

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Faculté de génie

Département de génie civil et de génie du bâtiment

Modélisation du régime hydrologique en fonction des  
milieux humides et riverains dans un contexte de  
changements climatiques

Rapport final de projet présenté au  
COBARIC

Par

Robert Leconte, ing., PhD, Professeