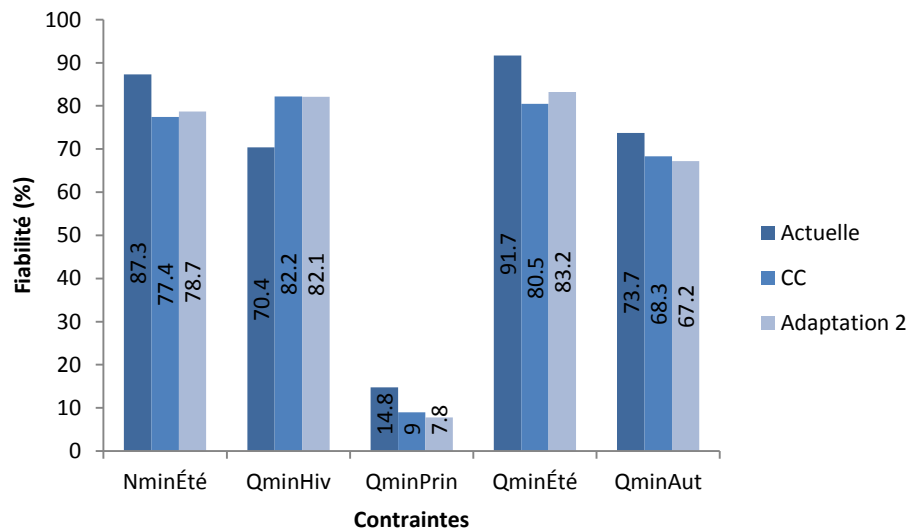
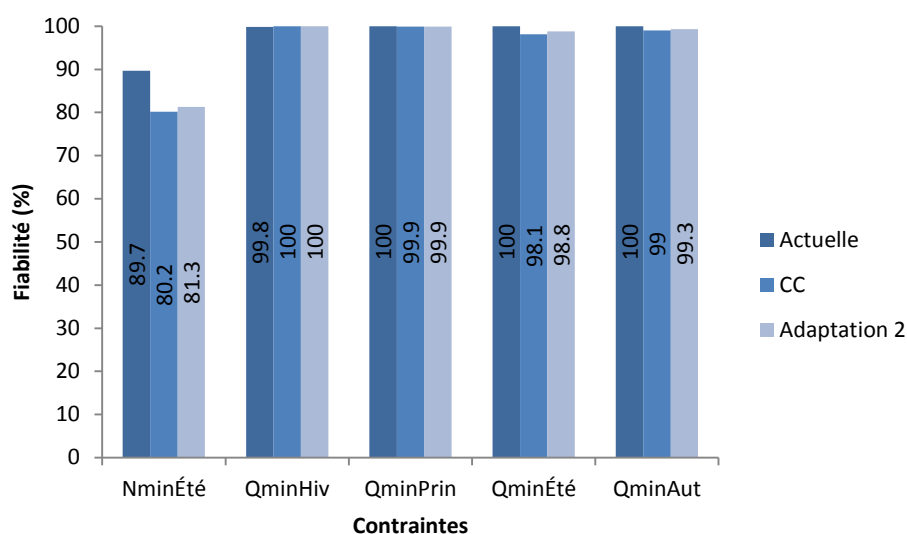


Figure 5.41 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour Q<sub>eco1</sub> en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode d'adaptation 2 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE



**Figure 5.42 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour Q<sub>eco3</sub> en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode d'adaptation 2 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE**

En aucun cas cette méthode d'adaptation ne permet de retrouver la fiabilité de la période actuelle. Il est intéressant de constater que même si le niveau moyen du lac est inférieur avec cette méthode d'adaptation, une augmentation de la fiabilité sur la contrainte de niveau minimum est observée. Pour comprendre cette observation, le nombre de jours en période estivale sans méthode d'adaptation et avec méthode d'adaptation pour les 7 scénarios où le débit est deçà de 0.88 m<sup>3</sup>/s est compté pour le débit prélevé de 0.15 m<sup>3</sup>/s. Le résultat est de 8 322 jours sans méthode d'adaptation et de 10 803 jours avec méthode d'adaptation. Les conditions dans le système hydrique sont remplies plus souvent pour que les débits puissent être abaissés selon la convention au barrage Foster en période future. Les journées supplémentaires où le débit est en deçà de 0.88 m<sup>3</sup>/s ont comme impact un remplissage plus rapide du lac en période de dépassement de contrainte. Ceci réduit le nombre de jours de

dépassements et augmente la fiabilité. Une augmentation de la fiabilité sur le débit minimum est observée en été et à l'automne pour la méthode  $Q_{eco3}$ . Le respect des débits minimums en tout temps a donc un impact sur la fiabilité à la prise d'eau de la CTE. La diminution de la fiabilité pour la méthode  $Q_{eco1}$  à l'hiver, au printemps et à l'automne est expliquée par le fait que, plus souvent, le débit est fixé au débit minimum lorsque le niveau est en deçà du niveau cible.

### 5.8.3 Devancement de la période de contrôle et gestion du barrage chaque jour

La combinaison des deux premières méthodes d'adaptation est testée. Les résultats sont présentés aux figures 5.43 à 5.45 et au tableau 5.14. Avec la méthode d'adaptation, le lac se remplit plus rapidement dû au devancement de la période de contrôle.

Il est possible d'observer que la méthode d'adaptation 3 n'est pas suffisante pour retrouver la fiabilité estivale et automnale observée en période de référence, ni pour la méthode  $Q_{eco1}$  et ni pour la méthode  $Q_{eco3}$ . Pour la méthode  $Q_{eco3}$ , un déficit de 0.9 % ( $-1.9 \% + 1.0 \% = -0.9 \%$ ) en été et de 0.5 % ( $-1.0 \% + 0.5 \% = -0.5 \%$ ) à l'automne est observable par rapport à la période de référence. Le calcul est effectué à partir de la baisse de la fiabilité observée au tableau 5.11.

---

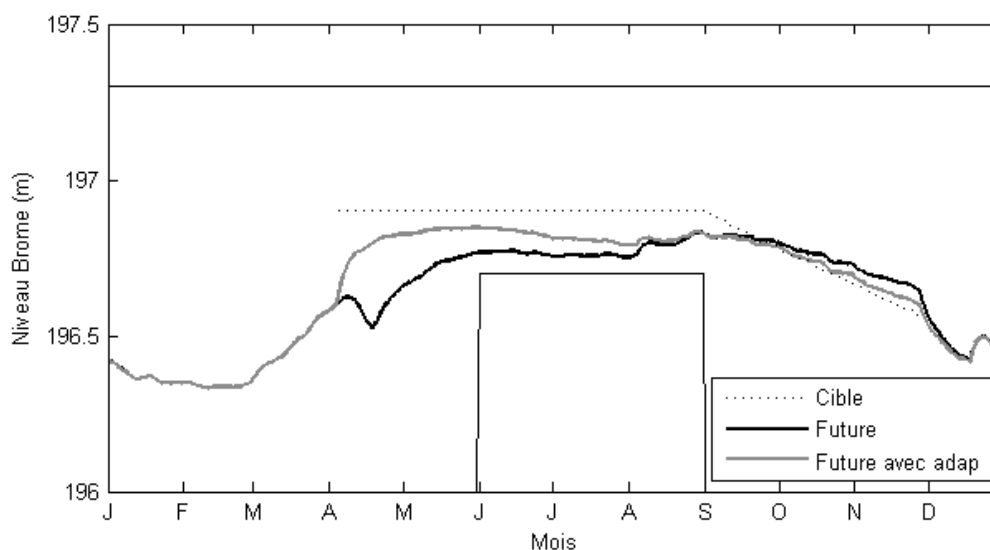
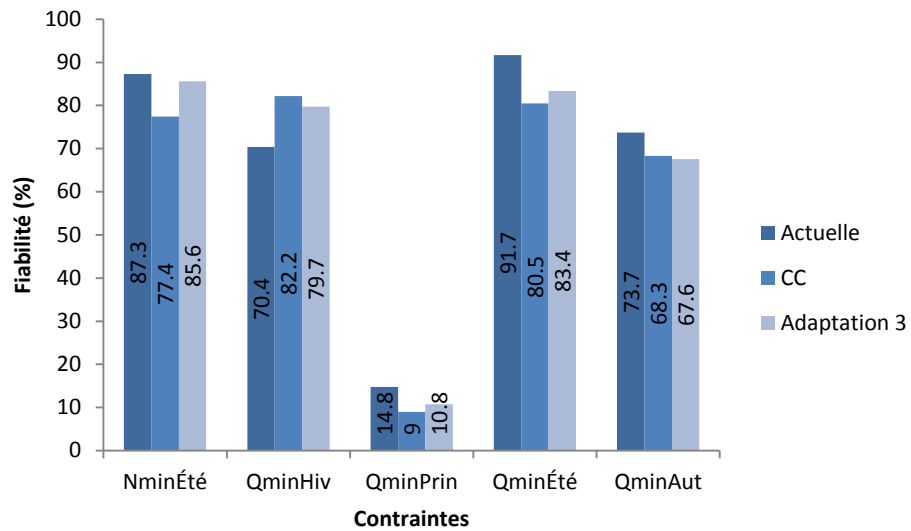


Figure 5.43 - Comparaison entre les contraintes, le niveau cible, le niveau journalier moyen en période future (2041-2070) avec et sans la méthode d'adaptation 3 pour  $Q_{eco1}$

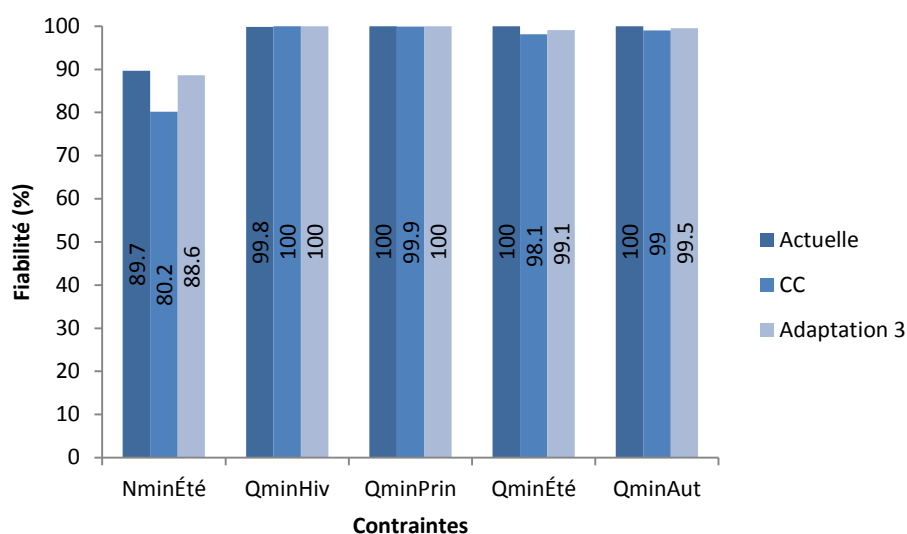
Tableau 5.14 - Variation de la fiabilité de la période future (2041-2070) sans et avec la méthode d'adaptation 3 sur le niveau minimal estival au lac Brome ainsi que sur le débit minimal saisonnier à la CTE pour le débit  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$  selon les débits réservés écologiques  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco3}$  (%)

Méthode Qeco	Nmin	Qmin	Qmin	Qmin	Qmin
	Lac Brome Été	CTE Hiver	CTE Printemps	CTE Été	CTE Automne
Qeco1	+8.2	-2.5	+1.8	+2.9	-0.7
Qeco3	+8.4	0.0	0.1	+1.0	+0.5



**Figure 5.44 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour Q<sub>eco1</sub> en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode d'adaptation 3 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE**





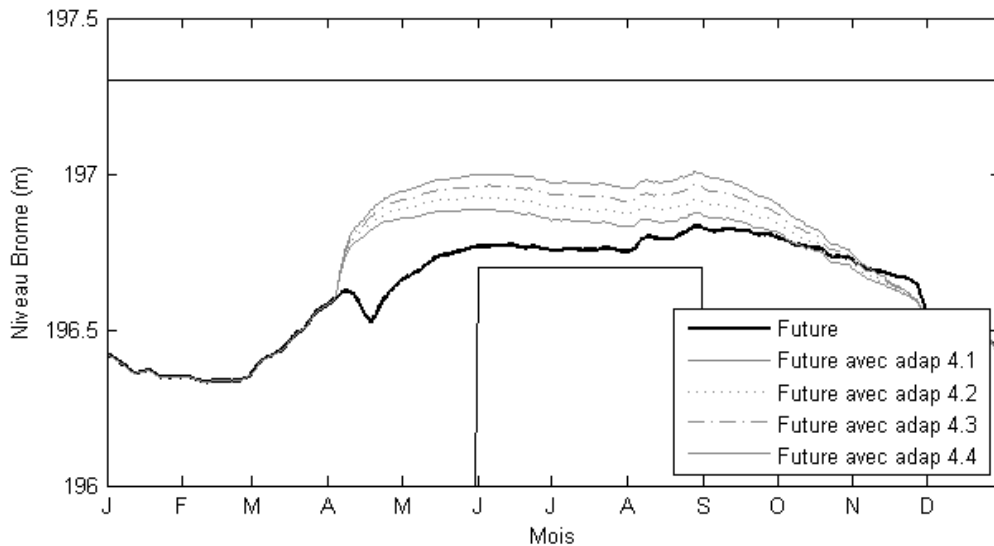
**Figure 5.45 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour Q<sub>eco3</sub> en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode d'adaptation 3 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE**

#### 5.8.4 Augmentation du niveau cible au lac Brome

Cette méthode d'adaptation inclut l'augmentation du niveau cible en période estivale à 196.95 m, 197.00 m, 197.05 m et 197.10, soit les méthodes d'adaptation 4.1, 4.2, 4.3 et 4.4. Elle inclut également les méthodes d'adaptation 1 et 2. La figure 5.46 présente les résultats de niveaux pour le lac Brome et le tableau 5.15 ainsi que les figures 5.47 et 5.48 présentent les résultats de fiabilité.

La figure 5.38 démontre qu'il serait possible de maintenir le niveau du lac Brome plus élevé en période estivale en augmentant le niveau cible. Cette mesure permet une réserve additionnelle pour la protection contre les périodes d'étiage sévères. Cependant, le maintien

des niveaux à une élévation supérieure fait en sorte que la réserve pour la protection contre les inondations est diminuée. Un système de prévision des crues pourrait être utilisé au lac Brome pour aider à résoudre ce problème.



**Figure 5.46 - Comparaison entre les contraintes, le niveau cible, le niveau journalier moyen en période future (2041-2070) avec et sans la méthode d'adaptation 4 pour  $Q_{eco1}$**

Avec une augmentation de 10 cm du niveau cible, cette méthode d'adaptation permet de retrouver la fiabilité de la période de référence pour le niveau minimal au lac Brome pour les deux méthodes de débit réservé écologique. Pour la méthode  $Q_{eco1}$ , la fiabilité de la période de référence sur le débit minimal au printemps, à l'été et à l'automne n'est toujours pas atteinte. Avec une augmentation de 10 cm du niveau cible, le manque à combler pour retrouver la fiabilité de la période de référence est de 0.9% et de 0.4% pour l'été et l'automne respectivement pour la méthode  $Q_{eco3}$ . Les résultats des méthodes d'adaptation 3 et 4 démontrent que le débit minimum de  $0.88 \text{ m}^3/\text{s}$  au barrage Foster n'est plus suffisant en

période de changements climatiques, même pour les débits réservés écologiques les moins contraignants.

**Tableau 5.15 - Variation de la fiabilité de la période future (2041-2070) sans et avec la méthode d'adaptation 4 sur le niveau minimal estival au lac Brome ainsi que sur le débit minimal saisonnier à la CTE pour le débit 0.25 m<sup>3</sup>/s selon les débits réservés écologiques**

**Q<sub>eco1</sub> et Q<sub>eco3</sub> (%)**

Méthode Qeco	Méthode d'adaptation	Nmin Lac Brome Été	Qmin CTE Hiver	Qmin CTE Printemps	Qmin CTE Été	Qmin CTE Automne
<b>Qeco1</b>	4.1	+9.9	-2.6	+1.6	+3.0	+0.8
	4.2	+10.3	-2.7	+1.4	+3.1	+2.1
	4.3	+10.5	-2.7	+1.2	+3.2	+3.3
	4.4	+10.5	-2.8	+1.0	+3.3	+4.8
<b>Qeco3</b>	4.1	+9.2	0.0	+0.1	+1.0	+0.5
	4.2	+9.5	0.0	+0.1	+1.0	+0.6
	4.3	+9.5	0.0	+0.1	+1.0	+0.6
	4.4	+9.6	0.0	+0.1	+1.0	+0.6

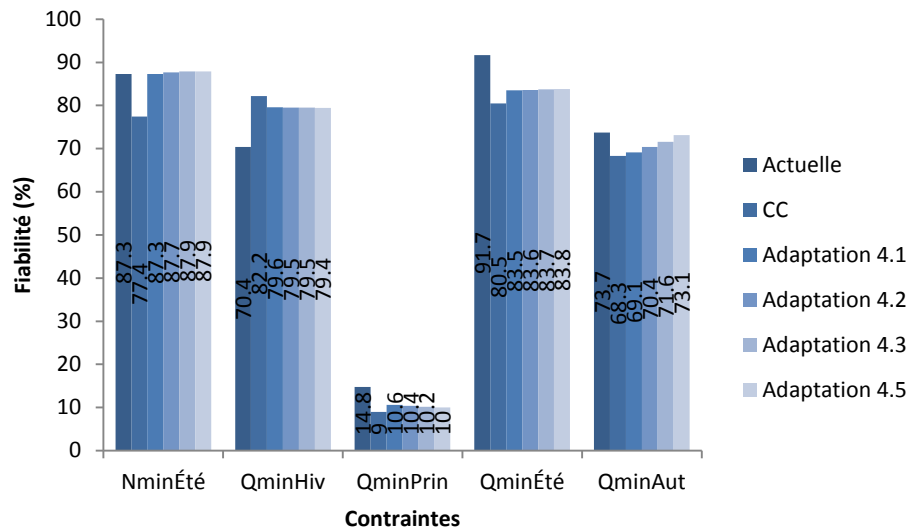
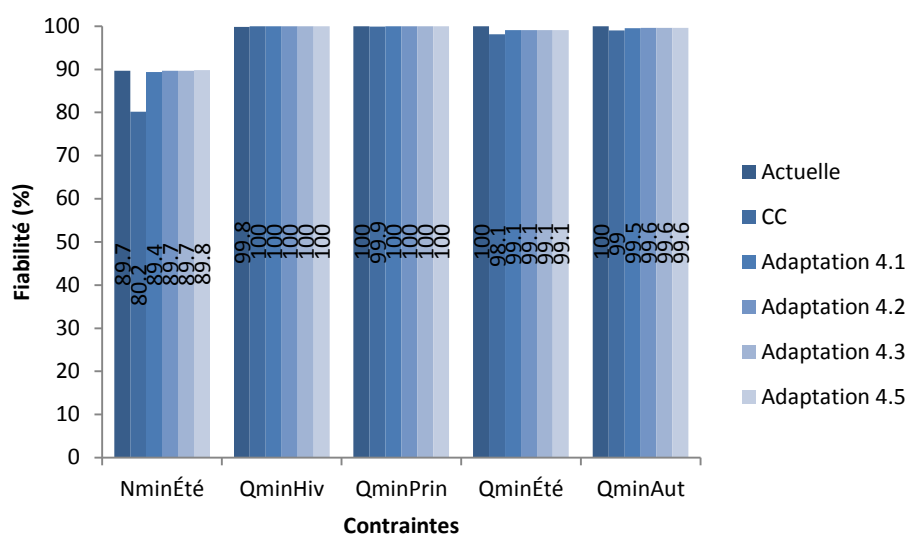


Figure 5.47 - Fiabilité pour la ponction  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$  pour  $Q_{\text{eco1}}$  en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode d'adaptation 4 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE

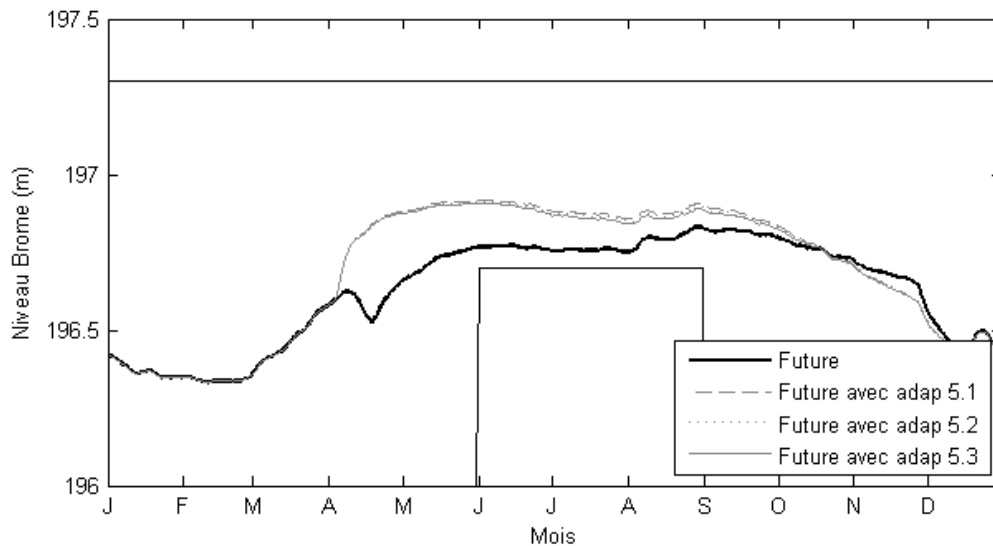


**Figure 5.48 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour Q<sub>eco3</sub> en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode d'adaptation 4 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE**

### 5.8.5 Augmentation du débit minimum de la convention

Pour cette méthode d'adaptation, toutes les mesures prises en considération antérieurement sont incluses. Elle vise à retrouver la fiabilité obtenue en période de référence. En effet, tel que mentionné précédemment, le débit de 0.88 m<sup>3</sup>/s ne suffit plus en période de changements climatiques pour respecter les débits réservés écologiques les moins contraignants avec un pompage de 0.25 m<sup>3</sup>/s. L'augmentation du niveau retenue est de 10 cm puisqu'elle est nécessaire pour retrouver la fiabilité de la période de référence. Trois débits minimums sont testés pour remplacer le débit de 0.88 m<sup>3</sup>/s, soit 0.95 m<sup>3</sup>/s, 1.00 m<sup>3</sup>/s et 1,05 m<sup>3</sup>/s. Les résultats sont présentés aux figures 5.49 à 5.51 et au tableau 5.16.

Il est possible de voir qu'avec l'augmentation du débit minimum, le niveau moyen ne descend pas aussi bas que lorsqu'aucune méthode d'adaptation n'est appliquée. L'augmentation du niveau cible estival aide particulièrement dans ce cas.



**Figure 5.49 - Comparaison entre les contraintes, le niveau cible, le niveau journalier moyen en période future (2041-2070) avec et sans la méthode d'adaptation 5 pour  $Q_{eco1}$**

Pour la méthode  $Q_{eco1}$ , la diminution de la fiabilité sur le niveau minimal au lac Brome se traduit par une augmentation de la fiabilité en période estivale. La fiabilité de la période actuelle sur le niveau minimal n'est plus atteinte, contrairement à la méthode d'adaptation 4. La fiabilité de la période actuelle est retrouvée uniquement pour le débit minimal en hiver.

**Tableau 5.16 - Variation de la fiabilité de la période future (2041-2070) sans et avec la méthode d'adaptation 5 sur le niveau minimal estival au lac Brome ainsi que sur le débit minimal saisonnier à la CTE pour le débit 0.25 m<sup>3</sup>/s selon les débits réservés écologiques**

**Q<sub>eco1</sub> et Q<sub>eco3</sub> (%)**

Méthode Qeco	Méthode d'adaptation	Nmin	Qmin	Qmin	Qmin	Qmin
		Lac Brome Été	CTE Hiver	CTE Printemps	CTE Été	CTE Automne
Qeco1	5.1	+9.7	-2.7	+1.3	+6.9	+2.0
	5.2	+9.0	-2.7	+1.3	+9.0	+1.9
	5.3	+8.4	-2.7	+1.3	+10.4	+1.7
Qeco3	5.1	+9.3	0.0	+0.1	+1.7	+1.0
	5.2	+9.2	0.0	+0.1	+1.7	+0.9
	5.3	+9.0	0.0	+0.1	+1.3	+0.8

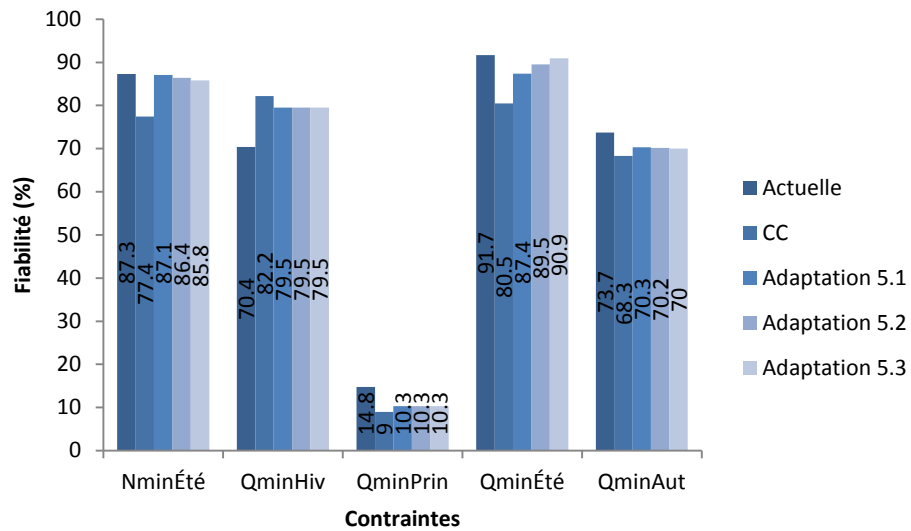
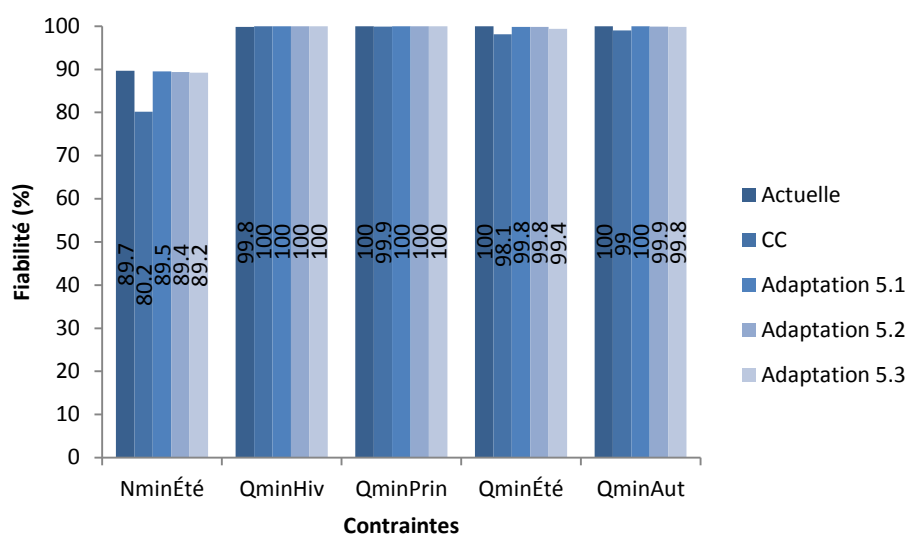


Figure 5.50 - Fiabilité pour la ponction  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$  pour  $Q_{\text{eco1}}$  en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode d'adaptation 5 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE





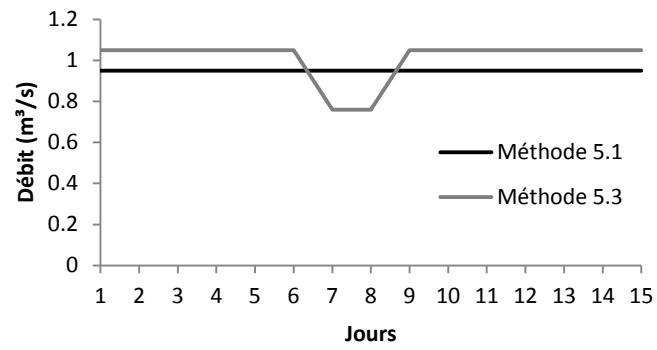
**Figure 5.51 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour Q<sub>eco3</sub> en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode d'adaptation 5 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE**

Pour ce qui est de la méthode Q<sub>eco3</sub>, l'augmentation de fiabilité de 9.3 % à 9.0 % du niveau minimal représente une baisse de 0.2 % à 0.5% par rapport à la méthode d'adaptation 4. La fiabilité de la période actuelle sur le niveau minimal n'est plus atteinte. Pour la fiabilité en été et à l'automne, une augmentation de 0.7 % et 0.5 % respectivement peut être observée pour une augmentation du débit minimal à 0.95 m<sup>3</sup>/s. Pour une augmentation du débit minimal supérieur, les fiabilités à l'été et à l'automne sont inférieures. Ce résultat peut sembler surprenant. Lorsque le débit minimal est augmenté, l'abaissement du niveau au lac Brome se fait plus rapidement en période d'étiage. Ceci fait en sorte que les conditions de niveaux de la figure 2.7 pour abaisser le débit minimal à 0.76 m<sup>3</sup>/s et à 0.60 m<sup>3</sup>/s au barrage Foster sont rencontrées plus souvent ou plus rapidement. La figure 5.52 présente des extraits de soutirages des simulations au barrage Foster pour mieux expliquer ce phénomène. À la

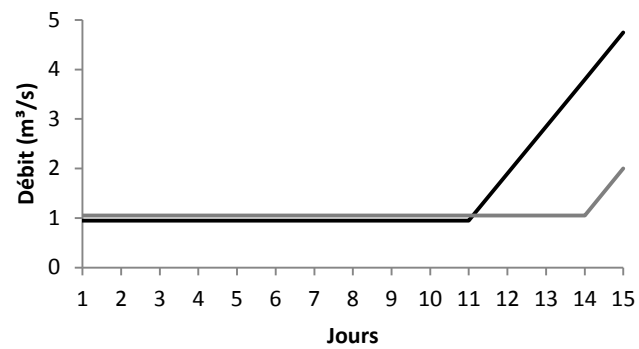
figure 5.52 a), les niveaux pour abaisser le débit à  $0.76 \text{ m}^3/\text{s}$  sont atteints aux jours 7 et 8 pour la méthode d'adaptation 5.3, mais pas pour la méthode d'adaptation 5.1. En d'autres mots, lors des jours 7 et 8, le niveau d'eau du lac était assez bas dans la simulation pour abaisser le débit à  $0,76 \text{ m}^3/\text{s}$  pour la méthode d'adaptation 5.3, mais le niveau d'eau était trop haut pour effectuer le même manœuvre pour la méthode 5.1. À la figure 5.52 b), le niveau pour soutirer plus que le débit minimal est atteint plus rapidement pour la méthode 5.1. Finalement, à la figure 5.52 c), le niveau pour abaisser le niveau à  $0.76 \text{ m}^3/\text{s}$  est atteint plus rapidement pour la méthode d'adaptation 5.3. Avec la figure 5.52, il est possible de comprendre que le débit au barrage Foster est abaissé plus souvent à  $0.76 \text{ m}^3/\text{s}$  avec les méthodes d'adaptation 5.2 et 5.3. Lorsque cet abaissement se produit en période d'étiage critique, il a un impact sur la fiabilité à la CTE. En somme, l'augmentation du débit à  $0.95 \text{ m}^3/\text{s}$  est une amélioration par rapport à la méthode d'adaptation 4, mais ne permet pas de retrouver la fiabilité de la période de référence. Une augmentation supérieure du débit minimal engendre une détérioration générale de fiabilité du système pour la méthode  $Q_{\text{eco}3}$ .

À la lumière de ces résultats, il est possible d'affirmer que les débits prévus et le fonctionnement de la convention actuelle entre la ville de Bromont et la ville de lac Brome ne sont pas adéquats en période future même lorsque la méthode de débit réservé écologique la moins contraignante est utilisée. En effet, les débits nécessaires au barrage Foster varient entre  $0.60 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $0.88 \text{ m}^3/\text{s}$  alors que le débit réservé écologique à cet endroit est de  $0.40 \text{ m}^3/\text{s}$ . En d'autres mots, des débits moyens de  $0.48 \text{ m}^3/\text{s}$  à  $0.20 \text{ m}^3/\text{s}$  sont perdus en période d'étiage sévère. Ils entraînent un abaissement trop rapide du lac. À d'autres moments, les débits minimums de la convention ne sont pas suffisamment élevés pour soutenir l'étiage en aval. Lorsque la méthode de débit réservé écologique  $Q_{\text{eco}1}$  est considérée, les débits de la convention ne sont pas suffisants au printemps pour soutenir le débit réservé écologique juste en aval du barrage Foster.

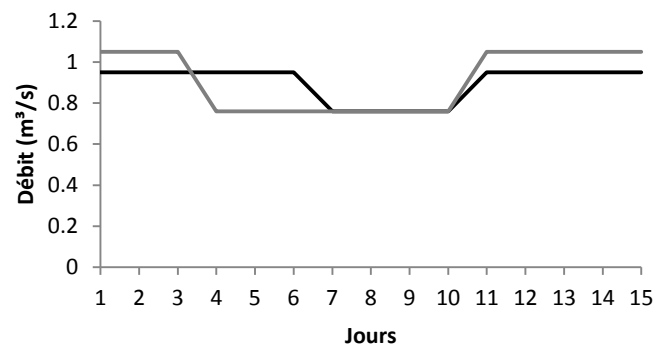
---



a)



b)

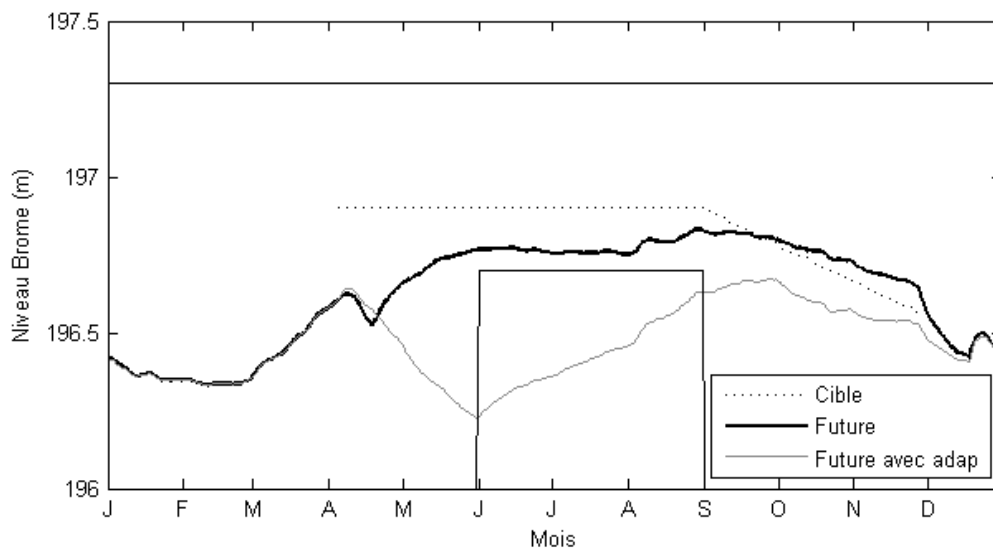


c)

Figure 5.52 - Comparaison d'extraits de soutirages au barrage Foster pour les méthodes d'adaptation 5.1 et 5.3

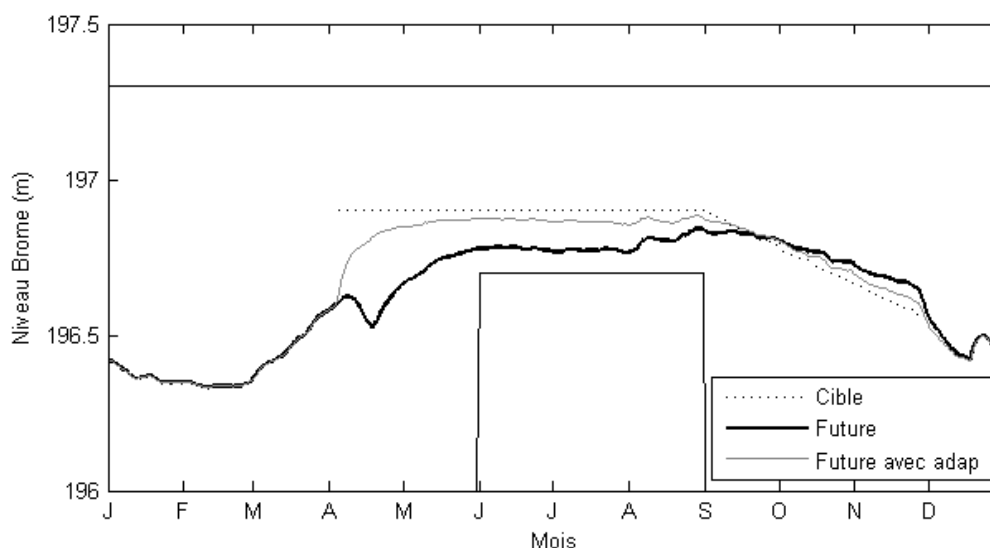
### 5.8.6 Règles de gestion modifiées

À la lumière des résultats obtenus à la méthode d'adaptation 5, des règles de gestion beaucoup plus flexibles au barrage Foster que ce qui est actuellement en vigueur sont proposées. Cette méthode d'adaptation utilise un système de prévision pour améliorer la gestion. Il est à noter que cette méthode d'adaptation devance la période de contrôle et effectue une gestion au jour le jour. Cependant, le niveau cible du lac Brome n'est pas augmenté. Le choix de ne pas augmenter le niveau est effectué parce que le gestionnaire au lac Brome a déjà de la difficulté à faire face aux périodes d'inondations. L'augmentation du niveau cible a comme impact une augmentation du risque d'inondation tel qu'il a été discuté précédemment. La méthode d'adaptation a été jugée plus réaliste de cette façon. Les résultats de niveaux au lac Brome sont présentés à la figure 5.53 pour la méthode  $Q_{eco1}$  et à la figure 5.54 pour la méthode  $Q_{eco3}$ . Les résultats de fiabilité sont présentés au tableau 5.17 ainsi qu'aux figures 5.55 et 5.56.



**Figure 5.53 - Comparaison entre les contraintes, le niveau cible, le niveau journalier moyen en période future (2041-2070) avec et sans la méthode d'adaptation 6 pour  $Q_{eco1}$**

En analysant les résultats pour la méthode  $Q_{eco1}$ , il est possible de constater une augmentation majeure de la fiabilité du débit minimal au détriment de la fiabilité sur le niveau minimal au lac Brome. En effet, ce nouveau processus de décision met l'accent sur le respect des débits réservés écologiques. Comme ceux-ci sont très contraignants pour la méthode  $Q_{eco1}$ , il s'en suit une vidange du lac Brome. Les fiabilités actuelles sont de 70.4 %, 14.8 %, 91.7 %, et 73.7% pour l'hiver, le printemps, l'été et l'automne respectivement. Lorsque l'impact des changements climatiques et l'impact de la méthode d'adaptation sont ajoutés, les pourcentages pour la fiabilité sur le débit minimal sont de 81.9 %, 29.2 %, 91.2% et 89.4% respectivement (exemple de calcul pour l'hiver :  $70.4 \% + 11.8 \% - 0.3 \% = 81.9 \%$ ). Les fiabilités ne sont toujours pas à 100 % puisqu'à certains moments, le niveau du lac est tellement bas qu'il ne peut pas fournir le débit réservé écologique demandé. Ainsi, il est possible de conclure que même lorsque l'accent est mis sur le respect des débits réservés écologiques dans la gestion du lac Brome, il est impossible de respecter les débits réservés écologiques de la méthode  $Q_{eco1}$ .

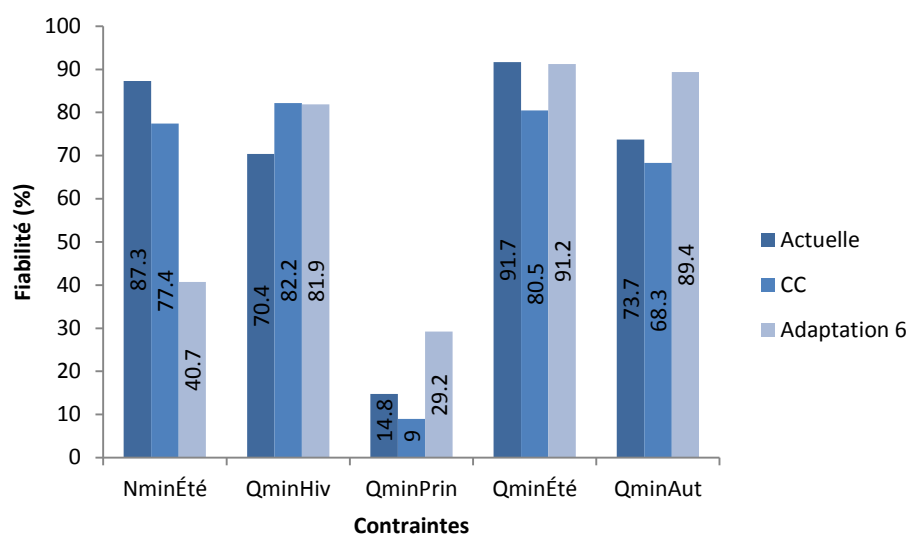


**Figure 5.54 - Comparaison entre les contraintes, le niveau cible, le niveau journalier moyen en période future (2041-2070) avec et sans la méthode d'adaptation 6 pour  $Q_{eco3}$**

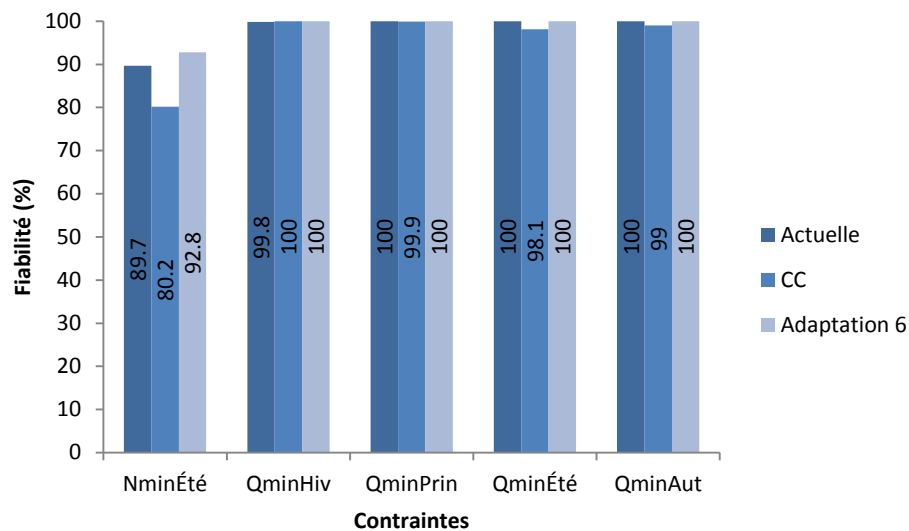
Pour ce qui est de la méthode de débit réservé écologique  $Q_{eco3}$ , la situation est totalement différente. Les nouvelles règles de gestion ont comme impact une augmentation de la fiabilité du niveau minimal au lac Brome ainsi qu'une augmentation de la fiabilité sur le débit minimal pour toutes les saisons. Cette méthode d'adaptation a comme impact de pallier à l'impact des changements climatiques. Pour la contrainte de niveau minimal, la fiabilité est augmentée de 3.1 % par rapport à la fiabilité actuelle. Ce résultat n'est pas surprenant, puisqu'à chaque fois que l'apport naturel entre le barrage Foster et la CTE est suffisamment élevé pour subvenir aux besoins en eau de la ville de Bromont, le débit réservé écologique de  $0.40 \text{ m}^3/\text{s}$  peut être soutiré. Ainsi, le lac Brome peut faire une réserve d'eau pour subvenir aux besoins de la ville de Bromont en période d'étiage sévère. À ce point, il est nécessaire de rappeler que cette méthode d'adaptation nécessite des essais avec un système de prévision réel puisque la prévision utilisée lors de cet essai est de type « parfaite ». Elle fournit donc des résultats optimistes quant à la fiabilité de la prise d'eau et du niveau minimal.

**Tableau 5.17 - Variation de la fiabilité de la période future (2041-2070) sans et avec la méthode d'adaptation 6 sur le niveau minimal estival au lac Brome ainsi que sur le débit minimal saisonnier à la CTE pour le débit  $0.25 \text{ m}^3/\text{s}$  selon les débits réservés écologiques  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco3}$  (%)**

Méthode Qeco	Nmin	Qmin	Qmin	Qmin	Qmin
	Lac Brome	CTE	CTE	CTE	CTE
	Été	Hiver	Printemps	Été	Automne
<b>Qeco1</b>	-36.7	-0.3	+20.2	+10.7	+21.1
<b>Qeco3</b>	12.6	+0.0	+0.7	+1.9	+1.1



**Figure 5.55 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour Q<sub>eco1</sub> en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode d'adaptation 6 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE**



**Figure 5.56 - Fiabilité pour la ponction 0.25 m<sup>3</sup>/s pour Q<sub>eco3</sub> en période actuelle (1971-2000), avec l'impact des changements climatiques (2041-2070) et avec l'impact de la méthode d'adaptation 6 (2041-2070) pour la contrainte de niveau minimal estival au lac Brome et pour les contraintes de débit minimum saisonnières à la CTE**

Néanmoins, il est maintenant possible de statuer sur le débit prélevable à la prise d'eau de la CTE. Les fiabilités actuelles sont compilées avec l'impact des changements climatiques et avec l'impact de la méthode d'adaptation 6. Les résultats sont présentés au tableau 5.18 pour toute la plage de débits testés. Il est possible de voir qu'à une ponction de 0.275 m<sup>3</sup>/s, la fiabilité n'est pas à 100% pour toutes les saisons. Ainsi, il est possible de conclure qu'avec les paramètres considérés dans ce travail et en considérant le débit réservé écologique Q<sub>eco3</sub>, le débit pouvant être prélevé à la CTE de la ville de Bromont correspond au certificat d'autorisation. Aussi, il est nécessaire de souligner que ce résultat est assujéti à l'incertitude découlant du nombre de projections climatiques utilisées. En effet, les sept projections climatiques utilisées ne permettent pas d'effectuer le véritable portrait de l'incertitude

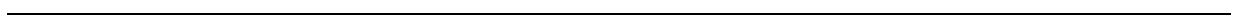


globale sur les apports calculés. Pour produire un résultat plus robuste, il serait nécessaire de prendre plus de projections climatiques et ce sur plusieurs horizons.

Il est à noter que cette méthode d'adaptation démontre que le débit prélevable à Bromont est extrêmement dépendant de la gestion au barrage Foster. Tel qu'il a été discuté au sous-chapitre 3.3, des algorithmes de gestion plus avancés que ceux utilisés dans ce travail couplé à un système de prévision permettraient peut-être de prouver qu'un débit prélevable supérieur est possible à la prise d'eau. Il est nécessaire de rappeler ici que la fiabilité due au système de prévision serait diminuée parce qu'un système de prévision parfait a été utilisé dans ce travail.

**Tableau 5.18 - Fiabilité pour les 9 débits de consommation en brute simulés en période future (2041-2070) considérant l'impact des changements climatiques et l'impact de la méthode d'adaptation 6 (%)**

Débit pompé	Nmin	Qmin	Qmin	Qmin	Qmin
	Lac Brome	CTE	CTE	CTE	CTE
	Été	Hiver	Printemps	Été	Automne
<b>0.150</b>	93.4	100.0	100.0	100.0	100.0
<b>0.175</b>	93.4	100.0	100.0	100.0	100.0
<b>0.200</b>	93.2	100.0	100.0	100.0	100.0
<b>0.225</b>	93.0	100.0	100.0	100.0	100.0
<b>0.250</b>	93.0	100.0	100.0	100.0	100.0
<b>0.275</b>	92.7	100.0	99.9	100.0	100.0
<b>0.300</b>	92.6	100.0	99.8	99.9	100.0
<b>0.325</b>	92.4	100.0	99.8	99.7	100.0
<b>0.350</b>	92.2	100.0	99.8	99.5	100.0



## CHAPITRE 6 CONCLUSION

À la suite des recherches effectuées, le débit prélevable actuellement a été déterminé selon quatre méthodes de débits réservés écologiques. Il a été démontré que le prélèvement correspondant au certificat d'autorisation de la ville peut être effectué en respectant le débit réservé écologique uniquement avec la méthode française ( $Q_{eco3}$ ) et ce, en excluant la période hivernale. Le débit prélevable selon la méthodologie utilisée à ce stade du projet est plus petit que la plage de valeurs testées.

Les impacts des changements climatiques ont été quantifiés pour les températures et les précipitations, pour les débits en rivière et pour la gestion du système hydrique. Une diminution de fiabilité sur la contrainte de débit minimum à la CTE est observée pour le printemps, l'été et l'automne pour les deux méthodes de débits réservés écologiques étudiées. Une augmentation de la fiabilité est observée en hiver. Le respect des débits réservés écologiques calculés selon la méthode française ( $Q_{eco3}$ ) ne peut pas être assuré jusqu'au débit correspondant au certificat d'autorisation de la ville en période future. Une diminution de la fiabilité sur la contrainte de niveau minimal au lac Brome est observée en période estivale pour les deux méthodes de débits réservés écologiques. À la suite de l'analyse de l'impact des changements climatiques, il est possible de conclure que les résultats de l'étude varient plus en fonction du débit réservé écologique utilisé qu'en fonction des changements climatiques anticipés. Cette conclusion est directement reliée aux choix des méthodes de débit réservé écologique.

Plusieurs méthodes d'adaptation sont testées pour amoindrir et/ou neutraliser l'impact des changements climatiques. Parmi celles-ci, la méthode d'adaptation 5 propose de devancer la période de contrôle, d'effectuer la gestion au jour le jour et d'augmenter le débit minimum au barrage Foster ainsi que d'augmenter le niveau cible du lac Brome. La série de modifications effectuées permet de conclure que la convention actuelle entre le lac Brome et Bromont n'est pas adéquate pour effectuer la gestion du barrage Foster en période future. La

méthode d'adaptation 6 propose un nouveau mode de gestion incluant un système de prévision, le devancement de la période de contrôle, la gestion au jour le jour et des débits minimums correspondant aux débits réservés écologiques. Cette méthode d'adaptation démontre qu'il est physiquement impossible de respecter les débits réservés écologiques de la méthode échohydrologique ( $Q_{eco1}$ ) au barrage Foster. Avec cette méthode d'adaptation et pour la méthode française ( $Q_{eco3}$ ), il a été démontré que le débit prélevable à la CTE est équivalent au certificat d'autorisation de la ville. La méthode d'adaptation 6 a l'avantage d'être autant bénéfique pour la ville de Bromont que pour la municipalité de lac Brome. Cette méthode d'adaptation démontre également que le débit prélevable est hautement dépendant de la gestion effectuée au barrage Foster.

La gestion des réservoirs d'eau a fait l'objet de recherches au cours des dernières années. Un modèle d'optimisation de la gestion des barrages couplé à un système de prévision pourrait permettre d'effectuer une gestion plus efficace du lac Brome et peut-être permettre un débit prélevable supérieur. D'autres améliorations pourraient être apportées au projet réalisé. La modélisation stochastique du prélèvement en eau pourrait permettre une représentation plus juste du signal réel, ce qui peut avoir comme impact une augmentation de la fiabilité à la CTE. Ces deux ajouts au projet pourraient peut-être permettre de démontrer qu'il est possible de prélever un débit supérieur à Bromont. Une analyse d'impact de la modification de l'occupation du sol au cours des années futures serait également d'intérêt. Elle permettrait notamment de quantifier l'impact sur les périodes d'étiage. Une meilleure quantification de l'incertitude causée par les projections climatiques en utilisant plus de projections et ce sur plusieurs horizons de temps permettraient de produire des résultats plus robustes.

Les efforts de recherche effectués ont permis de développer une méthodologie pour déterminer le débit ultime prélevable dans un cours d'eau. Celle-ci considère les ouvrages hydrauliques en amont du point d'intérêt et le soutien à l'étiage pouvant être effectué. La

---

méthodologie proposée a l'avantage de considérer la vulnérabilité du milieu récepteur. Avec les critères de performance et l'utilisation du modèle de simulation, il est possible de s'assurer que le prélèvement en eau brute n'entre jamais en conflit avec le débit réservé écologique pour toute la période à l'étude. Cependant, la méthodologie développée a le désavantage d'être longue et ardue à mettre en place. Le modélisateur doit avoir une bonne connaissance de la gestion hydrique effectuée sur le bassin versant. Un modèle hydrologique et un modèle de simulation doivent également être mis en œuvre pour les besoins d'une telle étude. Dans un autre ordre d'idées, une telle étude devrait être rafraîchie après quelques années. Ce rafraîchissement permettrait de prendre en considération les améliorations dans les modèles climatiques et les nouvelles données disponibles sur le bassin versant. Ce rafraîchissement pourrait éventuellement permettre de mesurer l'impact d'une industrie consommatrice d'eau et de proposer des débits maximums pour cette dernière.

L'article 33 de la *Loi affirmant le caractère collectif des ressources en eau et visant à renforcer leur protection* adoptée le 11 juin 2009 stipule que tous les certificats d'autorisation n'ont plus une durée illimitée, même les certificats émis par le passé. À partir de la date d'entrée en vigueur de la loi, ils sont valides pour une période de 10 ans. Dans cet ordre d'idée, il serait intéressant de savoir si le débit de la méthode française permet réellement de protéger les espèces ichtyologiques de la rivière Yamaska. Ceci peut être effectué en utilisant une méthode d'habitats préférentiels. Celles-ci permettent, contrairement aux méthodes de débits réservés écologique hydrologiques et hydrauliques, d'établir une relation entre le nombre d'habitats et le débit de la rivière en fonction d'une espèce ichtyologique donnée. La plus connue de ces méthodes est la *Instream Flow Incremental Methodology (IFIM)* [Belzile et al., 1997]. Cette caractérisation du milieu permettrait en même temps de savoir si davantage d'efforts doivent être mis dans la recherche du débit prélevable ultime. Il est nécessaire de savoir si le débit prescrit la méthode française permet réellement de protéger le milieu naturel puisqu'il est le seul pour lequel le débit du certificat d'autorisation s'est avéré

---

prélevable. Advenant le cas où le débit de la méthode française est suffisant, il sera nécessaire de collaborer avec la municipalité de lac Brome pour améliorer la gestion au barrage Foster. Il sera ensuite possible de peaufiner les outils développés dans le travail et d'inclure les nouvelles données sur le bassin versant ainsi que les améliorations des modèles de changements climatiques pour démontrer que le débit prélevable est supérieur au certificat d'autorisation de la ville.

---

## ANNEXE A Impact de la présence du lac Brome sur le régime d'écoulement de la rivière Yamaska centre

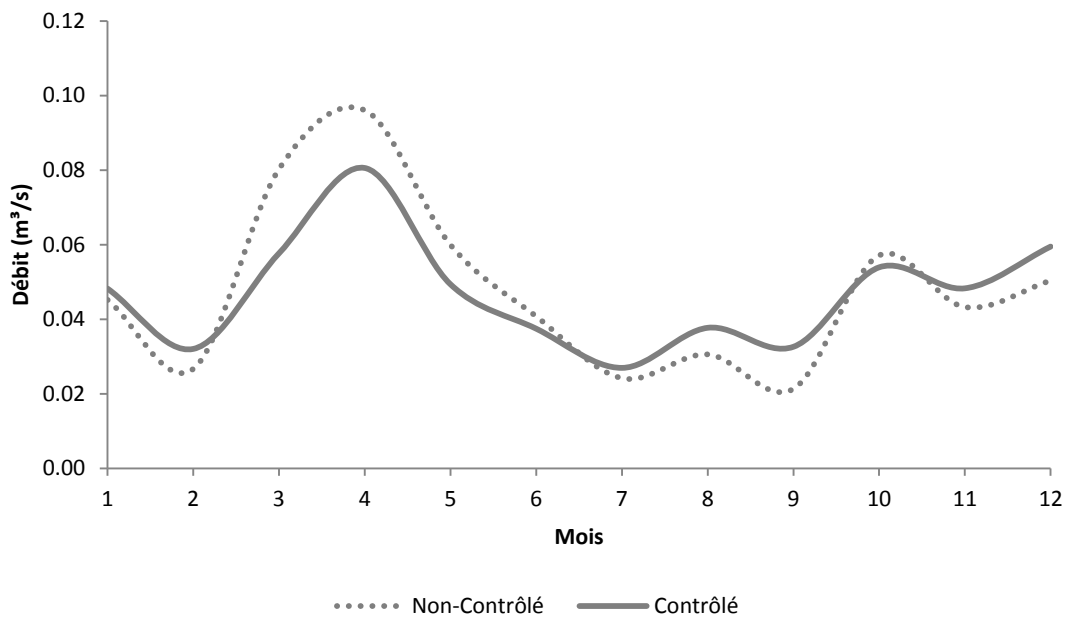
Cette annexe présente une brève analyse d'impact de la présence du lac Brome sur le régime d'écoulement de la rivière Yamaska centre.

Dans un premier temps, les débits moyens mensuels de la station 030351 sont calculés sur les années 2006 à 2012. Ces données font état du régime d'écoulement contrôlé au barrage Foster.

Dans un deuxième temps, la transposition des débits en rivière à partir de la station 030314 est effectuée pour obtenir le régime hydraulique non contrôlé théorique au barrage Foster. La transposition de données, présentée au sous-chapitre 3.4, est une méthode couramment utilisée pour connaître les débits sur les rivières non jaugées. La transposition entre les deux bassins versants a déjà été utilisée dans l'étude de Besré [2010] et les hypothèses y sont décrites. La prise d'eau de la ville de Cowansville est située à l'amont de la station de mesure. Les données à la station de mesure sont donc sous-estimées et ceci peut avoir un impact majeur dans le calcul des faibles débits. Le débit prélevé à Cowansville a été estimé par une série de Fourier présentée à l'annexe B. Les débits ainsi estimés sont ajoutés à la série de données de la station 030314 avant d'effectuer la transposition. Les débits mensuels moyens de cette série de données sont également calculés sur les années 2006 à 2012 et sont présentés à la figure A.1.

Les débits moyens observés en période de crue printanière sont en moyenne plus faibles de 26% que leurs contreparties calculées par transposition. Cette observation est conséquente avec l'opération de remplissage du lac lors de cette période. En période estivale, soit pour les mois de juin à septembre, les débits moyens observés sont quant à eux plus élevés de 13%.

Le débit minimal avec la convention est de  $0.88 \text{ m}^3/\text{s}$ , ce qui représente un débit supérieur au débit médian de juillet et août. Comme les faibles débits de la transposition sont remplacés par un débit de  $0.88 \text{ m}^3/\text{s}$ , il est normal d'observer une augmentation du débit moyen en période estivale. Les résultats précédents permettent d'observer le soutien à l'étiage déjà effectué par le lac.



**Figure A.1 - Débit en régime contrôlé et non contrôlé au lac Brome**



## ANNEXE B Ponction en eau de la ville de Cowansville

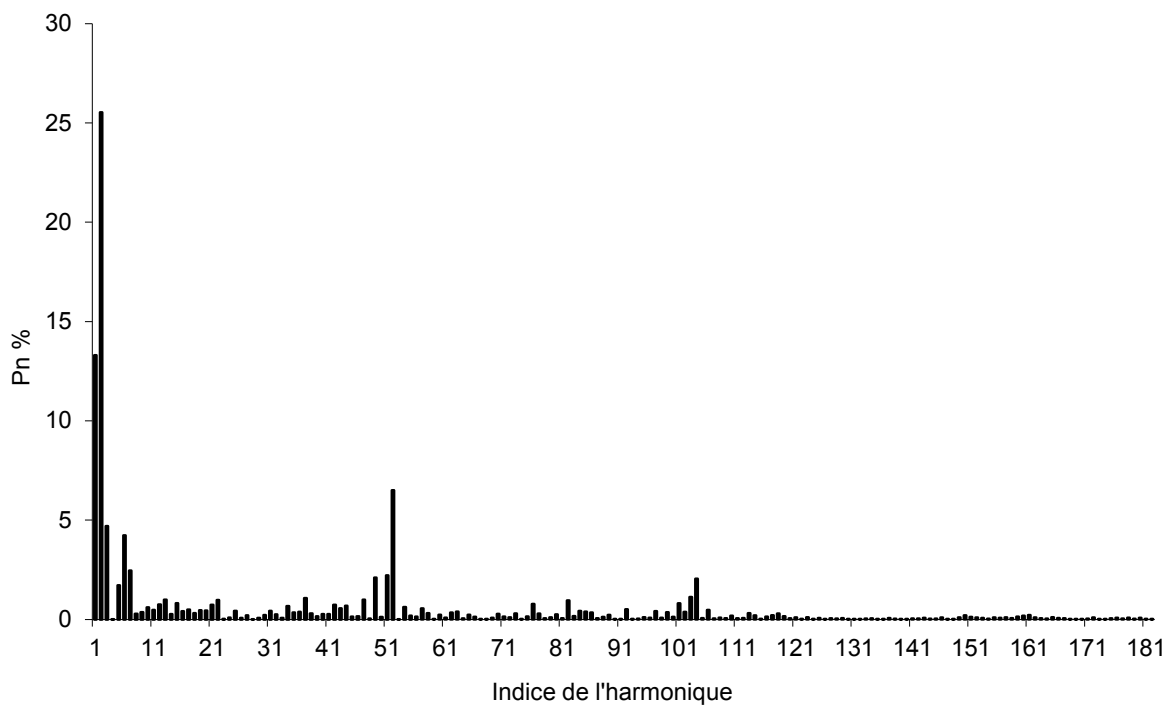
Le signal de l'eau pompée à la prise d'eau de la ville de Cowansville est modélisé avec une série de Fourier tel que proposé par Paquin [2000] . La série de Fourier retenue est présentée à l'équation B.1.

$$x_j = a_0 + \sum_{n=1}^{N/2} U_n \cos\left(\frac{2\pi n}{N} (j - 1) - \phi_n\right) \quad (\text{B.1})$$

Où :

$x_j$	Reconstitution pour le jour j
$a_0$	Moyenne de la série
$N$	Nombre de valeurs de la série
$U_n$	Amplitude du cosinus
$j$	Jour julien
$\phi_n$	Déphasage du cosinus

En soumettant l'année de données 2008 à l'analyse de Fourier, le spectre de variance présenté à la figure B.1 est obtenu. Les composantes harmoniques  $n = 1, 2, 3, 52$  et  $104$  sont retenues pour reconstituer le signal; elles expliquent 52% de ce dernier. Le tableau B.1 présente les coefficients à utiliser dans l'équation B.1 pour reconstituer le signal. La moyenne ( $a_0$ ) est de 93.09 et le nombre de valeurs utilisées ( $N$ ) est de 364. La figure B.2 présente les données observées et le résultat de la reconstitution.



**Figure B.1 - Spectre de variance**

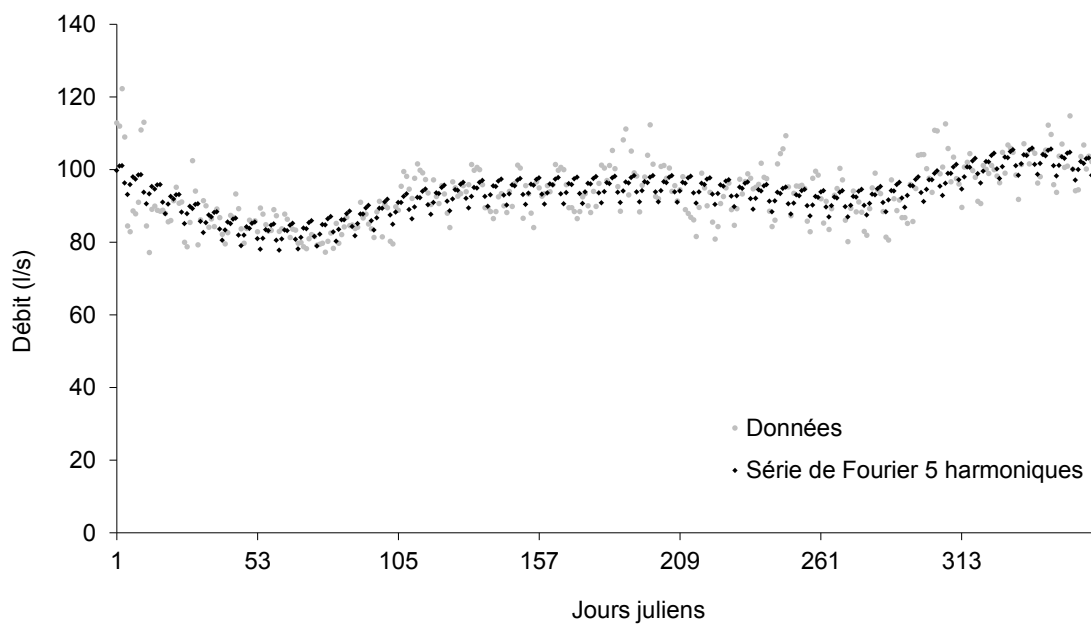


Figure B.2 - Ponction en eau de l'année 2008 et reconstitution par la série de Fourier avec 5 harmoniques

Tableau B.1 - Valeurs des coefficients de la série de Fourier

n	Harmoniques				
	1	2	3	52	104
Un	4.20	5.81	2.50	2.94	-1.64
$\phi_n$	-1.54	-0.83	-0.83	0.65	0.49



## ANNEXE C Correction de biais des données climatiques

Les figures suivantes présentent le résultat de la correction de biais effectuée sur les données des sept projections climatiques du projet. La localisation des stations est présentée à la figure 2.3. Pour chaque station, les moyennes mensuelles des données de températures et de précipitations sont présentées. La ligne grise représente la donnée observée provenant du krigeage du CEHQ et, la boîte noire présente l'étendue des sept projections climatiques en période de référence.

Figure C.1 - Données observées du krigeage vs données des projections climatiques de la station 725451

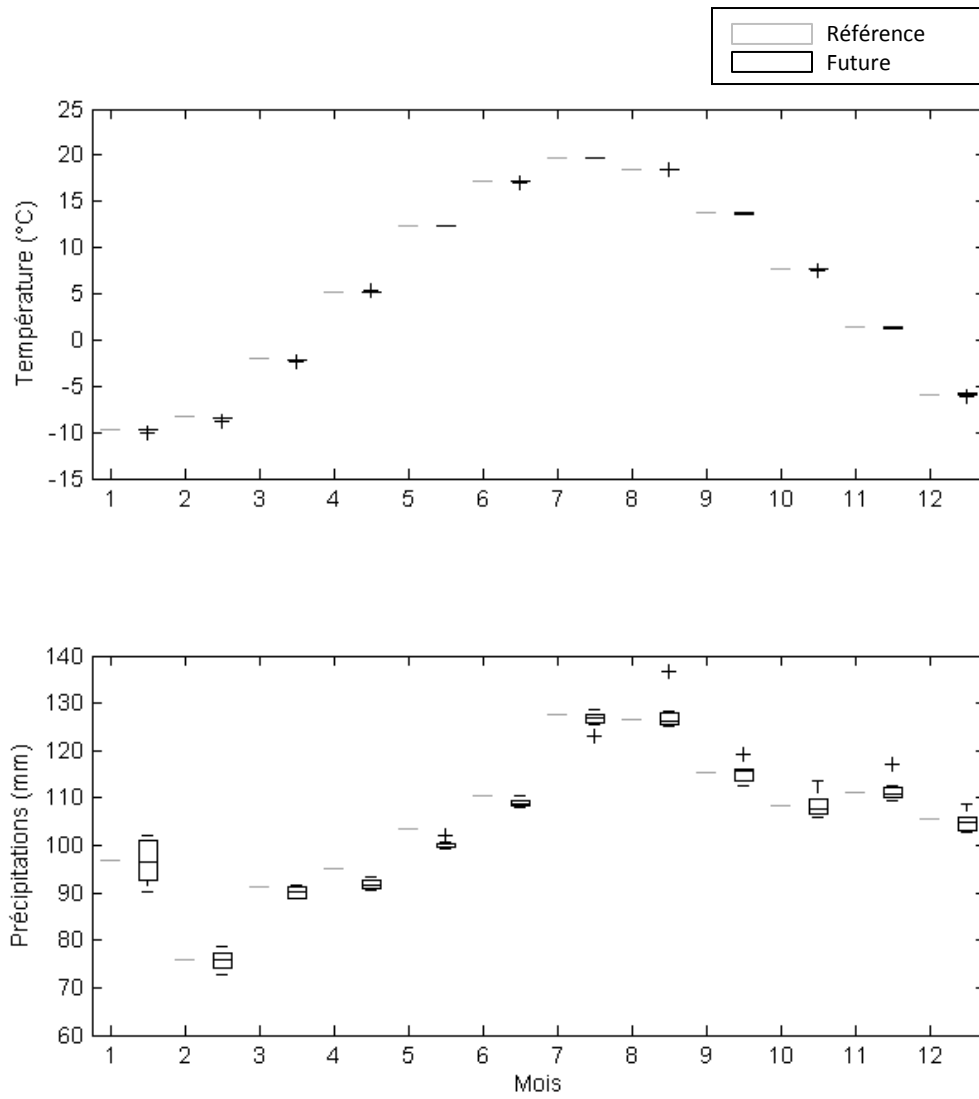


Figure C.2 - Données observées du krigeage vs données des projections climatiques de la station 725453

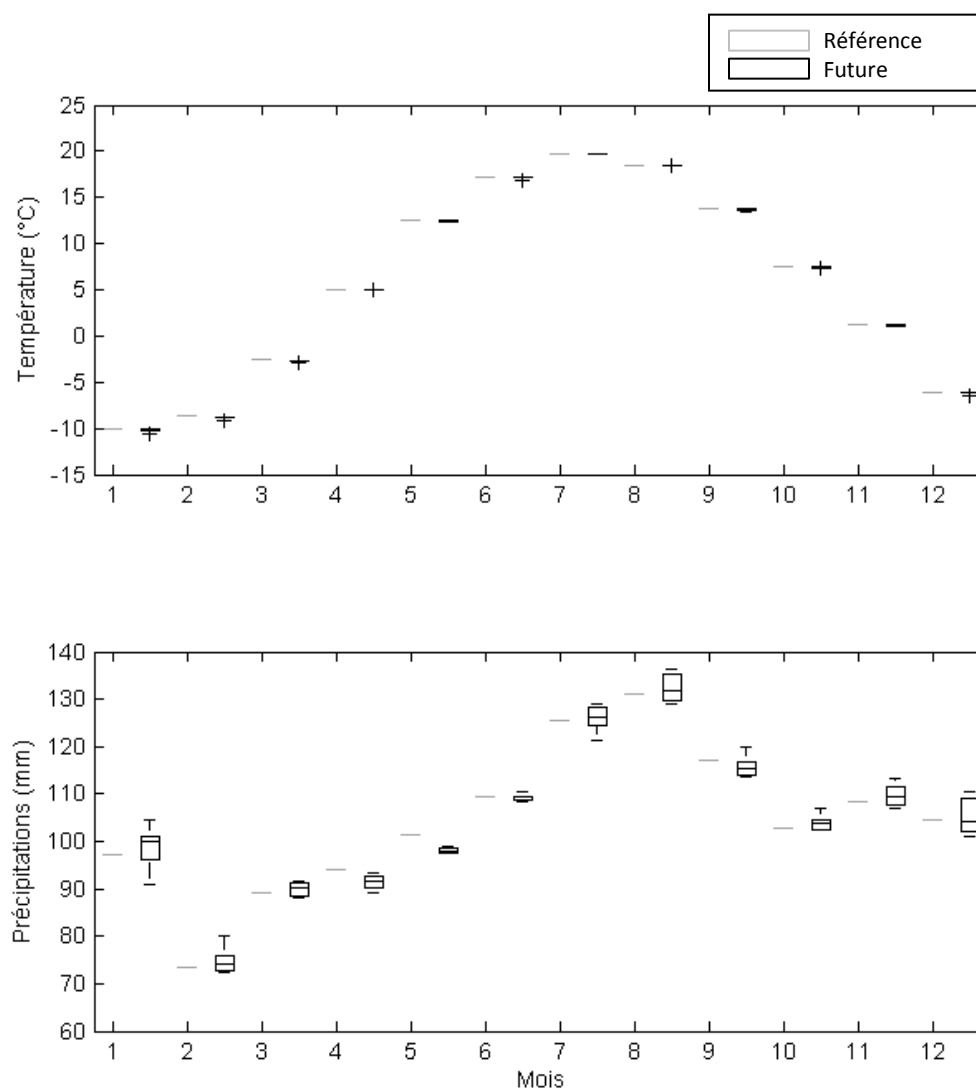


Figure C.3 - Données observées du krigeage vs données des projections climatiques de la station 725455

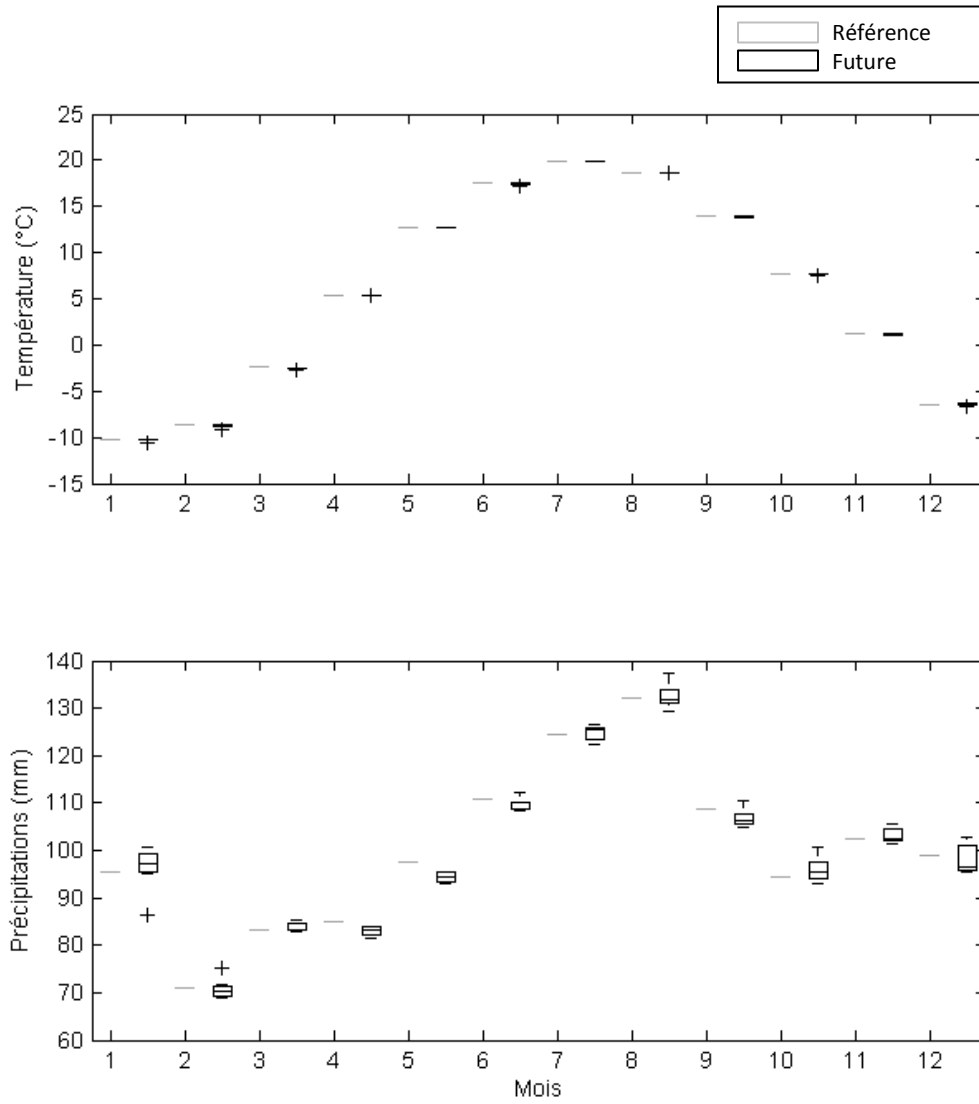




Figure C.4 Données observées du krigeage vs données des projections climatiques de la station 727451

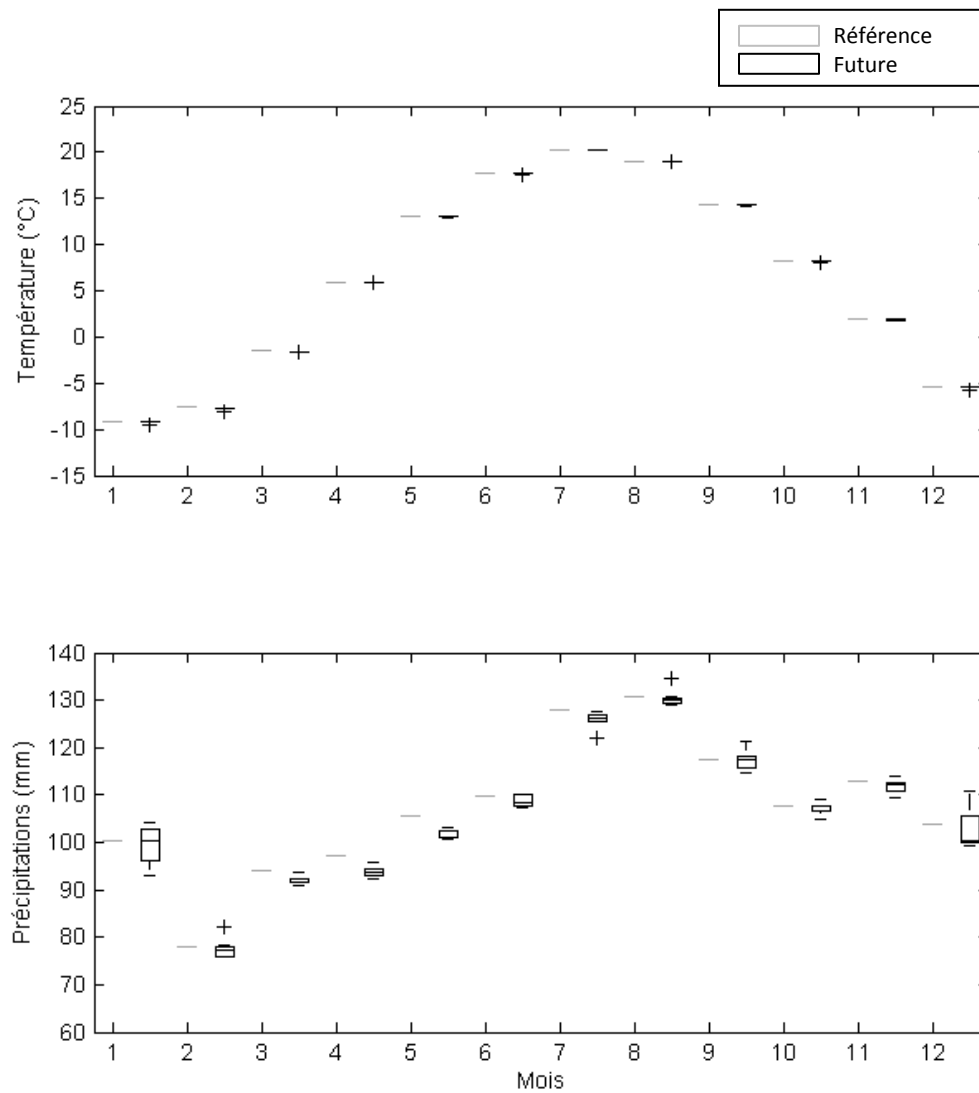


Figure C.5 Données observées du krigeage vs données des projections climatiques de la station 727453

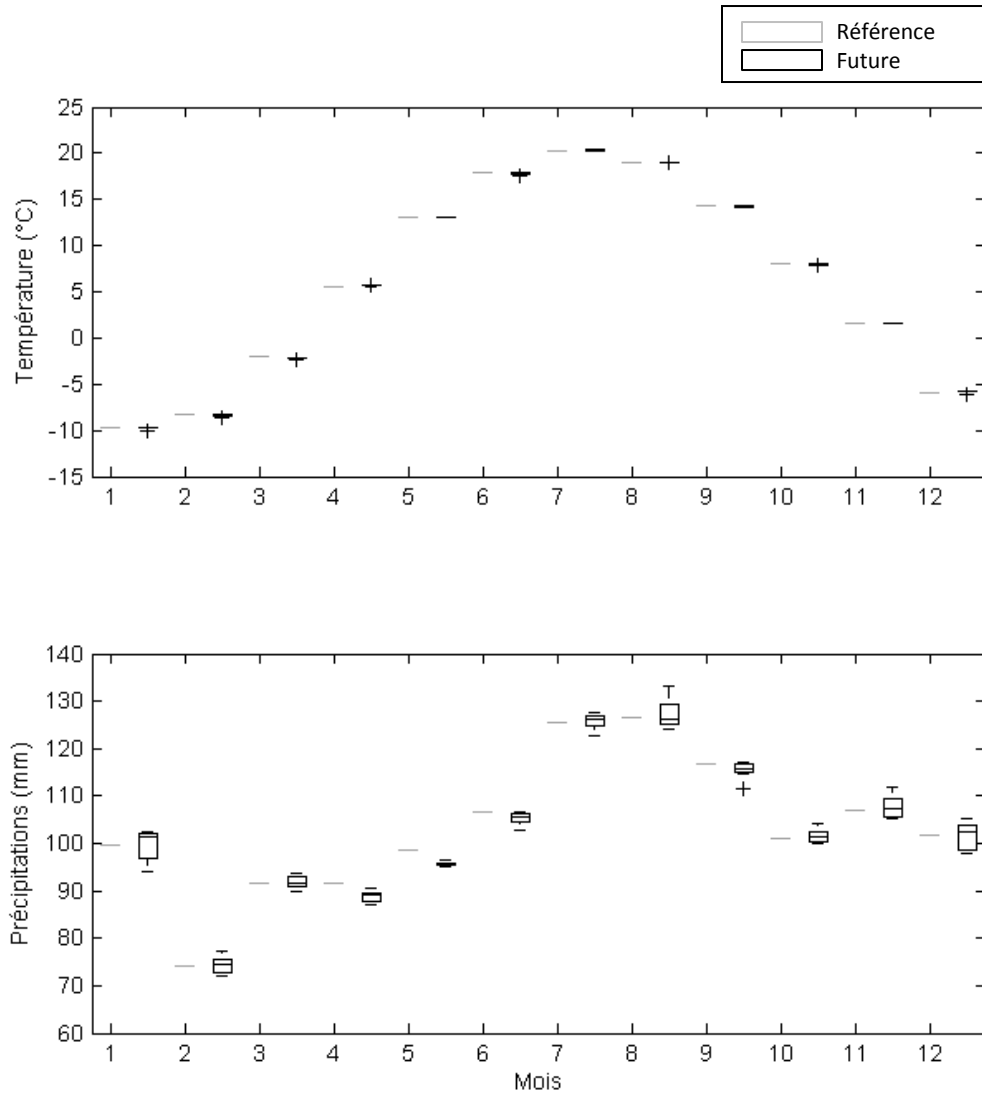
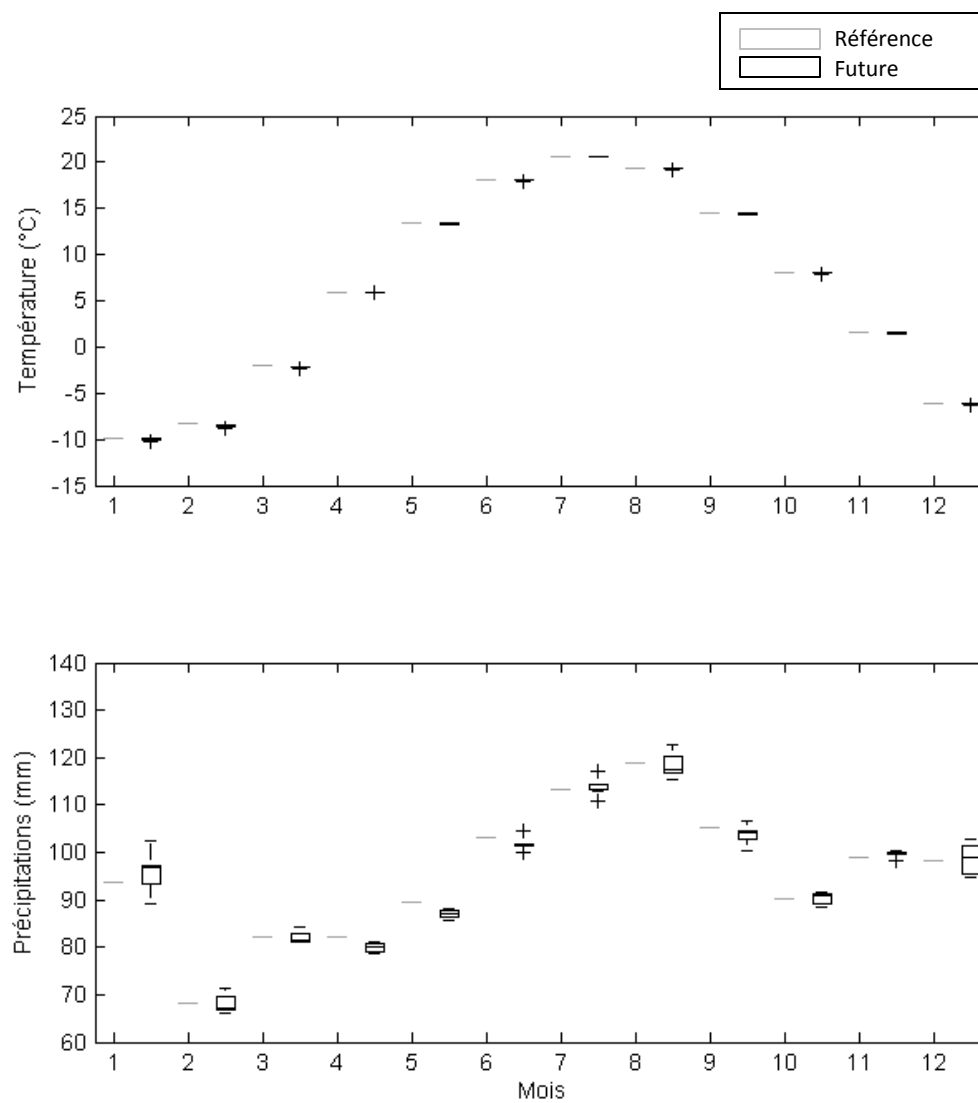
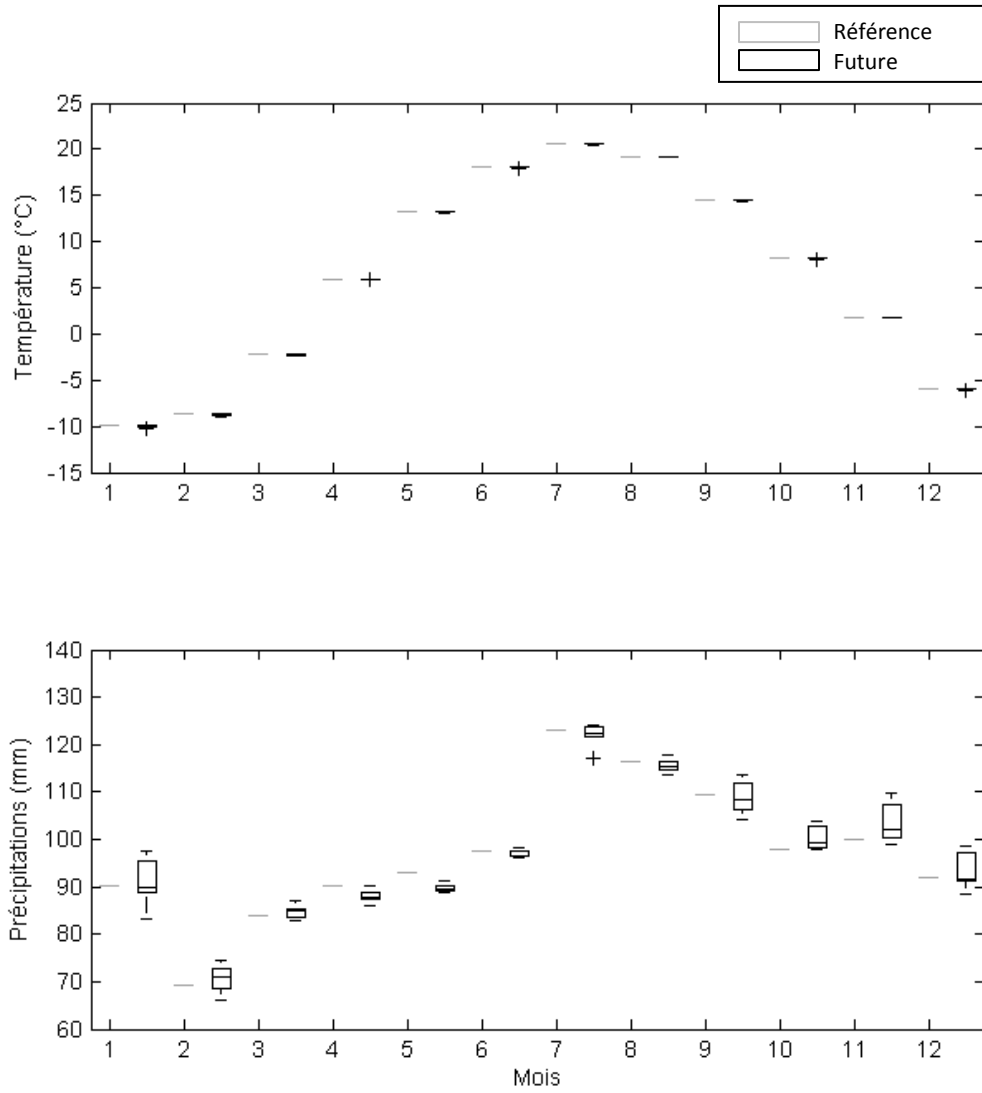


Figure C.6 - Données observées du krigeage vs données des projections climatiques de la station 727455



**Figure C.7 - Données observées du krigeage vs données des projections climatiques de la station 729453**



## ANNEXE D Courbe élévation/stockage

Les informations présentées aux tableaux D.1 et D.2 sont disponibles pour établir la relation élévation-stockage au lac Brome. Le tableau D.1 fournit l'aire et le stockage des isobathes de la carte bathymétrique du lac Brome. Le tableau D.2 relie les élévations d'eau du lac Brome avec le stockage.

**Tableau D.1 - Synthèse des mesures et des calculs de bathymétrie, de profondeur, de surface et de volume du lac Brome [Besré, 2010]**

Isobathe pi	Prof. moy. m	Aire isobathe km <sup>2</sup>	Aire %	Aire cumulée %	Profondeur moy. de l'aire <sup>1</sup> m	Volume du lac Brome Mm <sup>3,2</sup>
0 5	0,76	1,32	8,3	8,30	0,07	1,01
5 10	2,3	1,97	13,5	21,81	0,31	4,50
10 15	3,8	1,54	9,9	31,76	0,40	5,87
15 20	5,3	2,15	14,9	46,61	0,79	11,49
20 25	6,9	2,87	20,3	66,95	1,34	19,68
25 30	8,4	2,42	16,6	83,50	1,39	20,29
30 35	9,9	1,77	12,1	95,60	1,21	17,38
35 40	11,4	0,59	4,1	99,67	0,46	6,71
40	12,2	0,05	0,3	100,00	0,04	0,61
Lac	-	14,69	100	100	6,03	87,75

1- =Aire isobathe x prof. moy / aire totale = hauteur d'eau sur 14,6 km<sup>2</sup>

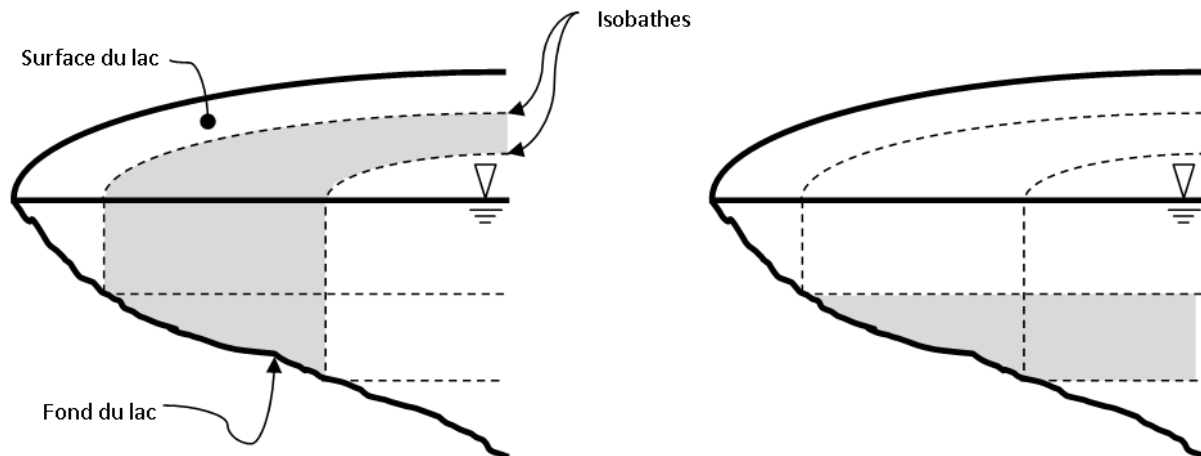
2- =Aire isobathe x prof. moy en Mm<sup>3</sup> ou million de m<sup>3</sup>

**Tableau D.2 - Temps de séjour et niveau au lac Brome**

Niveau du lac m	Prof. moy. m	Aire km <sup>2</sup>	Volume du lac Mm <sup>3</sup>	Temps de séjour an <sup>-1</sup>	Taux de renouvellement an <sup>-1</sup>	Charge annuelle <sup>1</sup> Mm <sup>3</sup>
Cote 196,9	6,31	15,0	94,65	0,84	1,19	113,1
Cote 196,4	6,03	14,6	87,75	0,78	1,28	113,1
Cote 195,9	5,65	14,2	80,23	0,71	1,41	113,1

1-Écoulement annuel moyen des tributaires au lac

Il est à noter que le stockage est fourni pour des « tranches verticales » alors que la courbe élévation-stockage nécessite des « tranches horizontales ». La figure D.1 présente ce concept en image.



**Figure D.1 - Stockage du lac fourni (gauche) et nécessaire (droite) pour la courbe élévation-stockage**

Dans un premier temps, la profondeur « 0 m » des isobathes est associée à la cote 196.40 m au lac Brome puisque le stockage total au tableau D.1 correspond exactement au stockage de l'élévation 196.40 au tableau D.2.

Ensuite, les calculs sont effectués pour trouver le stockage des tranches horizontales et le stockage cumulatif pour chaque élévation. Le tableau D.3 présente ces derniers. Les élévations correspondent à la profondeur des isobathes. La deuxième section du tableau fournit le volume d'eau pour chaque profondeur et chaque isobathe, tel que présenté à la figure D.1. Le chiffre de la ligne 2 (194.88 m | 193.36 m) et de la colonne 2 est le résultat de la multiplication de la hauteur d'eau (1.52 m) par l'aire de l'isobathe (1.97 Km<sup>2</sup>) du tableau D.1. Le chiffre de la ligne 3 et de la colonne 2 est le résultat de la soustraction de tous les volumes au-dessus dans le tableau au volume de l'isobathe du tableau D.1 (4.5 Hm<sup>3</sup> - 1 x 2.99

Hm<sup>3</sup> = 1.51 hm<sup>3</sup>). Le stockage horizontal de chaque tranche est obtenu en additionnant toutes les colonnes.

**Tableau D.3 - Synthèse des calculs effectués pour obtenir le volume des tranches horizontales et le stockage cumulé pour chaque élévation**

Isobathe (m)	Volume des isobathes pour chaque élévation (Hm <sup>3</sup> )										Stockage tranches horizontales
	1	2	3	4	5	6	7	8	9		
<b>196.40</b> <b>194.88</b>	1.01	2.99	2.34	3.27	4.36	3.68	2.69	0.90	0.08		21.31
<b>194.88</b> <b>193.36</b>		1.51	2.34	3.27	4.36	3.68	2.69	0.90	0.08		18.82
<b>193.36</b> <b>191.84</b>			1.19	3.27	4.36	3.68	2.69	0.90	0.08		16.16
<b>191.84</b> <b>190.32</b>					4.36	3.68	2.69	0.90	0.08		13.37
<b>190.32</b> <b>188.80</b>					2.23	3.68	2.69	0.90	0.08		9.57
<b>188.80</b> <b>187.28</b>						1.89	2.69	0.90	0.08		5.56
<b>187.28</b> <b>185.76</b>							1.39	0.90	0.08		2.36
<b>185.76</b> <b>184.24</b>								0.47	0.08		0.54
<b>184.24</b> <b>182.72</b>									0.00		0.00

La valeur de stockage de 94.65 Hm<sup>3</sup> pour une élévation de 196.90 m du tableau D.2 est ajoutée à la série pour obtenir les valeurs présentées au tableau D.4. L'équation quadratique de deuxième degré D1 est utilisée pour connaître le stockage à n'importe quelle élévation et vice-versa. Cette équation est valable pour les élévations supérieures à 188.80 m.

**Tableau D.4 - Valeurs élévation-stockage**

Élévation (m)	Stockage (Hm <sup>3</sup> )
196.90	94.65
196.40	87.70
194.88	66.39
193.36	47.56
191.84	31.41
190.32	18.04
188.80	8.46
187.28	2.91
185.76	0.54
184.24	0.00

Dans le projet, les valeurs de stockage en deçà de l'élévation 195.80 m sont inutiles puisque la fluctuation du niveau du lac s'effectue entre l'élévation 196.00 m et 197.40 m. Pour contourner ce problème, le stockage à 195.80 m est considéré comme étant 0 Hm<sup>3</sup> et le stockage de chaque élévation suivante suivra la même augmentation que précédemment. Cette hypothèse est valable puisque l'important pour le projet est de considérer la variation de stockage et non la valeur absolue de stockage. L'équation D.2 est utilisée pour connaître le stockage à n'importe quelle élévation et vice-versa. Finalement la figure D.2 présente les données du tableau 4, les résultats de l'équation D.1 et les résultats de l'équation D.2.

$$S = 0.68 N^2 - 251.58 N + 23273.00 \quad (D.1)$$



$$S = 0.68 N^2 - 251.58 N + 23273.00 - 79.40 \quad (D.2)$$

Où :

S Stockage (Hm<sup>3</sup>)

N Élévation (m)

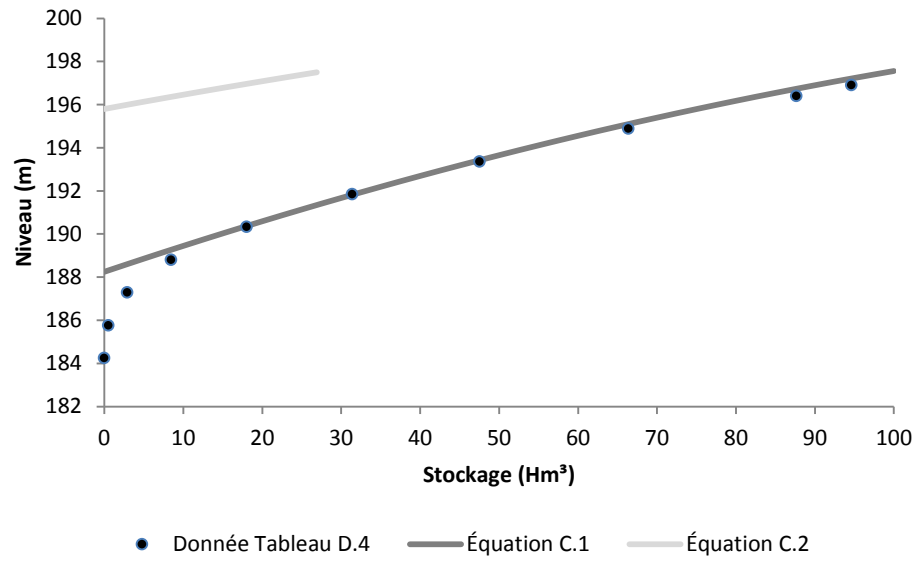
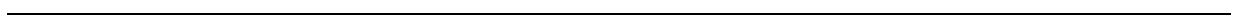


Figure D.2 - Courbe niveau-stockage au lac Bromé



## ANNEXE E Résultats supplémentaires du modèle de simulation

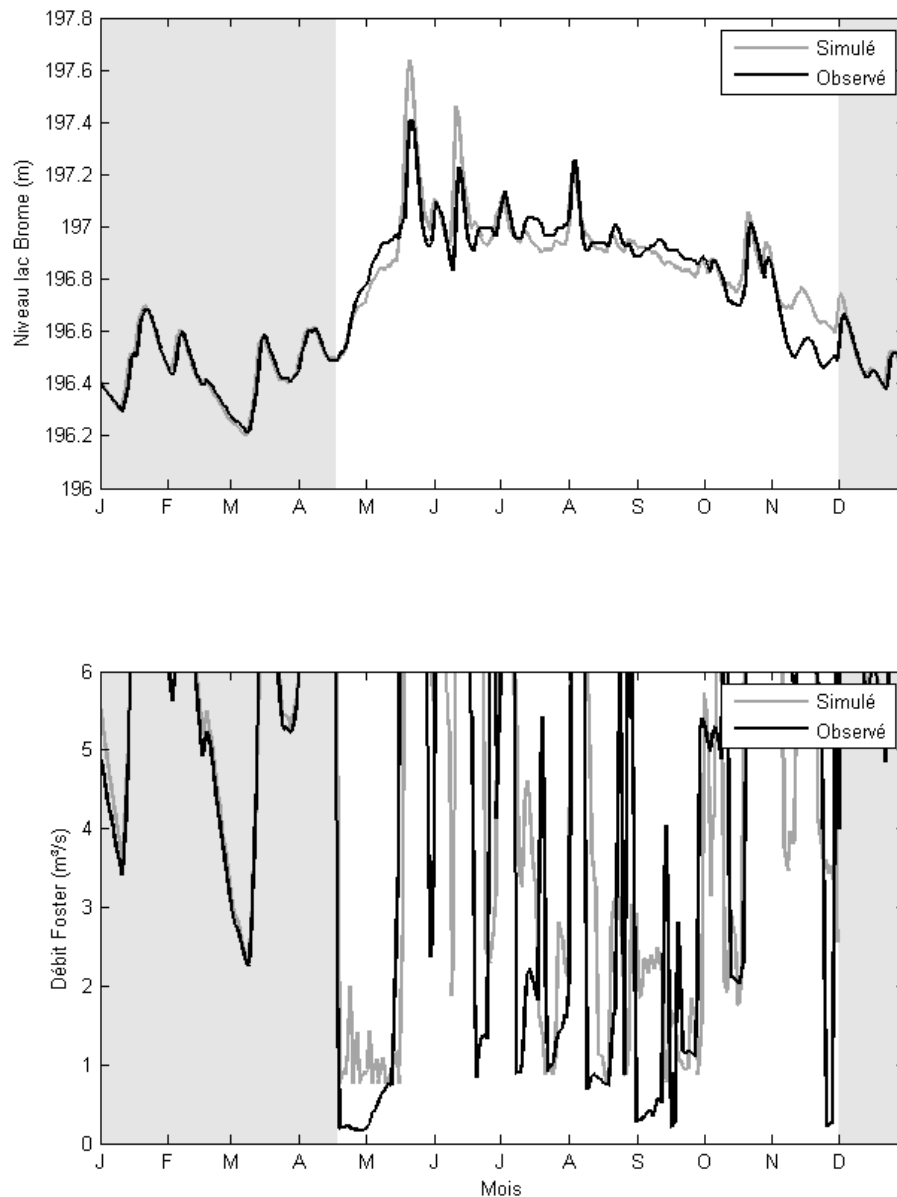
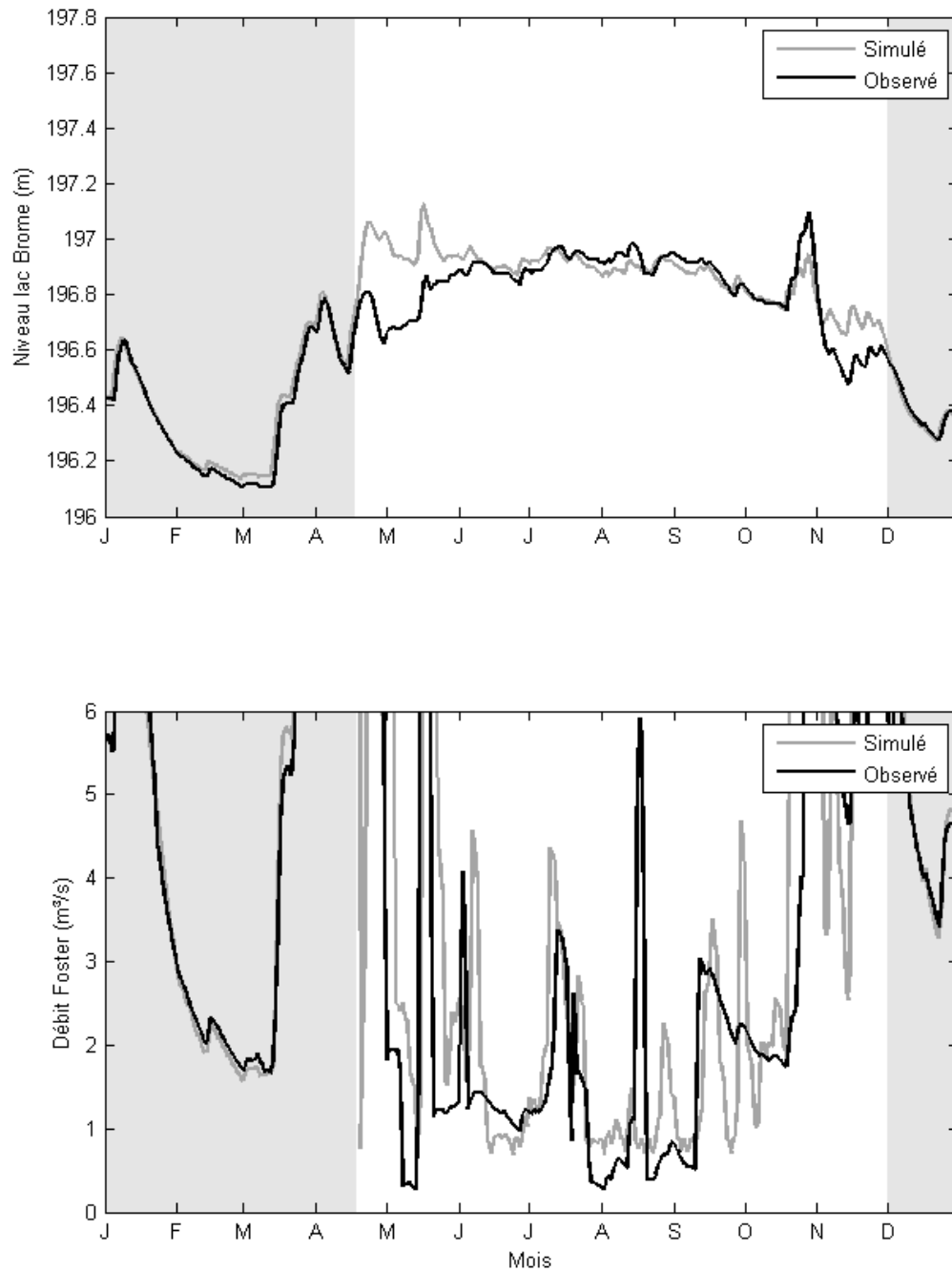


Figure E.1 - Comparaison des niveaux et débits observés et simulés au lac Brome pour l'année 2006



**Figure E.2 - Comparaison des niveaux et débits observés et simulés au lac Bromé pour l'année 2007**

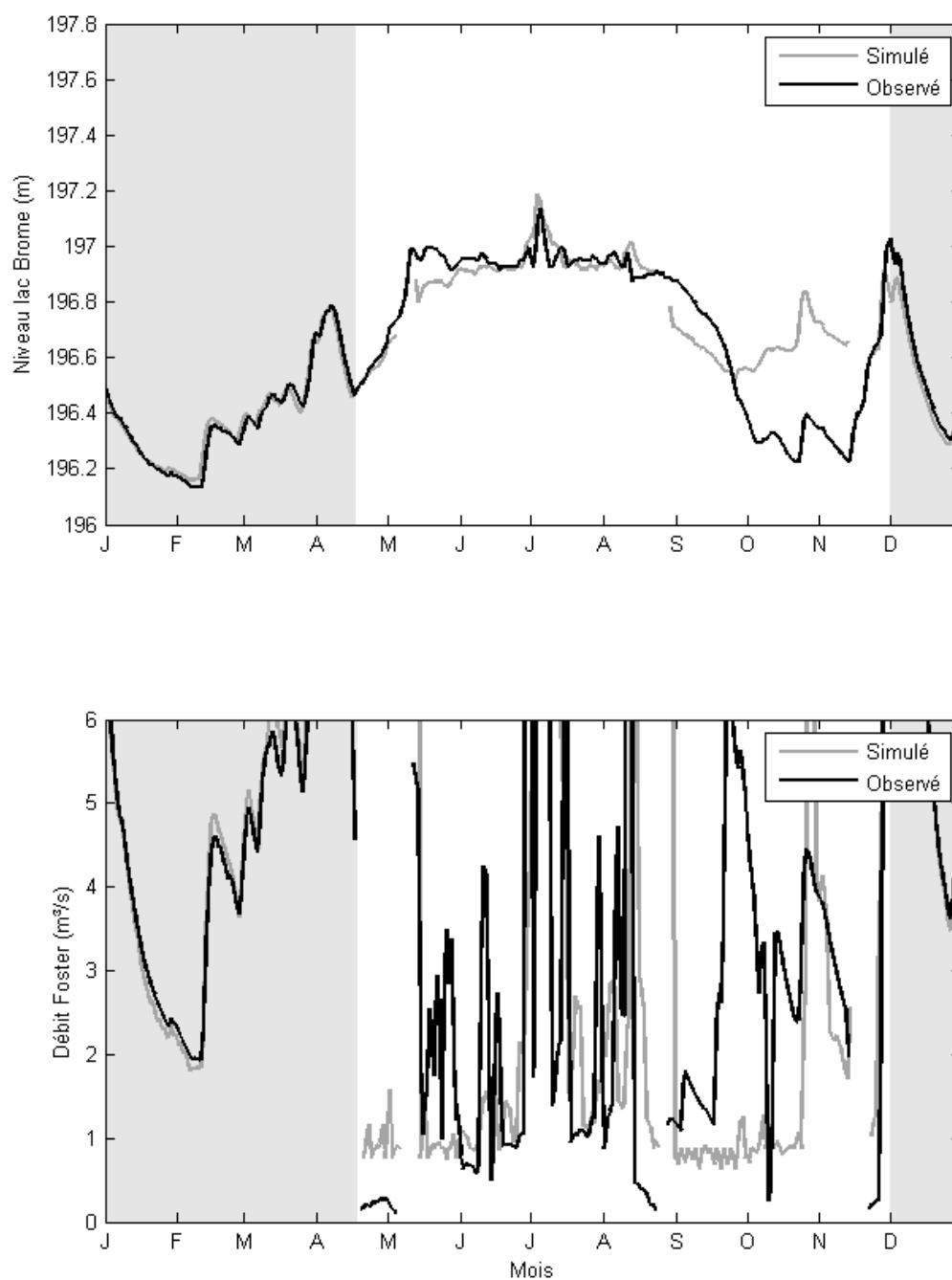


Figure E.3 - Comparaison des niveaux et débits observés et simulés au lac Brome pour l'année 2009

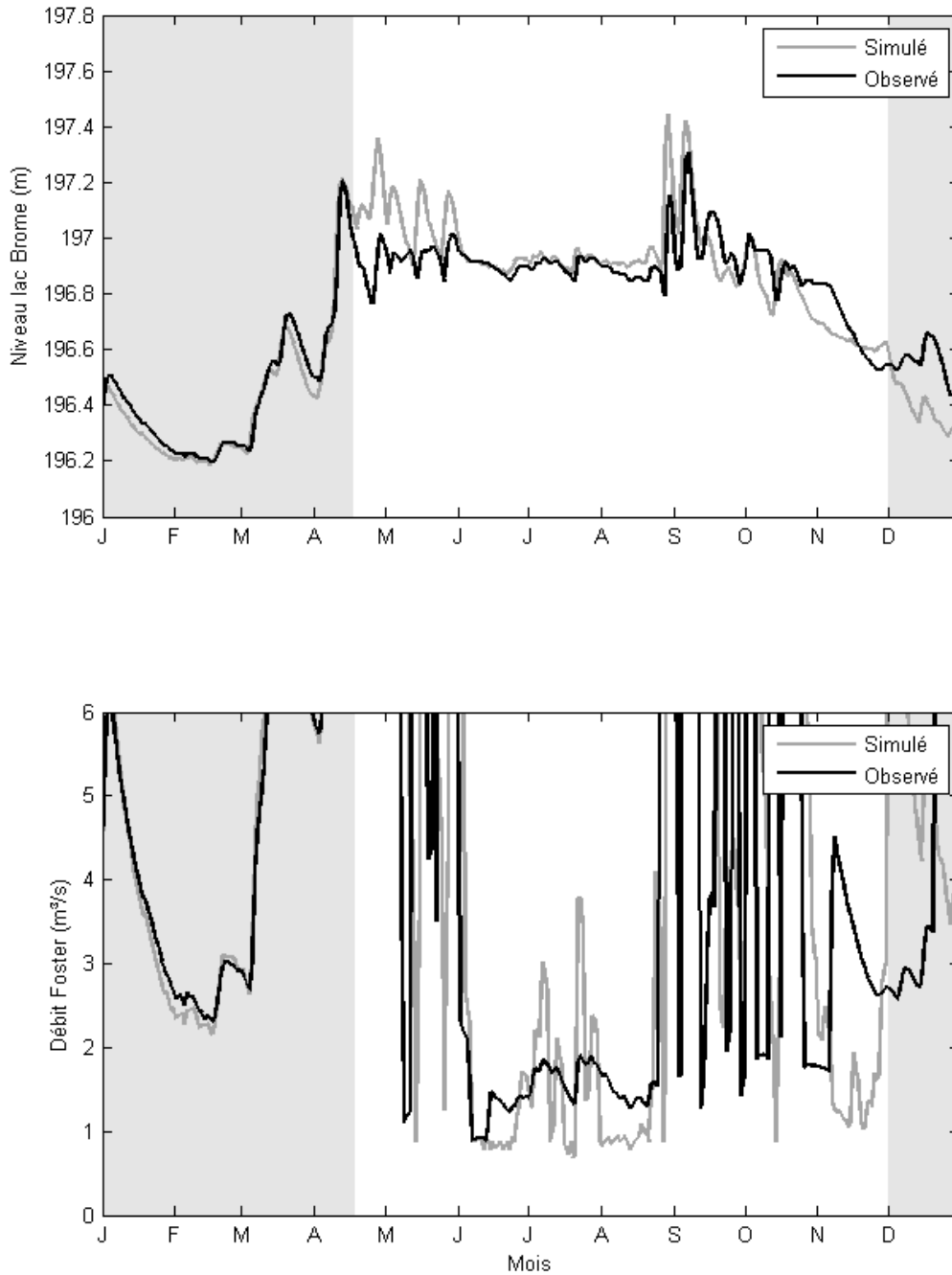


Figure E.4 - Comparaison des niveaux et débits observés et simulés au lac Brome pour l'année 2011

## ANNEXE F Débits réservés écologiques

Cette annexe présente en détail les valeurs obtenues de débits réservés en suivant la méthodologie du sous-chapitre 4.6. Les résultats sont discutés au sous-chapitre 5.6.

**Tableau F.1 - Débits réservés écologiques selon la méthode écohydrologique**

Période	Indice	Foster	CTE
1er octobre au 31 mars	0.5 QMA	2.01	3.71
1er avril au 30 juin	0.5 QMP	5.22	9.67
1 <sup>er</sup> mai au 30 septembre	Q <sub>50</sub> août	0.62	1.15

**Tableau F.2 - Débits réservés écologiques selon la méthode du Vermont**

Période	Indice	Foster	CTE
1er octobre au 31 mars	Q <sub>50</sub> février	1.33	2.46
1er avril au 31 mai	Q <sub>50</sub> avril & mai	4.32	7.99
1er juin au 30 septembre	Q <sub>50</sub> août	0.62	1.15

**Tableau F.3 - Débits réservés écologiques selon la méthode française**

Période	Indice	Foster	CTE
Toute l'année	0.10 QMA	0.40	0.74

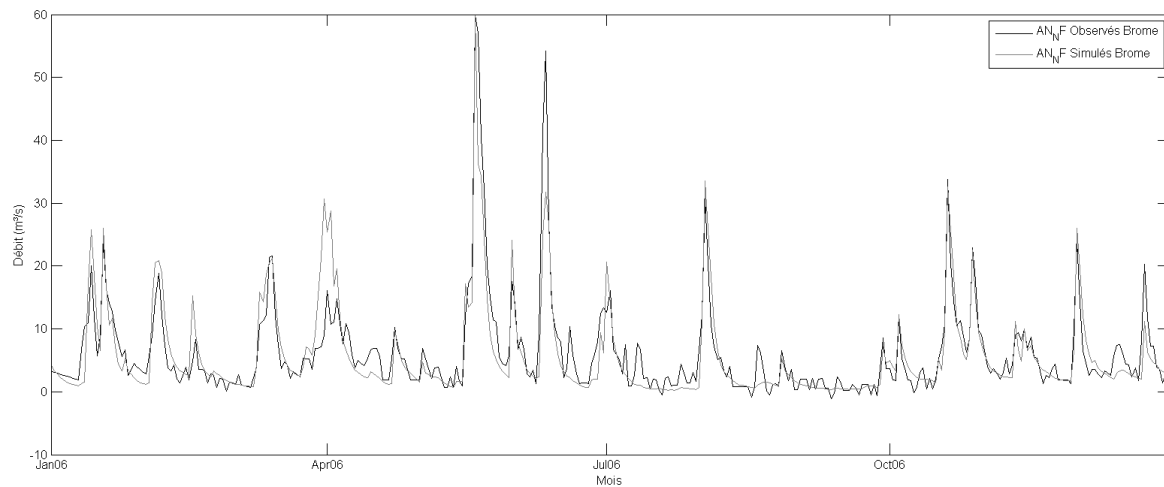
**Tableau F.4 - Débits réservés écologiques selon le critère passable de la méthode du  
Montana**

Période	Indice	Foster	CTE
Octobre à mars	0.10 QMA	0.40	0.74
Avril à septembre	0.30 QMA	1.20	2.23

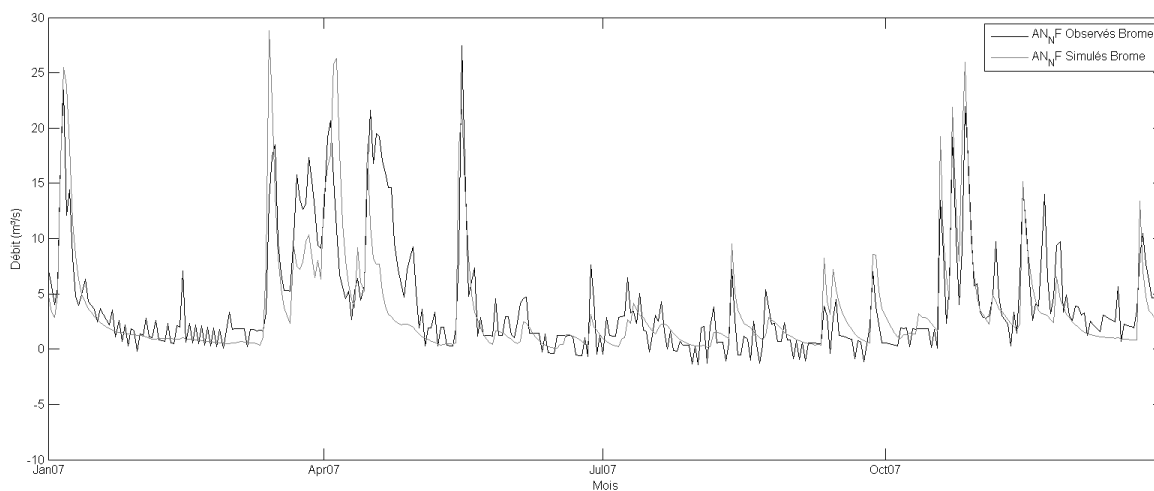


## ANNEXE G Résultats supplémentaires de calage

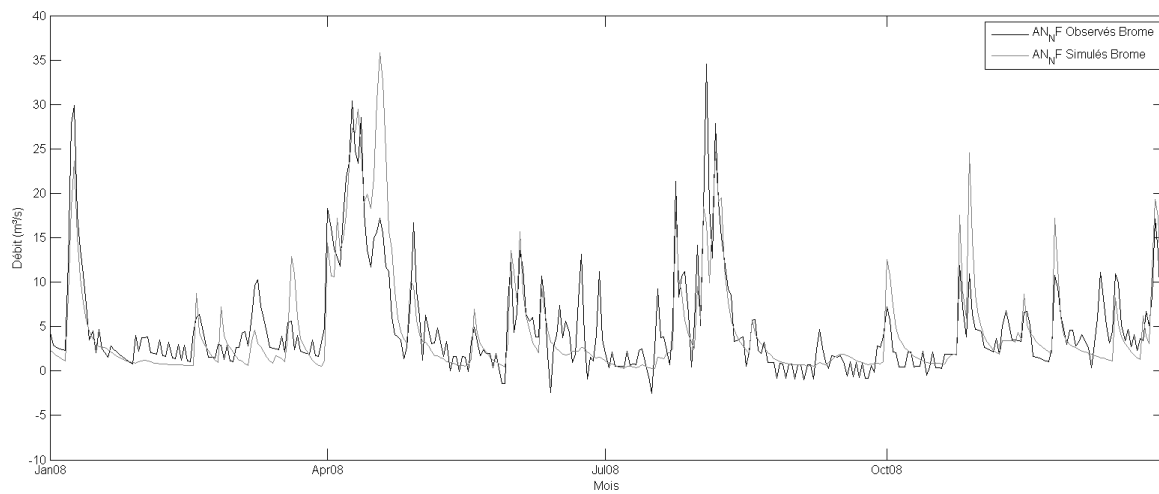
Les figures G.1 à G.6 présentent le résultat de la validation supplémentaire effectuée au lac Brome sur les années de données disponibles lors du calage.



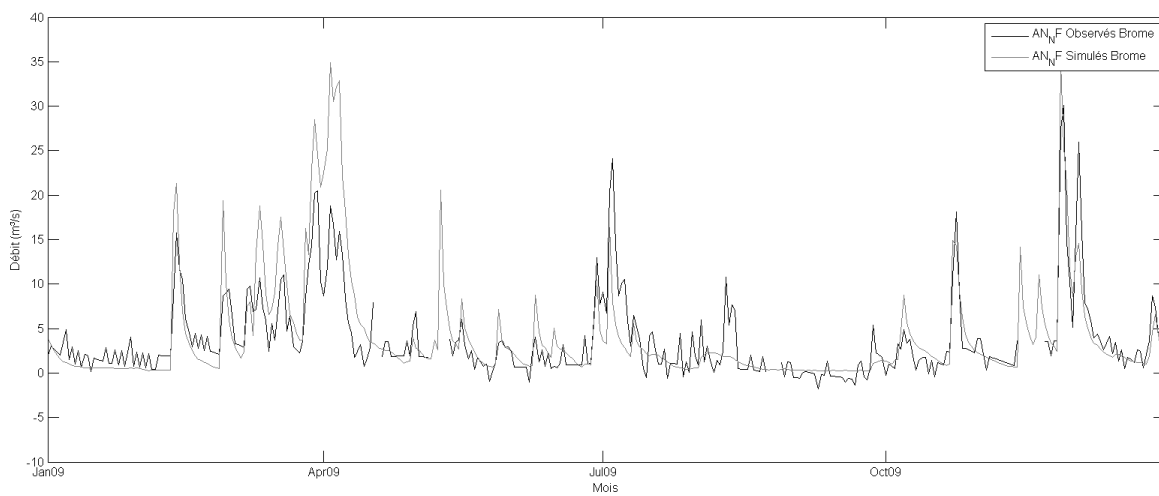
**Figure G.1 - Données observées et simulées de l'année 2006 au lac Brome**



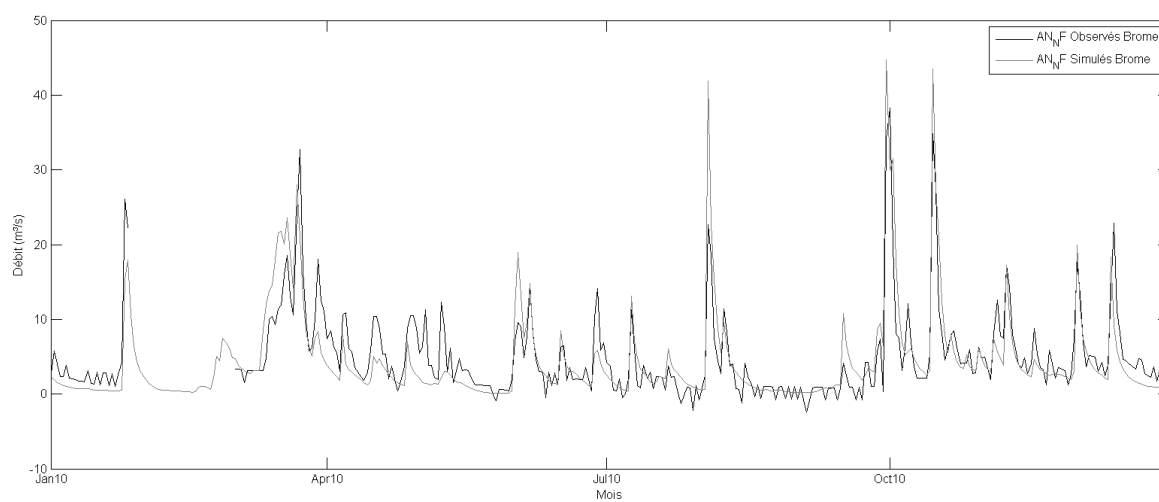
**Figure G.2 - Données observées et simulées de l'année 2007 au lac Brome**



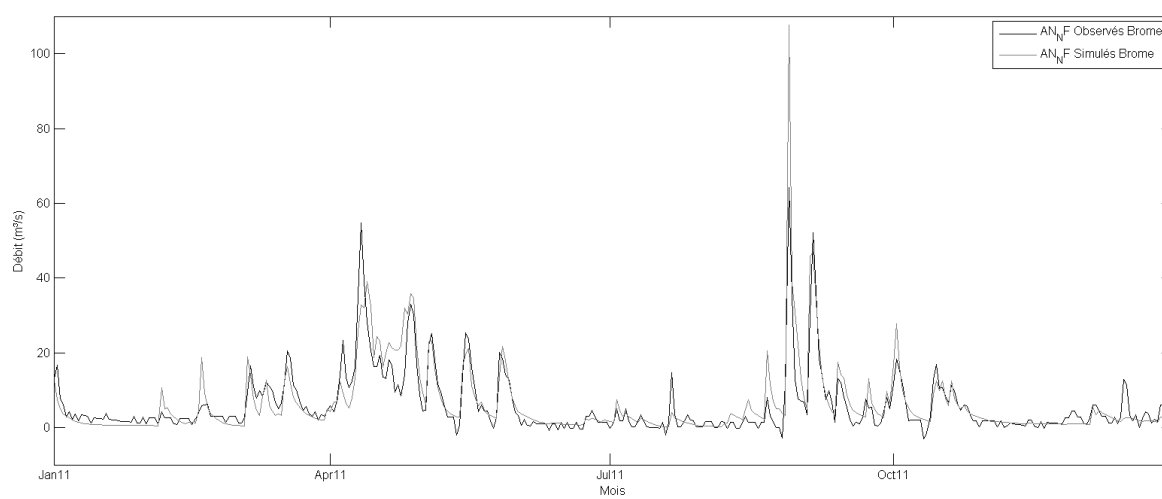
**Figure G.3 - Données observées et simulées de l'année 2008 au lac Brome**



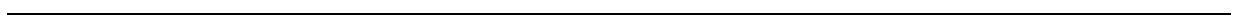
**Figure G.4 - Données observées et simulées de l'année 2009 au lac Brome**



**Figure G.5 - Données observées et simulées de l'année 2010 au lac Brome**



**Figure G.6 - Données observées et simulées de l'année 2011 au lac Brome**



## ANNEXE H Critères FVR et autres pour les simulations en période actuelle

Tableau H.1 - Indicateurs de performance pour le débit minimal à la CTE selon la méthode

$Q_{eco1}$

	Q max	Hiver	Prin.	Été	Aut.		Q max	Hiver	Prin.	Été	Aut.
<b>Fiabilité</b>	150	0.71	0.15	0.96	0.75	<b>Nombre dépassement / année</b>	150	2.66	1.72	1.31	1.55
	175	0.71	0.15	0.95	0.75		175	2.66	1.72	1.72	1.55
	200	0.71	0.15	0.94	0.75		200	2.62	1.72	1.66	1.59
	225	0.71	0.15	0.93	0.74		225	2.66	1.72	1.90	1.59
	250	0.70	0.15	0.92	0.74		250	2.66	1.72	1.97	1.59
	275	0.70	0.15	0.90	0.74		275	2.69	1.72	2.31	1.59
	300	0.70	0.15	0.89	0.73		300	2.72	1.72	2.48	1.69
	325	0.70	0.15	0.87	0.73		325	2.79	1.72	2.45	1.72
	350	0.69	0.15	0.86	0.72		350	2.83	1.72	2.45	1.79
<b>Vulnérabilité</b>	150	0.35	0.67	0.10	0.22	<b>Dépassement maximal (m<sup>3</sup>/s)</b>	150	6.67	8.72	0.31	2.09
	175	0.35	0.67	0.10	0.22		175	6.70	8.75	0.33	2.11
	200	0.36	0.68	0.11	0.23		200	6.72	8.77	0.36	2.14
	225	0.36	0.68	0.11	0.23		225	6.75	8.80	0.38	2.16
	250	0.36	0.68	0.12	0.23		250	6.77	8.82	0.41	2.19
	275	0.37	0.68	0.12	0.24		275	6.80	8.85	0.43	2.21
	300	0.37	0.68	0.13	0.24		300	6.82	8.87	0.46	2.24
	325	0.37	0.69	0.13	0.24		325	6.85	8.90	0.48	2.26
	350	0.38	0.69	0.14	0.25		350	6.87	8.92	0.51	2.29
<b>Résilience</b>	150	0.07	0.05	0.24	0.10	<b>Nombre de jours maximaux de dépassement</b>	150	68.00	43.00	25.00	36.00
	175	0.07	0.05	0.26	0.10		175	68.00	43.00	27.00	36.00
	200	0.06	0.05	0.22	0.10		200	68.00	43.00	28.00	36.00
	225	0.07	0.05	0.22	0.10		225	68.00	43.00	30.00	36.00
	250	0.06	0.05	0.20	0.10		250	68.00	43.00	30.00	36.00
	275	0.06	0.05	0.20	0.10		275	68.00	43.00	33.00	36.00
	300	0.07	0.05	0.19	0.10		300	68.00	43.00	33.00	36.00
	325	0.07	0.05	0.16	0.10		325	68.00	43.00	34.00	36.00
	350	0.07	0.05	0.14	0.11		350	68.00	43.00	35.00	36.00

Il est à noter que les critères FVR ne sont pas présentés en pourcentage dans l'annexe.

Tableau H.2 - Indicateurs de performance pour le débit minimal à la CTE selon la méthode

 $Q_{eco2}$ 

	Q max	Hiver	Prin.	Été	Aut.		Q max	Hiver	Prin.	Été	Aut.
<b>Fiabilité</b>	150	0.84	0.19	0.96	0.94	<b>Nombre dépassement / année</b>	150	1.79	1.69	1.31	0.52
	175	0.84	0.19	0.95	0.93		175	1.86	1.69	1.72	0.62
	200	0.84	0.19	0.94	0.93		200	1.93	1.69	1.66	0.59
	225	0.83	0.19	0.93	0.93		225	1.97	1.72	1.90	0.55
	250	0.83	0.19	0.92	0.93		250	1.97	1.72	1.97	0.59
	275	0.83	0.19	0.90	0.93		275	1.97	1.72	2.31	0.59
	300	0.82	0.19	0.89	0.92		300	1.97	1.72	2.48	0.59
	325	0.82	0.19	0.87	0.92		325	2.00	1.72	2.45	0.62
	350	0.82	0.19	0.86	0.92		350	2.00	1.69	2.45	0.69
<b>Vulnérabilité</b>	150	0.27	0.63	0.10	0.11	<b>Dépassement maximal (m³/s)</b>	150	4.99	7.04	0.31	0.84
	175	0.27	0.64	0.10	0.12		175	5.02	7.07	0.33	0.86
	200	0.28	0.64	0.11	0.12		200	5.04	7.09	0.36	0.89
	225	0.28	0.64	0.11	0.13		225	5.07	7.12	0.38	0.91
	250	0.28	0.65	0.12	0.13		250	5.09	7.14	0.41	0.94
	275	0.29	0.65	0.12	0.14		275	5.12	7.17	0.43	0.96
	300	0.29	0.65	0.13	0.15		300	5.14	7.19	0.46	0.99
	325	0.29	0.65	0.13	0.15		325	5.17	7.22	0.48	1.01
	350	0.30	0.66	0.14	0.15		350	5.19	7.24	0.51	1.04
<b>Résilience</b>	150	0.08	0.05	0.24	0.14	<b>Nombre de jours maximaux de dépassement</b>	150	48.00	43.00	25.00	16.00
	175	0.08	0.05	0.26	0.16		175	48.00	43.00	27.00	17.00
	200	0.09	0.05	0.22	0.14		200	49.00	43.00	28.00	17.00
	225	0.08	0.05	0.22	0.13		225	50.00	43.00	30.00	17.00
	250	0.08	0.05	0.20	0.13		250	50.00	43.00	30.00	18.00
	275	0.08	0.05	0.20	0.13		275	51.00	43.00	33.00	18.00
	300	0.08	0.05	0.19	0.13		300	51.00	43.00	33.00	18.00
	325	0.08	0.05	0.16	0.13		325	51.00	43.00	34.00	18.00
	350	0.08	0.05	0.14	0.14		350	51.00	43.00	35.00	18.00

Tableau H.3 - Indicateurs de performance pour le débit minimal à la CTE selon la méthode

Q<sub>eco3</sub>

	Q max	Hiver	Prin.	Été	Aut.		Q max	Hiver	Prin.	Été	Aut.
<b>Fiabilité</b>	150	1.00	1.00	1.00	1.00	<b>Nombre dépassement / année</b>	150	0.03	0.00	0.00	0.00
	175	1.00	1.00	1.00	1.00		175	0.03	0.00	0.00	0.00
	200	1.00	1.00	1.00	1.00		200	0.03	0.00	0.00	0.00
	225	1.00	1.00	1.00	1.00		225	0.03	0.00	0.00	0.00
	250	1.00	1.00	1.00	1.00		250	0.03	0.00	0.00	0.00
	275	1.00	1.00	1.00	1.00		275	0.03	0.03	0.14	0.00
	300	1.00	1.00	1.00	1.00		300	0.03	0.03	0.24	0.00
	325	1.00	1.00	0.99	1.00		325	0.07	0.03	0.48	0.00
	350	1.00	1.00	0.99	1.00		350	0.07	0.03	0.52	0.00
<b>Vulnérabilité</b>	150	0.04	0.00	0.00	0.00	<b>Dépassement maximal (m<sup>3</sup>/s)</b>	150	0.05			
	175	0.07	0.00	0.00	0.00		175	0.08			
	200	0.09	0.00	0.00	0.00		200	0.10			
	225	0.11	0.00	0.00	0.00		225	0.13			
	250	0.13	0.00	0.00	0.00		250	0.15			
	275	0.16	0.03	0.01	0.00		275	0.18	0.02	0.02	
	300	0.18	0.04	0.03	0.00		300	0.20	0.05	0.05	
	325	0.19	0.07	0.04	0.00		325	0.23	0.07	0.07	
	350	0.18	0.10	0.06	0.00		350	0.25	0.10	0.10	
<b>Résilience</b>	150	0.20				<b>Nombre de jours maximaux de dépassement</b>	150	5.00			
	175	0.17					175	6.00			
	200	0.14					200	7.00			
	225	0.13					225	8.00			
	250	0.11					250	9.00			
	275	0.11	1.00	1.00			275	9.00	1.00	1.00	
	300	0.10	0.50	0.88			300	10.00	2.00	2.00	
	325	0.18	0.50	0.78			325	10.00	2.00	2.00	
	350	0.14	0.50	0.63			350	12.00	2.00	4.00	

Tableau H.4 -Indicateurs de performance pour le débit minimal à la CTE selon la méthode

Q<sub>eco4</sub>

	Q max	Hiver	Prin.	Été	Aut.		Q max	Hiver	Prin.	Été	Aut.
Fiabilité	150	1.00	0.60	0.44	1.00	Nombre dépassement / année	150	0.03	1.34	3.59	0.00
	175	1.00	0.59	0.44	1.00		175	0.03	1.38	3.59	0.00
	200	1.00	0.59	0.43	1.00		200	0.03	1.38	3.59	0.00
	225	1.00	0.59	0.43	1.00		225	0.03	1.31	3.66	0.00
	250	1.00	0.59	0.42	1.00		250	0.03	1.24	3.55	0.00
	275	1.00	0.58	0.41	1.00		275	0.03	1.31	3.62	0.00
	300	1.00	0.58	0.41	1.00		300	0.03	1.34	3.59	0.00
	325	1.00	0.57	0.41	1.00		325	0.07	1.24	3.55	0.00
	350	1.00	0.57	0.40	1.00		350	0.07	1.28	3.45	0.00
Vulnérabilité	150	0.04	0.26	0.29	0.00	Dépassement maximal (m³/s)	150	0.05	1.39	1.39	
	175	0.07	0.27	0.30	0.00		175	0.08	1.41	1.41	
	200	0.09	0.27	0.31	0.00		200	0.10	1.44	1.44	
	225	0.11	0.29	0.32	0.00		225	0.13	1.46	1.46	
	250	0.13	0.29	0.33	0.00		250	0.15	1.49	1.49	
	275	0.16	0.30	0.33	0.00		275	0.18	1.51	1.51	
	300	0.18	0.31	0.34	0.00		300	0.20	1.54	1.54	
	325	0.19	0.32	0.35	0.00		325	0.23	1.56	1.56	
	350	0.18	0.33	0.36	0.00		350	0.25	1.59	1.59	
Résilience	150	0.20	0.08	0.05		Nombre de jours maximaux de dépassement	150	5.00	41.00	106.00	
	175	0.17	0.08	0.05			175	6.00	42.00	106.00	
	200	0.14	0.08	0.05			200	7.00	42.00	106.00	
	225	0.13	0.07	0.05			225	8.00	42.00	106.00	
	250	0.11	0.07	0.05			250	9.00	42.00	106.00	
	275	0.11	0.07	0.05			275	9.00	42.00	106.00	
	300	0.10	0.07	0.05			300	10.00	42.00	106.00	
	325	0.18	0.07	0.05			325	10.00	42.00	106.00	
	350	0.14	0.07	0.05			350	12.00	42.00	106.00	



Tableau H.5 - Indicateurs de performance pour le niveau minimal au lac Brome selon la méthode  $Q_{eco1}$

	Q max	Été		Q max	Été
<b>Fiabilité</b>	150	0.88	<b>Nombre dépassement / année</b>	150	0.52
	175	0.88		175	0.52
	200	0.88		200	0.52
	225	0.87		225	0.52
	250	0.87		250	0.52
	275	0.87		275	0.52
	300	0.87		300	0.52
	325	0.87		325	0.52
	350	0.87		350	0.48
<b>Vulnérabilité</b>	150	0.24	<b>Dépassement maximal (m)</b>	150	0.61
	175	0.24		175	0.61
	200	0.24		200	0.61
	225	0.24		225	0.61
	250	0.24		250	0.61
	275	0.24		275	0.61
	300	0.24		300	0.61
	325	0.24		325	0.61
	350	0.24		350	0.61
<b>Résilience</b>	150	0.03	<b>Nombre de jours maximaux de dépassement</b>	150	92.00
	175	0.03		175	92.00
	200	0.03		200	92.00
	225	0.03		225	92.00
	250	0.03		250	92.00
	275	0.03		275	92.00
	300	0.03		300	92.00
	325	0.03		325	92.00
	350	0.03		350	92.00

Tableau H.6 - Indicateurs de performance pour le niveau minimal au lac Brome selon la méthode  $Q_{eco2}$

	Q max	Été		Q max	Été
<b>Fiabilité</b>	150	0.88	<b>Nombre dépassement / année</b>	150	0.52
	175	0.88		175	0.52
	200	0.88		200	0.52
	225	0.87		225	0.52
	250	0.87		250	0.52
	275	0.87		275	0.52
	300	0.87		300	0.52
	325	0.87		325	0.52
	350	0.87		350	0.52
<b>Vulnérabilité</b>	150	0.24	<b>Dépassement maximal (m)</b>	150	0.61
	175	0.24		175	0.61
	200	0.24		200	0.61
	225	0.24		225	0.61
	250	0.24		250	0.61
	275	0.24		275	0.61
	300	0.24		300	0.61
	325	0.24		325	0.61
	350	0.24		350	0.61
<b>Résilience</b>	150	0.03	<b>Nombre de jours maximaux de dépassement</b>	150	92.00
	175	0.03		175	92.00
	200	0.03		200	92.00
	225	0.03		225	92.00
	250	0.03		250	92.00
	275	0.03		275	92.00
	300	0.03		300	92.00
	325	0.03		325	92.00
	350	0.03		350	92.00

Tableau H.7 - Indicateurs de performance pour le niveau minimal au lac Brome selon la méthode  $Q_{eco3}$

	Q max	Été		Q max	Été
<b>Fiabilité</b>	150	0.90	<b>Nombre dépassement / année</b>	150	0.45
	175	0.90		175	0.45
	200	0.90		200	0.48
	225	0.90		225	0.52
	250	0.90		250	0.52
	275	0.90		275	0.52
	300	0.89		300	0.52
	325	0.89		325	0.52
	350	0.89		350	0.55
<b>Vulnérabilité</b>	150	0.24	<b>Dépassement maximal (m)</b>	150	0.57
	175	0.24		175	0.58
	200	0.24		200	0.58
	225	0.24		225	0.59
	250	0.24		250	0.59
	275	0.24		275	0.59
	300	0.24		300	0.60
	325	0.24		325	0.60
	350	0.24		350	0.60
<b>Résilience</b>	150	0.04	<b>Nombre de jours maximaux de dépassement</b>	150	92.00
	175	0.04		175	92.00
	200	0.04		200	92.00
	225	0.04		225	92.00
	250	0.04		250	92.00
	275	0.04		275	92.00
	300	0.04		300	92.00
	325	0.04		325	92.00
	350	0.04		350	92.00

Tableau H.8 - Indicateurs de performance pour le niveau minimal au lac Brome selon la méthode  $Q_{eco4}$

	Q max	Été		Q max	Été
<b>Fiabilité</b>	150	0.87	<b>Nombre dépassement / année</b>	150	0.52
	175	0.87		175	0.52
	200	0.87		200	0.52
	225	0.87		225	0.55
	250	0.87		250	0.55
	275	0.87		275	0.55
	300	0.87		300	0.52
	325	0.87		325	0.52
	350	0.87		350	0.52
<b>Vulnérabilité</b>	150	0.24	<b>Dépassement maximal (m)</b>	150	0.61
	175	0.24		175	0.61
	200	0.24		200	0.61
	225	0.24		225	0.61
	250	0.24		250	0.61
	275	0.24		275	0.61
	300	0.24		300	0.61
	325	0.24		325	0.61
	350	0.24		350	0.61
<b>Résilience</b>	150	0.03	<b>Nombre de jours maximaux de dépassement</b>	150	92.00
	175	0.03		175	92.00
	200	0.03		200	92.00
	225	0.04		225	92.00
	250	0.04		250	92.00
	275	0.04		275	92.00
	300	0.03		300	92.00
	325	0.03		325	92.00
	350	0.03		350	92.00

# ANNEXE I Variations des critères FVR et autres dues aux changements climatiques

Tableau I.1 - Variation des indicateurs de performance entre la période de référence et la période future pour le niveau minimal au lac Brome selon la méthode  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco3}$

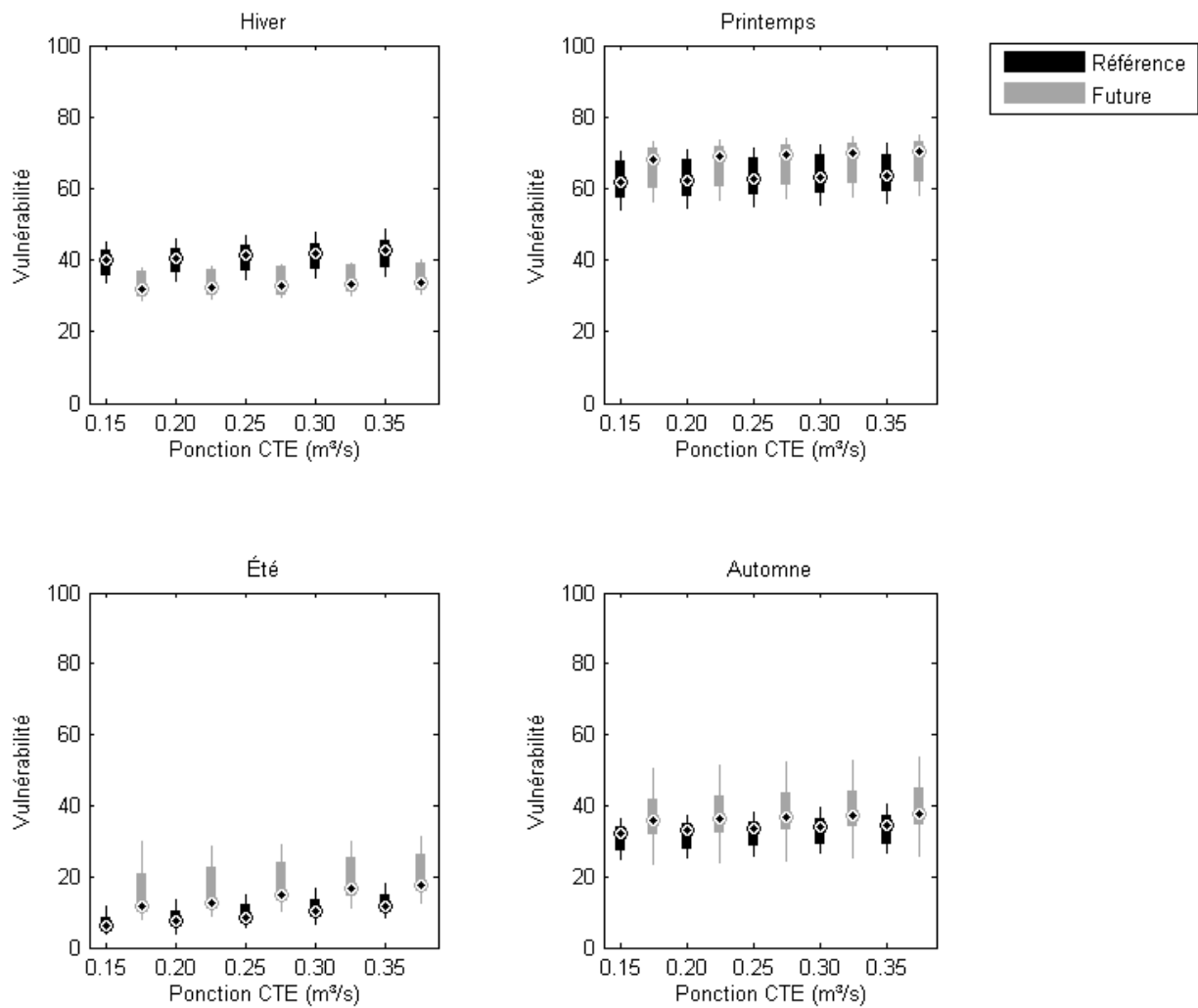
	Q max	Qeco1	Qeco3
		Été	Été
Fiabilité	150	-0.10	-0.09
	175	-0.10	-0.09
	200	-0.10	-0.09
	225	-0.10	-0.09
	250	-0.10	-0.09
	275	-0.10	-0.09
	300	-0.10	-0.10
	325	-0.10	-0.10
	350	-0.10	-0.10
Vulnérabilité	150	0.15	0.15
	175	0.15	0.15
	200	0.15	0.15
	225	0.15	0.15
	250	0.15	0.15
	275	0.15	0.15
	300	0.15	0.15
	325	0.15	0.15
	350	0.15	0.15
Résilience	150	-0.02	-0.03
	175	-0.01	-0.03
	200	-0.01	-0.03
	225	-0.01	-0.03
	250	-0.01	-0.03
	275	-0.01	-0.03
	300	-0.01	-0.02
	325	-0.01	-0.02
	350	-0.01	-0.02

Il est à noter que les critères FVR ne sont pas présentés en pourcentage dans l'annexe.

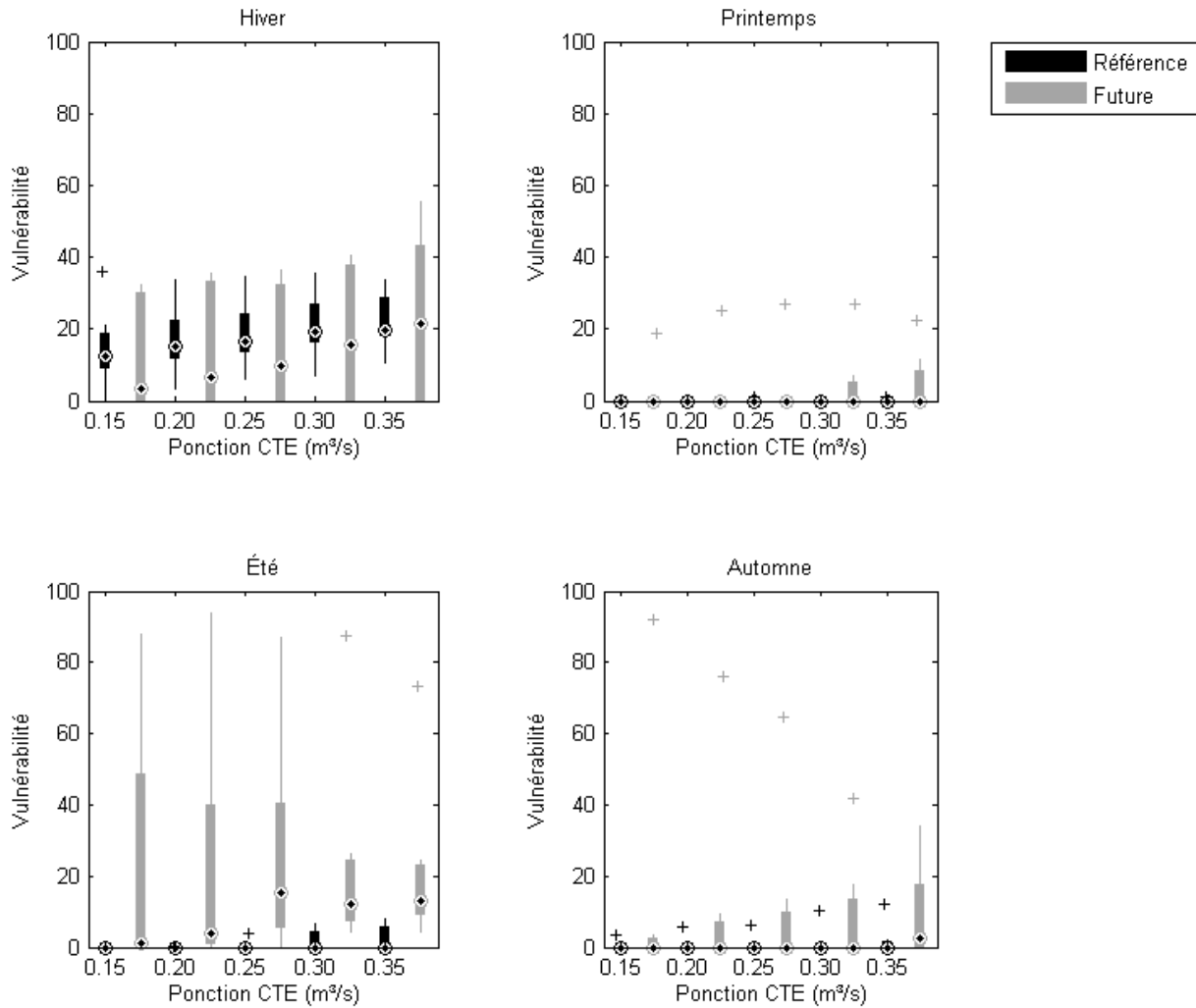
Tableau I.2 - Variation des indicateurs de performance entre la période de référence et la période future pour le débit minimal à la CTE selon la méthode  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco3}$

	Q max	$Q_{eco1}$				$Q_{eco3}$			
		Hiver	Prin.	Été	Aut.	Hiver	Prin.	Été	Aut.
Fiabilité	150	0.12	-0.06	-0.09	-0.05	0.00	0.00	-0.01	0.00
	175	0.12	-0.06	-0.09	-0.05	0.00	0.00	-0.01	-0.01
	200	0.12	-0.06	-0.10	-0.05	0.01	0.00	-0.01	-0.01
	225	0.12	-0.06	-0.11	-0.05	0.01	0.00	-0.02	-0.01
	250	0.12	-0.06	-0.11	-0.05	0.01	0.00	-0.02	-0.01
	275	0.12	-0.06	-0.12	-0.05	0.01	0.00	-0.02	-0.01
	300	0.12	-0.06	-0.12	-0.05	0.01	0.00	-0.03	-0.01
	325	0.12	-0.06	-0.13	-0.05	0.01	0.00	-0.03	-0.01
	350	0.12	-0.06	-0.13	-0.05	0.01	0.00	-0.04	-0.02
Vulnérabilité	150	-0.06	0.04	0.09	0.06	-0.01	0.03	0.23	0.13
	175	-0.06	0.04	0.09	0.06	-0.02	0.03	0.23	0.12
	200	-0.06	0.04	0.08	0.06	-0.02	0.04	0.24	0.11
	225	-0.06	0.04	0.08	0.06	-0.02	0.03	0.25	0.09
	250	-0.06	0.04	0.08	0.06	-0.03	0.04	0.27	0.10
	275	-0.06	0.04	0.08	0.06	-0.02	0.03	0.23	0.09
	300	-0.07	0.04	0.08	0.06	-0.02	0.05	0.22	0.07
	325	-0.07	0.04	0.08	0.06	-0.01	0.05	0.21	0.08
	350	-0.07	0.04	0.08	0.06	0.01	0.05	0.20	0.07
Résilience	150	0.02	0.00	-0.16	0.00	0.11			-0.19
	175	0.02	0.00	-0.15	0.00	-0.04		-0.34	-0.43
	200	0.02	0.00	-0.14	0.00	-0.04		-0.44	-0.15
	225	0.02	0.00	-0.12	0.00	-0.10		-0.43	-0.15
	250	0.02	0.00	-0.09	0.00	-0.07	-0.30	-0.34	-0.07
	275	0.02	0.00	-0.08	0.00	-0.06	-0.50	-0.28	-0.16
	300	0.02	0.00	-0.07	0.00	-0.07		-0.20	-0.17
	325	0.02	0.00	-0.06	0.00	-0.04		-0.26	-0.26
	350	0.02	0.00	-0.05	0.00	-0.02	-0.58	-0.23	-0.05

# ANNEXE J Impact des CC sur la vulnérabilité et la résilience de $Q_{min}$

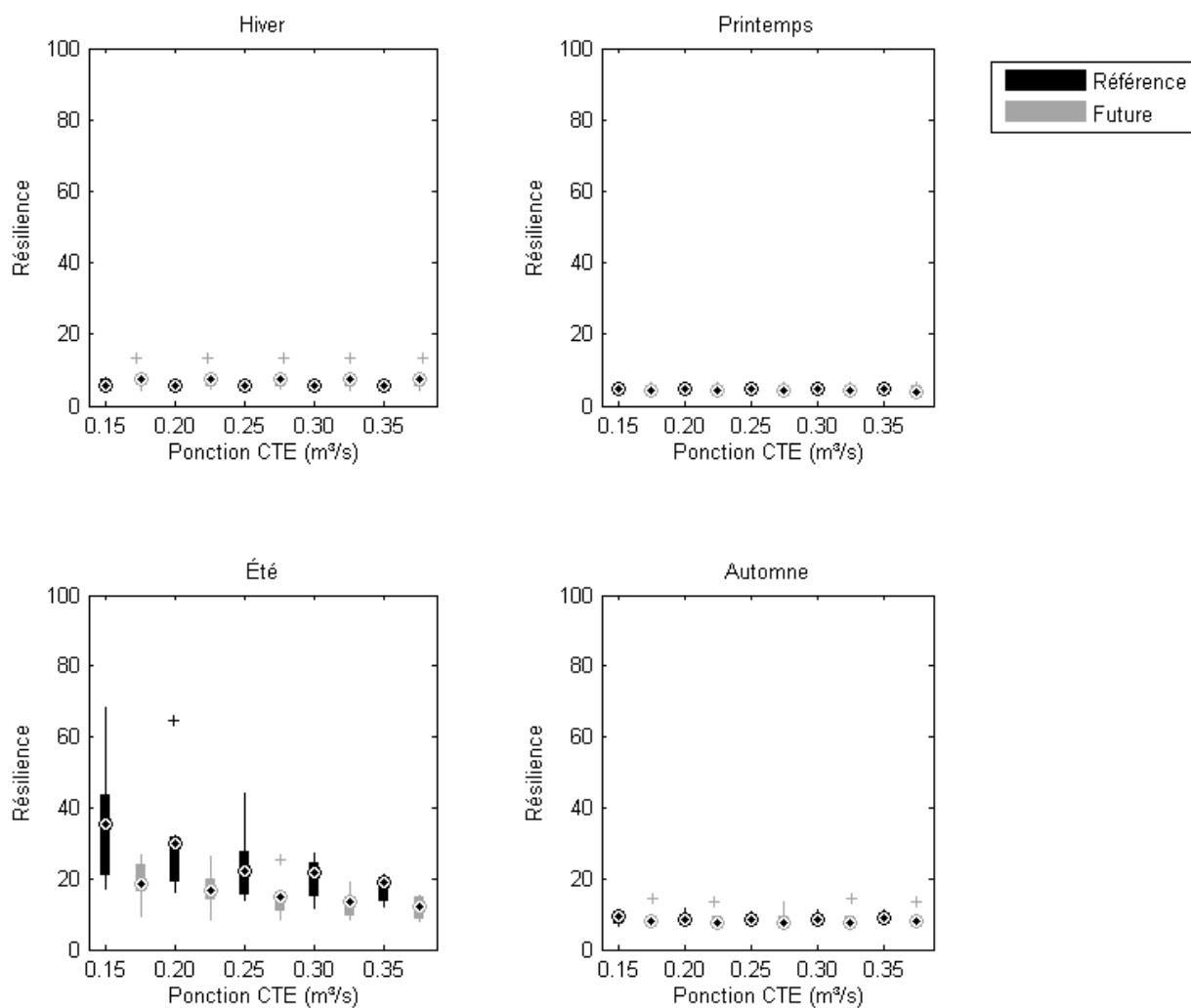


**Figure J.1 - Vulnérabilité sur  $Q_{min}$  à la CTE en période de référence et en période future pour les 4 saisons pour  $Q_{eco1}$**



**Figure J.2 - Vulnérabilité sur  $Q_{min}$  à la CTE en période de référence et en période future pour les 4 saisons pour  $Q_{eco3}$**





**Figure J.3 - Résilience sur  $Q_{min}$  à la CTE en période de référence et en période future pour les 4 saisons pour  $Q_{eco1}$**

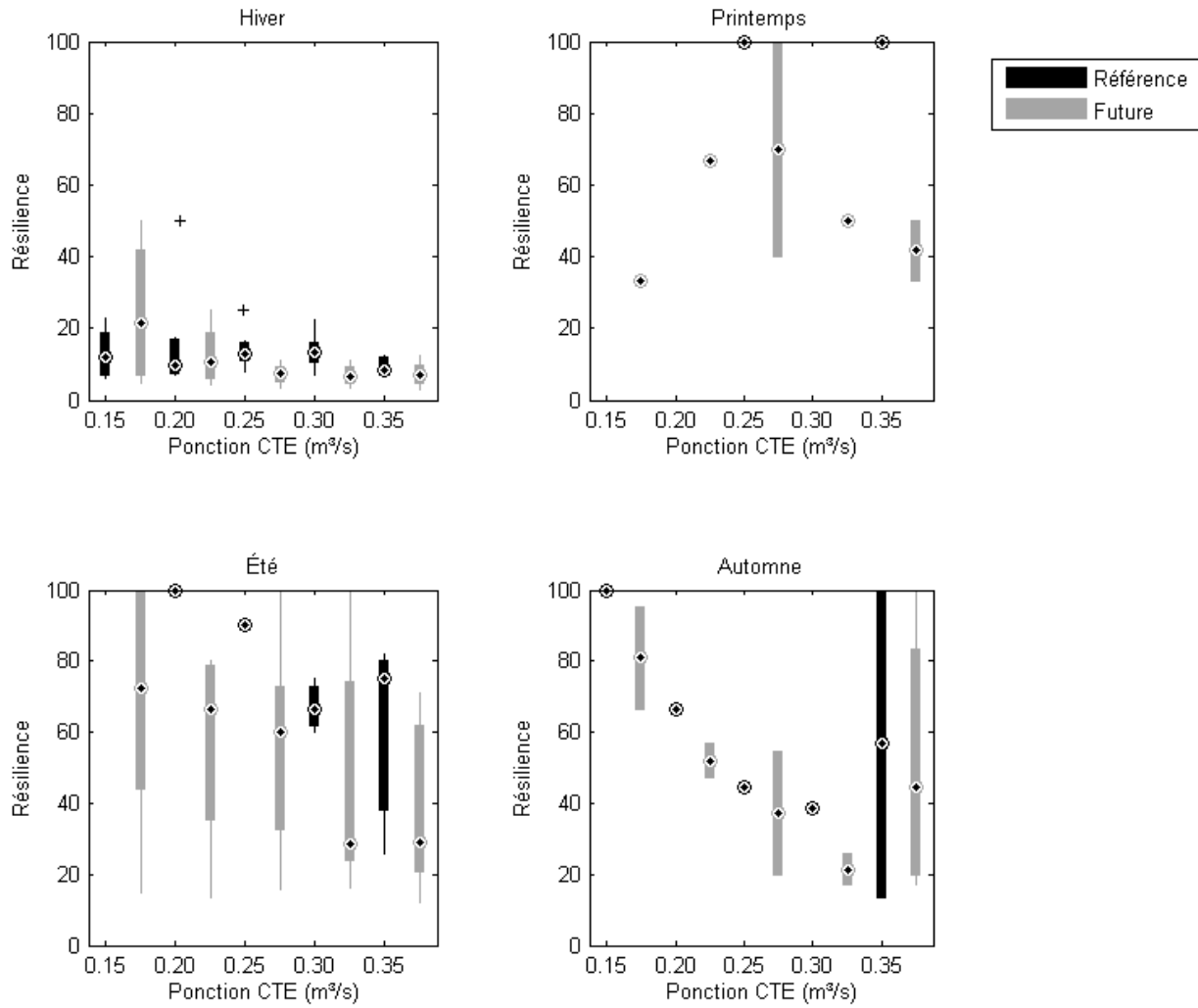


Figure J.4 - Résilience sur  $Q_{min}$  à la CTE en période de référence et en période future pour les 4 saisons pour  $Q_{eco3}$

# ANNEXE K Résultats supplémentaires des méthodes d'adaptations

## K.1 Méthodes d'adaptation 1

Tableau K.1 - Variation des indicateurs de performance due à la méthode d'adaptation 1 pour le débit minimal à la CTE selon la méthode  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco3}$

	Q max	Qeco1				Qeco3			
		Hiver	Prin.	Été	Aut.	Hiver	Prin.	Été	Aut.
Fiabilité	150	-0.02	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	175	-0.02	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	200	-0.02	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	225	-0.02	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	250	-0.02	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	275	-0.02	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	300	-0.02	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	325	-0.02	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	350	-0.02	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Vulnérabilité	150	0.08	-0.03	-0.02	-0.01	-0.04	-0.03	-0.10	-0.13
	175	0.08	-0.03	-0.02	-0.01	-0.05	-0.03	-0.08	-0.11
	200	0.08	-0.03	-0.02	-0.01	-0.05	-0.04	-0.07	-0.11
	225	0.08	-0.03	-0.01	-0.01	-0.05	-0.03	-0.10	-0.09
	250	0.08	-0.03	-0.01	-0.01	-0.05	-0.04	-0.12	-0.09
	275	0.08	-0.03	-0.01	-0.01	-0.05	-0.04	-0.08	-0.07
	300	0.08	-0.03	-0.01	-0.01	-0.06	-0.05	-0.07	-0.06
	325	0.08	-0.03	-0.01	-0.01	-0.06	-0.04	-0.07	-0.05
	350	0.08	-0.03	-0.01	-0.01	-0.08	-0.04	-0.06	-0.04
Résilience	150	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.03		0.12	0.14
	175	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.04		0.10	0.27
	200	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		0.07	0.27
	225	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01		0.05	0.08
	250	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01		0.00	0.07
	275	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01		0.04	0.01
	300	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01		0.01	0.00
	325	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.01	0.56	0.02	0.01
	350	0.00	0.00	0.00	0.00	0.22	0.50	0.03	-0.01

Il est à noter que les critères FVR ne sont pas présentés en pourcentage dans l'annexe.

**Tableau K.2 - Variation des indicateurs de performance due à la méthode d'adaptation 1  
pour le niveau minimal au lac Brome selon la méthode  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco3}$**

	Q max	Qeco1	Qeco3
		Été	Été
Fiabilité	150	0.08	0.08
	175	0.08	0.08
	200	0.08	0.08
	225	0.08	0.08
	250	0.08	0.08
	275	0.08	0.08
	300	0.08	0.08
	325	0.08	0.08
	350	0.08	0.08
Vulnérabilité	150	-0.06	-0.05
	175	-0.06	-0.05
	200	-0.06	-0.05
	225	-0.06	-0.05
	250	-0.06	-0.06
	275	-0.06	-0.06
	300	-0.06	-0.06
	325	-0.06	-0.06
	350	-0.06	-0.06
Résilience	150	0.01	0.01
	175	0.01	0.01
	200	0.01	0.01
	225	0.01	0.01
	250	0.01	0.01
	275	0.01	0.01
	300	0.01	0.01
	325	0.01	0.01
	350	0.01	0.01

## K.2 Méthodes d'adaptation 2

**Tableau K.3 - Variation des indicateurs de performance due à la méthode d'adaptation 2 pour le débit minimal à la CTE selon la méthode  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco3}$**

	Q max	Qeco1				Qeco3			
		Hiver	Prin.	Été	Aut.	Hiver	Prin.	Été	Aut.
Fiabilité	150	0.00	-0.01	0.02	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	175	0.00	-0.01	0.02	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
	200	0.00	-0.01	0.02	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
	225	0.00	-0.01	0.03	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
	250	0.00	-0.01	0.03	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
	275	0.00	-0.01	0.03	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
	300	0.00	-0.01	0.03	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
	325	0.00	-0.01	0.02	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
	350	0.00	-0.01	0.02	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
Vulnérabilité	150	0.00	0.01	-0.01	0.00	-0.05	0.00	0.20	-0.01
	175	0.00	0.01	-0.01	0.00	-0.05	0.00	0.12	0.01
	200	0.00	0.01	-0.01	0.00	-0.01	0.00	0.08	0.02
	225	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.01	0.01	0.09	0.05
	250	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.04
	275	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.07	0.01
	300	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.09	0.02
	325	0.00	0.01	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.06	0.00
	350	0.00	0.01	-0.01	0.00	-0.01	0.01	0.03	-0.01
Résilience	150	0.00	0.01	-0.08	0.01	-0.03	0.17	-0.33	-0.14
	175	0.00	0.01	-0.07	0.01	-0.04	0.00	-0.29	-0.07
	200	0.00	0.01	-0.07	0.01	0.22	-0.33	-0.30	0.27
	225	0.00	0.01	-0.06	0.01	0.05	-0.08	-0.16	-0.09
	250	0.00	0.01	-0.06	0.01	0.00	-0.03	-0.07	0.02
	275	0.00	0.01	-0.05	0.01	0.00	-0.17	-0.25	-0.01
	300	0.00	0.01	-0.05	0.01	0.00	0.00	-0.26	-0.03
	325	0.00	0.01	-0.04	0.01	0.00	0.26	-0.09	-0.20
	350	0.00	0.01	-0.04	0.01	0.00	0.33	-0.06	-0.39

**Tableau K.4 - Variation des indicateurs de performance due à la méthode d'adaptation 2  
pour le niveau minimal au lac Brome selon la méthode  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco3}$**

	Q max	Qeco1	Qeco3
		Été	Été
<b>Fiabilité</b>	150	0.02	0.01
	175	0.02	0.01
	200	0.01	0.01
	225	0.01	0.01
	250	0.01	0.01
	275	0.01	0.01
	300	0.01	0.01
	325	0.01	0.01
	350	0.01	0.01
<b>Vulnérabilité</b>	150	-0.01	-0.01
	175	-0.01	-0.02
	200	-0.01	-0.01
	225	-0.01	-0.02
	250	-0.01	-0.02
	275	-0.01	-0.01
	300	-0.01	-0.01
	325	-0.01	-0.01
	350	-0.01	-0.01
<b>Résilience</b>	150	0.00	0.00
	175	0.00	0.00
	200	0.00	0.00
	225	0.00	0.00
	250	0.00	0.00
	275	0.00	0.00
	300	0.00	0.00
	325	0.00	0.00
	350	0.00	0.00

### K.3 Méthodes d'adaptation 3

Tableau K.5 - Variation des indicateurs de performance due à la méthode d'adaptation 3  
pour le débit minimal à la CTE selon la méthode  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco3}$

	Q max	Qeco1				Qeco3			
		Hiver	Prin.	Été	Aut.	Hiver	Prin.	Été	Aut.
Fiabilité	150	-0.03	0.02	0.02	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
	175	-0.03	0.02	0.03	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
	200	-0.03	0.02	0.03	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
	225	-0.03	0.02	0.03	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
	250	-0.03	0.02	0.03	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
	275	-0.03	0.02	0.03	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
	300	-0.03	0.02	0.03	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
	325	-0.02	0.02	0.03	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
	350	-0.02	0.02	0.03	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
Vulnérabilité	150	0.09	-0.02	-0.03	0.00	-0.04	-0.03	-0.09	-0.14
	175	0.09	-0.02	-0.03	0.00	-0.05	-0.03	-0.08	-0.12
	200	0.09	-0.02	-0.03	0.00	-0.05	-0.04	-0.07	-0.12
	225	0.09	-0.02	-0.03	0.00	-0.05	-0.03	-0.09	-0.10
	250	0.09	-0.02	-0.03	0.00	-0.05	-0.04	-0.11	-0.10
	275	0.08	-0.02	-0.03	0.00	-0.05	-0.04	-0.08	-0.09
	300	0.08	-0.02	-0.03	-0.01	-0.06	-0.05	-0.07	-0.07
	325	0.08	-0.02	-0.03	0.00	-0.06	-0.05	-0.06	-0.07
	350	0.08	-0.02	-0.03	0.00	-0.08	-0.05	-0.05	-0.06
Résilience	150	0.00	0.02	-0.08	0.01	-0.03		-0.51	
	175	0.00	0.02	-0.08	0.01	-0.04		-0.07	
	200	0.00	0.02	-0.08	0.01	0.00		-0.22	0.48
	225	0.00	0.02	-0.06	0.01	-0.01		-0.15	-0.32
	250	0.00	0.02	-0.06	0.01	-0.01		-0.17	0.18
	275	0.00	0.02	-0.05	0.01	-0.01		-0.29	-0.15
	300	0.00	0.02	-0.05	0.01	-0.01		-0.32	-0.11
	325	0.00	0.01	-0.04	0.01	-0.01		-0.03	-0.26
	350	0.00	0.02	-0.04	0.01	-0.02		-0.04	-0.42

**Tableau K.6 - Variation des indicateurs de performance due à la méthode d'adaptation 3  
pour le niveau minimal au lac Brome selon la méthode  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco3}$**

	Q max	Qeco1	Qeco3
		Été	Été
<b>Fiabilité</b>	150	0.09	0.08
	175	0.08	0.08
	200	0.08	0.08
	225	0.08	0.08
	250	0.08	0.08
	275	0.08	0.08
	300	0.08	0.08
	325	0.08	0.08
	350	0.08	0.08
<b>Vulnérabilité</b>	150	-0.07	-0.07
	175	-0.07	-0.07
	200	-0.08	-0.07
	225	-0.08	-0.07
	250	-0.08	-0.07
	275	-0.08	-0.07
	300	-0.08	-0.07
	325	-0.08	-0.07
	350	-0.08	-0.08
<b>Résilience</b>	150	0.01	0.02
	175	0.01	0.01
	200	0.01	0.02
	225	0.01	0.01
	250	0.01	0.02
	275	0.01	0.02
	300	0.01	0.01
	325	0.01	0.01
	350	0.01	0.01



## K.4 Méthodes d'adaptation 4

Il est à noter qu'uniquement les résultats de la méthode d'adaptation 4.2 sont présentés.

**Tableau K.7 - Variation des indicateurs de performance due à la méthode d'adaptation 4 pour le débit minimal à la CTE selon la méthode  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco3}$**

	Q max	Qeco1				Qeco3			
		Hiver	Prin.	Été	Aut.	Hiver	Prin.	Été	Aut.
Fiabilité	150	-0.03	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00
	175	-0.03	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01
	200	-0.03	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01
	225	-0.03	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01
	250	-0.03	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01
	275	-0.03	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01
	300	-0.03	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00
	325	-0.03	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00
	350	-0.03	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01
Vulnérabilité	150	0.09	-0.01	-0.03	-0.02	-0.04	-0.03	-0.09	-0.14
	175	0.09	-0.01	-0.03	-0.02	-0.05	-0.03	-0.08	-0.12
	200	0.09	-0.01	-0.03	-0.02	-0.05	-0.04	-0.07	-0.12
	225	0.09	-0.01	-0.03	-0.02	-0.05	-0.03	-0.09	-0.10
	250	0.09	-0.01	-0.03	-0.02	-0.05	-0.04	-0.11	-0.10
	275	0.09	-0.01	-0.03	-0.02	-0.05	-0.04	-0.08	-0.09
	300	0.09	-0.01	-0.03	-0.02	-0.06	-0.05	-0.07	-0.07
	325	0.09	-0.01	-0.03	-0.02	-0.06	-0.05	-0.06	-0.07
	350	0.09	-0.01	-0.03	-0.02	-0.08	-0.05	-0.05	-0.06
Résilience	150	0.00	0.01	-0.09	0.01	-0.03		-0.51	
	175	0.00	0.01	-0.08	0.01	-0.04		-0.07	
	200	0.00	0.01	-0.08	0.02	0.00		-0.22	0.48
	225	0.00	0.01	-0.06	0.02	-0.01		-0.15	-0.32
	250	0.00	0.01	-0.06	0.01	-0.01		-0.17	0.18
	275	0.00	0.01	-0.05	0.01	-0.01		-0.29	-0.15
	300	0.00	0.01	-0.04	0.01	-0.01		-0.32	-0.11
	325	0.00	0.01	-0.04	0.01	-0.01		-0.03	-0.26
	350	0.00	0.01	-0.04	0.01	-0.02		-0.04	-0.42

**Tableau K.8 - Variation des indicateurs de performance due à la méthode d'adaptation 4  
pour le niveau minimal au lac Brome selon la méthode  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco3}$**

	Q max	Qeco1	Qeco3
		Été	Été
<b>Fiabilité</b>	150	0.10	0.06
	175	0.10	0.06
	200	0.10	0.06
	225	0.10	0.06
	250	0.10	0.06
	275	0.10	0.06
	300	0.10	0.06
	325	0.10	0.06
	350	0.10	0.06
<b>Vulnérabilité</b>	150	-0.04	-0.11
	175	-0.04	-0.11
	200	-0.04	-0.11
	225	-0.03	-0.11
	250	-0.03	-0.11
	275	-0.03	-0.11
	300	-0.03	-0.10
	325	-0.03	-0.10
	350	-0.03	-0.10
<b>Résilience</b>	150	0.01	0.01
	175	0.01	0.01
	200	0.01	0.01
	225	0.01	0.01
	250	0.01	0.01
	275	0.00	0.09
	300	0.00	0.05
	325	0.01	0.06
	350	0.00	0.05

## K.4 Méthodes d'adaptation 5

Tableau K.9 - Variation des indicateurs de performance due à la méthode d'adaptation 5 pour le débit minimal à la CTE selon la méthode  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco3}$

	Q max	Qeco1				Qeco3			
		Hiver	Prin.	Été	Aut.	Hiver	Prin.	Été	Aut.
Fiabilité	150	-0.02	0.04	0.13	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	175	-0.02	0.04	0.14	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
	200	-0.02	0.04	0.14	-0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
	225	-0.02	0.04	0.13	-0.01	0.00	0.00	0.02	0.01
	250	-0.02	0.04	0.12	-0.01	0.00	0.00	0.03	0.01
	275	-0.02	0.04	0.12	-0.01	0.00	0.00	0.04	0.01
	300	-0.02	0.04	0.10	-0.01	0.00	0.00	0.06	0.01
	325	-0.02	0.04	0.09	-0.01	0.00	0.00	0.07	0.01
	350	-0.02	0.04	0.08	-0.01	0.00	0.00	0.08	0.02
Vulnérabilité	150	0.14	-0.03	-0.05	-0.01	0.00	0.00	-0.02	-0.09
	175	0.14	-0.03	-0.06	-0.02	0.00	0.00	-0.02	-0.04
	200	0.13	-0.03	-0.06	-0.01	0.00	0.01	-0.01	-0.02
	225	0.13	-0.03	-0.06	-0.01	0.00	0.01	0.00	0.03
	250	0.13	-0.03	-0.07	-0.01	0.00	-0.01	0.02	0.03
	275	0.13	-0.03	-0.07	-0.02	0.00	-0.01	0.02	0.02
	300	0.13	-0.03	-0.07	-0.02	0.00	-0.02	0.01	0.05
	325	0.13	-0.03	-0.08	-0.02	0.00	-0.02	-0.02	0.04
	350	0.13	-0.03	-0.08	-0.02	0.01	-0.03	-0.04	0.04
Résilience	150	0.00	0.03	0.13	0.01	0.00		0.10	-0.01
	175	0.00	0.03	0.09	0.01	0.17	0.00	0.19	0.06
	200	0.00	0.03	0.05	0.01	0.00		0.27	0.16
	225	0.00	0.03	0.03	0.01	0.13	0.00	0.31	0.33
	250	0.00	0.03	0.02	0.01	0.15	0.28	0.41	0.48
	275	0.00	0.03	0.02	0.01	0.19	0.30	0.46	0.62
	300	0.00	0.03	0.01	0.01	0.23		0.53	0.69
	325	0.00	0.03	0.02	0.01	0.29		0.37	0.68
	350	0.00	0.03	0.02	0.02	0.30		0.14	0.30

**Tableau K.10 - Variation des indicateurs de performance due à la méthode d'adaptation 5  
pour le niveau minimal au lac Brome selon la méthode  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco3}$**

\*Il est à noter qu'uniquement les résultats de la méthode 5.1 sont présentés

	Q max	Qeco1	Qeco3
		Été	Été
<b>Fiabilité</b>	150	0.05	0.06
	175	0.05	0.06
	200	0.05	0.06
	225	0.04	0.06
	250	0.04	0.06
	275	0.04	0.06
	300	0.04	0.05
	325	0.04	0.05
	350	0.04	0.05
<b>Vulnérabilité</b>	150	-0.07	-0.11
	175	-0.07	-0.11
	200	-0.07	-0.11
	225	-0.07	-0.11
	250	-0.07	-0.10
	275	-0.07	-0.10
	300	-0.07	-0.10
	325	-0.07	-0.09
	350	-0.07	-0.09
<b>Résilience</b>	150	0.01	0.09
	175	0.01	0.09
	200	0.01	0.05
	225	0.01	0.04
	250	0.01	0.03
	275	0.01	0.02
	300	0.01	0.02
	325	0.01	0.01
	350	0.01	0.01

## K.4 Méthodes d'adaptation 6

Tableau K.11 - Variation des indicateurs de performance due à la méthode d'adaptation 6 pour le débit minimal à la CTE selon la méthode  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco3}$

	Q max	Qeco1				Qeco3			
		Hiver	Prin.	Été	Aut.	Hiver	Prin.	Été	Aut.
Fiabilité	150	-0.03	0.01	0.05	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
	175	-0.03	0.01	0.05	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00
	200	-0.03	0.01	0.06	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01
	225	-0.03	0.01	0.07	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01
	250	-0.03	0.01	0.07	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01
	275	-0.03	0.01	0.07	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01
	300	-0.03	0.01	0.08	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01
	325	-0.03	0.01	0.08	0.02	0.00	0.00	0.02	0.01
	350	-0.03	0.01	0.08	0.02	0.00	0.00	0.03	0.01
Vulnérabilité	150	0.09	-0.02	-0.04	-0.02	-0.04	-0.03	-0.09	-0.13
	175	0.09	-0.02	-0.03	-0.02	-0.05	-0.03	-0.08	-0.12
	200	0.09	-0.02	-0.03	-0.02	-0.05	-0.04	-0.07	-0.12
	225	0.09	-0.02	-0.03	-0.02	-0.05	-0.03	-0.09	0.04
	250	0.09	-0.02	-0.03	-0.02	-0.05	-0.04	-0.11	0.03
	275	0.08	-0.02	-0.03	-0.02	-0.05	-0.04	-0.07	0.05
	300	0.08	-0.02	-0.04	-0.02	-0.06	-0.05	-0.06	0.08
	325	0.08	-0.02	-0.04	-0.02	-0.06	-0.05	-0.05	0.04
	350	0.08	-0.02	-0.04	-0.02	-0.08	-0.05	-0.03	0.02
Résilience	150	0.00	0.01	0.03	0.01	-0.03		0.14	0.19
	175	0.00	0.01	-0.02	0.01	-0.04		0.15	0.43
	200	0.00	0.01	-0.04	0.01	0.00		0.27	
	225	0.00	0.01	-0.05	0.02	-0.01		0.16	0.15
	250	0.00	0.01	-0.05	0.01	-0.01		0.03	0.34
	275	0.00	0.01	-0.04	0.01	-0.01		-0.23	0.48
	300	0.00	0.01	-0.04	0.01	-0.01		0.09	0.19
	325	0.00	0.01	-0.04	0.01	-0.01		-0.14	0.04
	350	0.00	0.01	-0.03	0.01	-0.02		-0.18	-0.26

**Tableau K.12 - Variation des indicateurs de performance due à la méthode d'adaptation 6  
pour le niveau minimal au lac Brome selon la méthode  $Q_{eco1}$  et  $Q_{eco3}$**

	Q max	Qeco1	Qeco3
		Été	Été
<b>Fiabilité</b>	150	0.10	0.09
	175	0.10	0.09
	200	0.10	0.09
	225	0.10	0.09
	250	0.10	0.09
	275	0.10	0.09
	300	0.10	0.09
	325	0.10	0.09
	350	0.10	0.09
<b>Vulnérabilité</b>	150	-0.02	-0.05
	175	-0.02	-0.05
	200	-0.02	-0.05
	225	-0.02	-0.05
	250	-0.02	-0.05
	275	-0.02	-0.05
	300	-0.02	-0.04
	325	-0.02	-0.04
	350	-0.02	-0.04
<b>Résilience</b>	150	0.01	0.01
	175	0.01	0.01
	200	0.01	0.01
	225	0.01	0.01
	250	0.01	0.01
	275	0.01	0.01
	300	0.01	0.00
	325	0.01	0.00
	350	0.01	0.01

## ANNEXE L Analyse de sensibilité de la ponction en eau brute

Une analyse de sensibilité de la modélisation en eau brute est effectuée dans cette annexe. Pour ce faire, les options de contrôle du tableau L.1 sont considérées. Les observations de l'année 2011 sont comparées avec la ponction simulée de 0.140 m<sup>3</sup>/s. Tel qu'il a été mentionné dans le corps du texte, cette ponction considère les pires évènements journaliers de 2001 à 2011.

**Tableau L.1 - Option de contrôle pour l'analyse de sensibilité**

Options	Valeurs utilisées
Apports du modèle hydrologique	Qactuel
Années de simulation	1971-2000
Débit prélevé à la CTE	0.14 m <sup>3</sup> /s simulé vs observation 2011
Débts réservés écologiques	Qeco1 , Qeco2, Qeco3 et Qeco4
Intervalle de temps et type de gestion	Convention - 3 jours
Période de contrôle	Jour julien 109 à 331

Le tableau L.2 présente les pourcentages de variation de la fiabilité de la ponction simulée par rapport à la ponction observée à la CTE pour les quatre débits réservés écologiques et pour les quatre saisons. Il est possible de voir que la fiabilité est parfois sous-estimée lorsque la ponction simulée est utilisée. Comme la méthode de modélisation retenue est conservatrice, ce résultat est tout à fait normal. Les pourcentages de variation sont

cependant très faibles; la plus grande variation est de -0.45 % et elle se produit l'été pour la méthode de débit réservé écologique 4.

**Tableau L.2 - Variation de la fiabilité de la ponction simulée par rapport à la ponction observée**

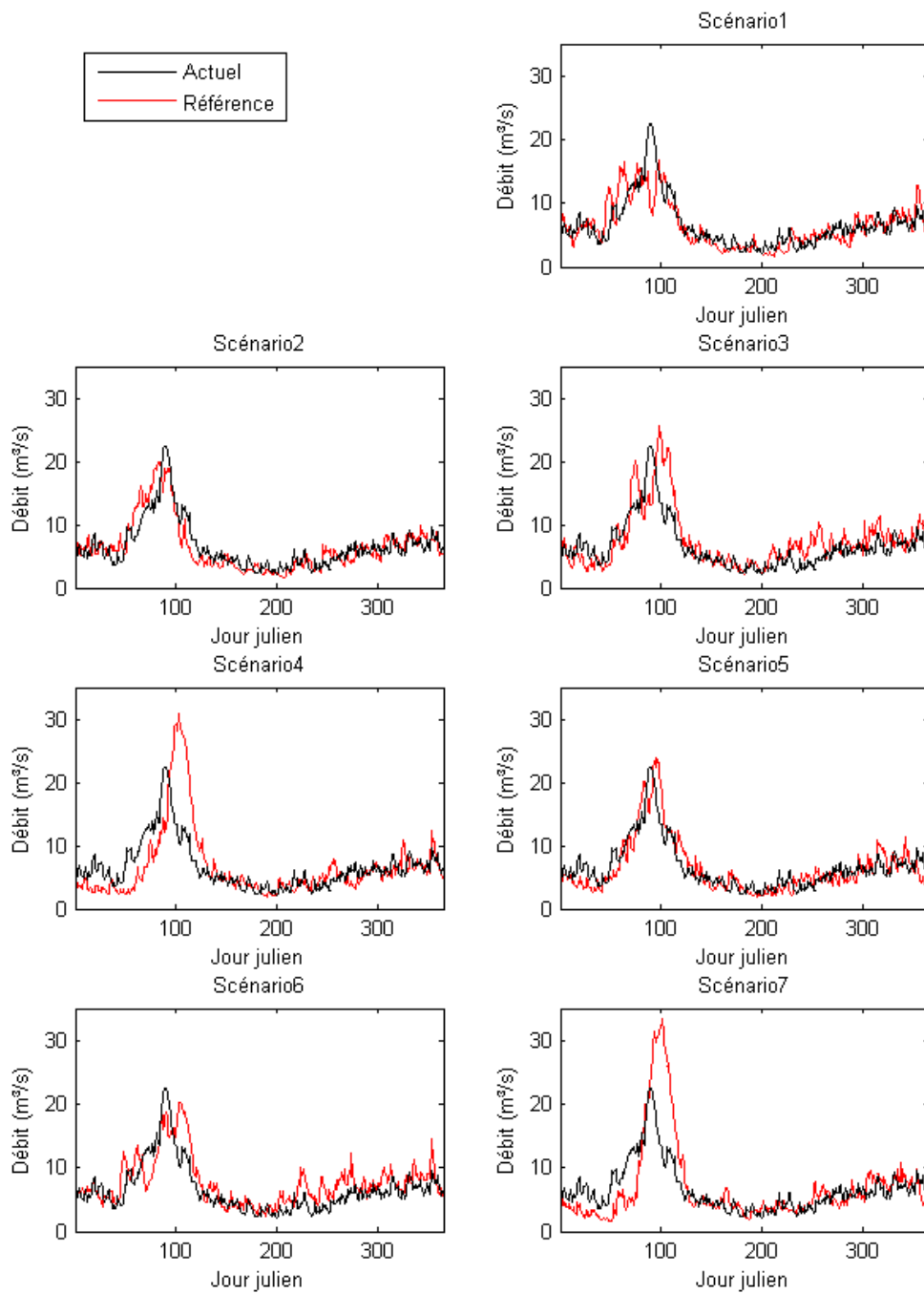
	Hiver	Printemps	Été	Automne
<b>Qeco1</b>	-0.14%	0.00%	-0.32%	-0.15%
<b>Qeco2</b>	-0.15%	-0.43%	-0.32%	-0.18%
<b>Qeco3</b>	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
<b>Qeco4</b>	0.00%	-0.13%	-0.45%	0.00%



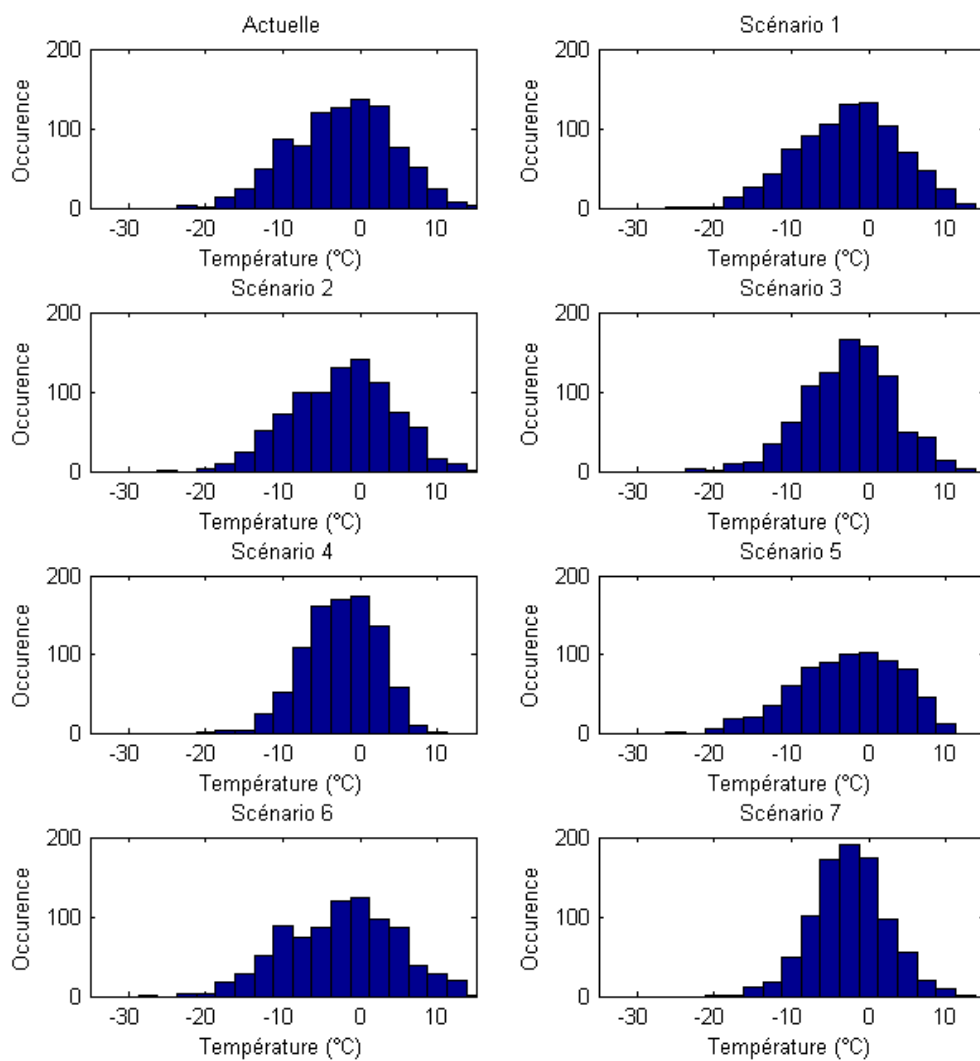
## ANNEXE M Décalage de la crue de la période de référence

À la figure 5.3, il est possible de remarquer que la crue de la période référence est décalée par rapport à crue de la période actuelle. La pointe est également plus forte. Pour expliquer cette observation, il est nécessaire de consulter les hydrogrammes moyens pour chaque scénario séparément. Ils sont présentés à la figure M.1. Ainsi, il est possible de voir qu'uniquement les crues des scénarios 4 et 7 sont décalées et de plus grandes amplitudes. Pour ces deux mêmes scénarios, il est également possible d'observer que les débits en hiver sont inférieurs pour la période de référence.

La figure M.2 présente la distribution des températures pour le mois de mars à la station 725453 pour la période actuelle (en haut à gauche ) et pour la période de référence selon les 7 scénarios. Il est possible d'observer une variation des températures inférieure par rapport à la période actuelle pour les scénarios 4 et 7. Ce phénomène se répète pour les mois de décembre, janvier et février. La moins grande variation de température en période hivernale entraîne moins de redoux, donc moins de fonte. Cela explique les débits hivernaux inférieurs. Le nombre inférieur de redoux implique également qu'au printemps, le couvert neigeux a un plus grand volume. Au mois de mars, le moment où la fonte débute pour la période actuelle, très peu de journées des scénarios 4 et 7 ont une température supérieure à 0 °C par rapport à la période actuelle. Ce phénomène, combiné au couvert neigeux plus imposant, donc qui prend plus de temps à se réchauffer, décale la crue. Les températures pour la fonte sont majoritairement atteintes en avril. À ce moment, le volume est plus grand : ceci explique la forte pointe de la crue de la période de référence à la journée 100 pour les scénarios 4 et 7.



**Figure M.1 - Hydrogrammes de la période actuelle et de la période de référence  
des scénario 1 à 7**



**Figure M.2 - Distribution des précipitations du mois de mars pour la période actuelle et pour la période de référence des 7 scénarios**



## LISTE DES RÉFÉRENCES

- Actu-Environnement (2013). Dictionnaire Environnement. [http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire\\_environnement/definition.php4](http://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition.php4) (page consultée le 3 août 2013 ).
- Agriculture et Agroalimentaire Canada (2013). Inventaire des terres du Canada. <http://sis.agr.gc.ca/siscan/nsdb/cli/index.html> (page consultée le 5 juillet 2013 ).
- Anctil, F., Rouselle, J. et Lauzon, N. (2005). *Hydrologie : Cheminement de l'eau*. Presses internationales Polytechnique, Montréal, Canada, 317 p.
- Anderson, J. L., Balaji, V., Broccoli, A. J., Cooke, W. F., Delworth, T. L., Dixon, K. W., Donner, L. J., Dunne, K. A., Freidenreich, S. M., Garner, S. T., Gudgel, R. G., Gordon, C. T., Held, I. M., Hemler, R. S., Horowitz, L. W., Klein, S. A., Knutson, T. R., Kushner, P. J., Langenhost, A. R., Lau, N., Liang, Z., Malyshev, S. L., Milly, P. C. D., Nath, M. J., Ploshay, J. J., Ramaswamy, V., Schwarzkopf, M. D., Shevliakova, E., Sirutis, J. J., Soden, B. J., Stern, W. F., Thompson, L. A., Wilson, R. J., Wittenberg, A. T. et Wyman, B. L. (2004). The new GFDL global atmosphere and land model AM2-LM2: Evaluation with prescribed SST simulations. *Journal of Climate*, volume 17, numéro 24, p. 4641-4673.
- Belzile, L., Bérubé, P., Huang, V. D. et Leclerc, M. (1997). *Méthode écohydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec* (Rapport technique). INRS-Eau et Groupe-conseil Génivar inc., Québec, Canada, 83 p.
- Bennis, S., Côté, S. et Kang, N. (1996). Validation des données hydrométriques par des techniques multivariées de filtrage. *Canadian Journal of Civil Engineering*, volume 23, numéro 1, p. 218-230.
- Bergeron, D., Bougie, L., Desaulniers, É et Rousseau, N. (2008). *Prélèvement de l'eau harmonisé avec l'équilibre écologique de la rivière Yamaska* (Rapport technique). Ski Bromont inc., Bromont, Canada, 35 p.
- Bérubé, J. (2007). *Évaluation d'un indice de pression sur les approvisionnements municipaux en eau potable au Québec à l'aide d'une méthode de régionalisation des débits d'étiage*. Mémoire de maîtrise, INRS-ETE, Québec, Québec, 113 p.

- Besré, F. (2010). *Modélisation des débits au lac Brome phase 1: Méthode des bassins voisins* (Rapport technique). UQAM, Montréal, Canada, 37 p.
- Beven, K. (2001). How far can we go in distributed hydrological modelling? *Hydrology and Earth Systems Science*, volume 5, numéro 1, p. 1-12.
- Brière, F. G. (2006). *Distribution et collecte des eaux*, 2<sup>ième</sup> édition. Presses internationales polytechniques, Montréal, Canada, 399 p.
- Bullock, A. et Acreman, M. (2003). The role of wetlands in the hydrological cycle. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, volume 7, numéro 3, p. 358-389.
- Carriere, A., Barbeau, B. et Cantin, J. (2007). Vulnerability of drinking water treatment plants to low water levels in the St. Lawrence River. *Journal of Water Resources Planning and Management*, volume 133, numéro 1, p. 33-38.
- Caya, D. et Laprise, R. (1999). A semi-implicit semi-Lagrangian regional climate model: the Canadian RCM. *Monthly Weather Review*, volume 127, numéro 3, p. 341-62.
- CEHQ (2003). Guide sommaire des méthodes d'estimation des débits d'étiage pour le Québec. <http://www.cehq.gouv.qc.ca/debit-etiage/methode/index.htm> (page consultée le 21 avril 2014).
- CEHQ (2012). Historique des niveaux et des débits de différentes stations hydrométriques. <http://www.cehq.gouv.qc.ca/hydrometrie/index.htm> (page consultée le 15 novembre 2012 ).
- CEHQ (2013). *Atlas hydroclimatique du Québec méridional - Impacts des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050* (Rapport technique). CEHQ, Québec, Canada, 51 p.
- Chen, J., Brissette, F. P. et Leconte, R. (2011). Uncertainty of downscaling method in quantifying the impact of climate change on hydrology. *Journal of Hydrology*, volume 401, numéro 3-4, p. 190-202.
- Cheng, C. S., Auld, H., Li, Q. et Li, G. (2011). Possible impacts of climate change on extreme weather events at local scale in south-central Canada. *Climatic Change*, volume 112, numéro 3, p. 963-979.
- Collins, W. D., Bitz, C. M., Blackmon, M. L., Bonan, G. B., Bretherton, C. S., Carton, J. A., Chang, P., Doney, S. C., Hack, J. J., Henderson, T. B., Kiehl, J. T., Large, W. G., McKenna, D.
-

- S., Santer, B. D. et Smith, R. D. (2006). The Community Climate System Model Version 3 (CCSM3). *Journal of Climate*, volume 19, numéro 11, p. 2122-43.
- Dillon, P. (2005). Future management of aquifer recharge. *Hydrogeology Journal*, volume 13, numéro 1, p. 313-316.
- Duan, Q. Y., Gupta, V. K. et Sorooshian, S. (1993). Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. *Journal of Optimization Theory and Applications*, volume 76, numéro 3, p. 501-521.
- Eaucéa (2007). *Détermination des volumes prélevables sur le périmètre du Sage Cher-amont* (Rapport technique). Eaucéa inc., Toulouse, France, 63 p.
- Eheart, J. W. et Tornil, D. W. (1999). Low-flow frequency exacerbation by irrigation withdrawals in the agricultural midwest under various climate change scenarios. *Water Resources Research*, volume 35, numéro 7, p. 2237-2246.
- El Jabi, N. et Rouselle, J. (1990). *Hydrologie fondamentale*. Presses internationales polytechniques, Montréal, Canada, 279 p.
- Environnement Canada (2012). Archives nationales d'informations et de données climatologiques. [http://www.climat.meteo.gc.ca/Welcome\\_f.html](http://www.climat.meteo.gc.ca/Welcome_f.html) (page consultée le 15 novembre 2012 ).
- État du Vermont (1993). *Agency procedure for determining acceptable minimum stream flows*. Department of Environmental Protection, Vermont, USA, 6 p.
- Exall, K. (2004). A review of water reuse and recycling, with reference to Canadian practice and potential: 2. Applications. *Water Quality Research Journal of Canada*, volume 39, numéro 1, p. 13-28.
- Faouzi, B., Saad, B. et Gagnon, L. (1996). Validation des données hydrométriques par des techniques univariées de filtrage. *Canadian Journal of Civil Engineering*, volume 23, numéro 4, p. 872-892.
- Faouzi, B., Malika, K. et Saad, B. (2003). Validation en temps réel des données hydrométriques. *Canadian Journal of Civil Engineering*, volume 30, numéro 1, p. 212-225.
- Faune et Parcs Québec (1999). *Politique de débits réservés écologiques pour la protection du poisson et de ses habitats*. Direction de la faune et des habitats, Québec, Canada, 23 p.
-

- Flato, G., Boer, G., Robitaille, D. Y., Lee, W. G., Merryfield, W. et Saenko, O. (2005). The Third Generation Coupled Global Model Climate. Dans Environnement Canada, <http://www.ec.gc.ca/ccmac-cccma/default.asp?n=1299529F-1> (page consultée le 3 juillet 2013 ).
- Fortin, L., Turcotte, R., Pugin, S., Cyr, J. et Picard, F. (2007). Impact of climate changes on the management plans for Saint-Francois and Aylmer lakes in the south of Quebec; Impact des changements climatiques sur les plans de gestion des lacs Saint-Francois et Aylmer au sud du Quebec. *Canadian Journal of Civil Engineering*, volume 34, numéro 8, p. 934-945.
- Géobase (2011a). Couverture du sol. <http://www.geobase.ca/geobase/fr/data/landcover/index.html> (page consultée le 3 juillet 2013 ).
- Géobase (2011b). Données numériques d'élévation du Canada. <http://www.geobase.ca/geobase/fr/data/cded/index.html> (page consultée le 3 juillet 2013 ).
- GIEC (2007). *Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse* (Rapport scientifique). GIEC, Genève, Suisse, 114 p.
- Gordon, C., Cooper, C., Senior, C. A., Banks, H., Gregory, J. M., Johns, T. C., Mitchell, J. F. B. et Wood, R. A. (2000). The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments. *Climate Dynamics*, volume 16, numéro 2-3, p. 147-68.
- Gupta, J. et van der Zaag, P. (2008). Interbasin water transfers and integrated water resources management: Where engineering, science and politics interlock. *Physics and Chemistry of the Earth*, volume 33, numéro 1-2, p. 28-40.
- Haan, C. T. (1977). *Statistical methods in hydrology*, 2<sup>ième</sup> édition. The Iowa State University Press, Ames, Iowa, 378 p.
- Hamilton, A. J., Stagnitti, F., Xianzhe, X., Kreild, S. L., Benke, K. K. et Maher, P. (2007). Wasterwater irrigation : The state of Play. *Vadoze Zone Journal*, volume 6, numéro 4, p. 823-840.
-



- Hashimoto, T., Stedinger, R. S. et Loucks, P. D. (1982). Reliability, Resiliency, and Vulnerability Criteria For Water Resource System Performance Evaluation. *Water Resources Research*, volume 18, numéro 1, p. 14-20.
- Hingray, B., Picouet, C. et Musy, A. (2009). *Hydrologie 2, Une science pour l'ingénieur*, Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, Suisse, 600 p.
- Konikow, L. F. et Kendy, E. (2005). Groundwater depletion: A global problem. *Hydrogeology Journal*, volume 13, numéro 1, p. 317-320.
- Labadie, J. W. (2004). Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, volume 130, numéro 2, p. 93-111.
- Lacey, J., Leconte, R., Cabana, H., Haguma, D., Dupuis, M. et Hassani, T. (2011). *Projet préliminaire de modélisation de l'écoulement et de caractérisation des eaux du lac Brome et du sous-bassin versant Quilliams* (Rapport scientifique). Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada, 41 p.
- Loucks, P. D. et van Beek, E. (2005). *Water Resources Systems Planning and Management : An introduction to methods, models and applications*. UNESCO, Paris, France, 680 p.
- Mearns, L. O., Gutowski, W., Jones, R., Leung, R., McGinnis, S., Nunes, A. et Qian, Y. (2009). A Regional Climate Change Assessment Program for North America. *Eos*, volume 90, numéro 36, p. 311-312.
- Medellín-Azuara, J., J. Harou, J., A. Olivares, M., Madani, K., R. Lund, J., E. Howitt, R., K. Tanaka, S., W. Jenkins, M. et Zhu, T. (2008). Adaptability and adaptations of California's water supply system to dry climate warming. *Climatic Change*, volume 87, numéro 1, p. 75-90.
- Minville, M., Krau, S., Brissette, F. et Leconte, R. (2010). Behavior and Performance of a Water Resource System in Québec (Canada) Under Adaptated Operating Policies in a Climate Change Context. *Water Resources Management*, volume 24, numéro 7, p. 1333-1352.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, volume 50, numéro 3, p.885-900.
-

- Muttiah, R. S. et Wurbs, R. A. (2002). Modeling the impacts of climate change on water supply reliabilities. *Water International*, volume 27, numéro 3, p. 407-419.
- Nantel, È. (2006). *Élaboration d'une méthode d'estimation des vulnérabilités historiques des approvisionnements en eau potable au Québec*. Mémoire de maîtrise, INRS-ETE, Québec, 145 p.
- OBV Yamaska (2013). La Yamaska, c'est notre eau, c'est nous tous. <http://www.obv-yamaska.qc.ca/> (page consultée le 8 juillet 2013 ).
- Okotoks (2011). *Water Management Plan* (Rapport technique). Ville Okotoks, Okotoks, Canada, 31 p.
- Osseyrane, M., Rivard, G., Kouadio, P., Lanoue, M. et Rouleau, S. (2011). *Guide de gestion des eaux pluviales : Stratégies d'aménagement, principes de conception et pratiques de gestion optimales pour les réseaux de drainage en milieu urbain*. Gouvernement du Québec, Québec, 433 p.
- Ouranos (2013). Foire aux questions. <http://www.ouranos.ca/fr/faq/> (page consultée le 5 septembre 2013 ).
- Paquin, J. (2000). *Developpement d'algorithmes pour l'analyse des series temporelles des donnees de production d'eau potable*. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada,
- Payne, J. T., Wood, A. W., Hamlet, A. F., Palmer, R. N. et Lettenmaier, D. P. (2004). Mitigating the effects of climate change on the water resources of the Columbia River Basin. *Climatic Change*, volume 62, numéro 1-3, p. 233-56.
- Perreault, L., Bobée, B., Roy, R. et Mathier, L. (1995). La combinaison de modèles appliquée à la validation en temps réel des apports naturels aux réservoirs hydriques. *Canadian Journal of Civil Engineering*, volume 22, numéro 5, p. 934-944.
- Perrin, C., Michel, C. et Andreassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, volume 279, numéro 1-4, p. 275-289.
- Ponce, V. M. et Lindquist, D. S. (1990). Management of baseflow augmentation : A review. *Journal of the American Water Resources Association*, volume 26, numéro 2, p. 259-268.
-

- Pope, V. D., Gallani, M. L., Rowntree, P. R. et Stratton, R. A. (2000). The impact of new physical parametrizations in the Hadley Centre climate model: HadAM3. *Climate Dynamics*, volume 16, numéro 2-3, p. 123-46.
- PRECIS (2011). The PRECIS Regional climate system modelling. Gouvernement du Royaume-Unis, <http://www.metoffice.gov.uk/precis/> (page consultée le 17 juillet 2013 ).
- Renaissance Lac Brome. (2014). Barrage Foster, <http://renaissancelbl.com/barrage-foster/> (page consultée le 18 avril 2014).
- Rivard, C., Vigneault, H., Piggott, A. R., Larocque, M. et Anctil, F. (2009). Groundwater recharge trends in Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, volume 46, numéro 11, p. 841-854.
- Rousseau, A. N., Mailhot, A., Slivitzky, M., Villeneuve, J., Rodriguez, M. J. et Bourque, A. (2004). Consumption and provisioning of water in Southern Quebec. Level of the knowledges and lines of research favored from the point of view of changes in climate; Usages et approvisionnement en eau dans le sud du Quebec Niveau des connaissances et axes de recherche a privilegier dans une perspective de changements climatiques. *Canadian Water Resources Journal*, volume 29, numéro 2, p. 121-134.
- Schaefli, B., Hingray, B. et Musy, A. (2007). Climate change and hydropower production in the Swiss Alps: quantification of the potential impacts and related modelling uncertainties. *Hydrology and Earth System Sciences*, volume 11, numéro 3, p. 1191-1205.
- Schmidli, J., Frei, C. et Vidale, P. L. (2006). Downscaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods. *International Journal of Climatology*, volume 26, numéro 5, p. 679-89.
- Simonovic, S. P. et Li, L. (2003). Methodology for Assesment of Climate Change Impacts on Large-Scale Flood Protection system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, volume 129, numéro 5, p. 361-371.
- Skamarock, B., Michalakes, J., Wang, W., Derber, J., Barker, D., Bruyere, C., Davis, C., Brown, J., Dudhia, J., Grell, G. et Chen, F. (2010). Weather Research and Forecasting model. Dans WRF, <http://wrf-model.org/index.php> (page consultée le 2 août 2013 ).
- Smakhtin, V. (2001). Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, volume 240, numéro 3, p. 147-186.
-

- Statistique Canada (2007). Profils des communautés de 2006. Dans Statistique Canada, <http://www12.statcan.ca/census-recensement/2006/dp-pd/prof/92-591/index.cfm?Lang=F> (page consultée le 18 juin 2012 ).
- SWAT (2013). Documentation. <http://swat.tamu.edu/documentation/> (page consultée le 13 juillet 2013 ).
- Tharme, R. E. (2003). A global perspective on environmental flow assesment: Emerging trends in the developement and application of envrionmental flow methodologies for rivers. *River research and application*, volume 19, numéro 5, p. 397-441.
- Thomas, B., Steidl, J., Dietrich, O. et Lischeid, G. (2011). Measures to sustain seasonal minimum runoff in small catchments in the mid-latitudes: A review. *Journal of Hydrology*, volume 408, numéro 3–4, p. 296-307.
- US Santa Cruz (2013). Regional Climate Model version 3. <http://gforge.ictp.it/gf/> (page consultée le 15 août 2013 ).
- Verstraeten, W. W., Muys, B., Feyen, J., Veroustraete, F., Minnaert, M., Meiresonne, L. et De Schrijver, A. (2005). Comparative analysis of the actual evapotranspiration of Flemish forest and cropland, using the soil water balance model WAVE. *Hydrology and Earth System Sciences*, volume 9, numéro 3, p. 225-241.
- Voie navigables de France. (2014). Lexique, [http://www.vnf.fr/vnf/lexique.vnf?action=theme&ID\\_word=6992&ID\\_theme=9211](http://www.vnf.fr/vnf/lexique.vnf?action=theme&ID_word=6992&ID_theme=9211) (page consultée de 18 avril 2014).
- White, F. M. (2008). *Fluid Mechanics*, 6<sup>ième</sup> édition. McGraw-Hill, New York, États-Unis, 864 p.
- Xu, D. et Mermoud, A. (2003). Modeling the soil water balance based on time-dependent hydraulic conductivity under different tillage practices. *Agricultural Water Management*, volume 63, numéro 2, p. 139-151.
- Zeestraten, C. (2012). *Élaboration d'un système d'alerte aux étiages à l'échelle du bassin versant de la rivière Yamaska au Québec*. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Canada, 109 p.
- Zhang, Y. et Schilling, K. E. (2006). Increasing streamflow and baseflow in Mississippi River since the 1940 s: Effect of land use change. *Journal of Hydrology*, volume 324, numéro 1-4, p. 412-422.
-

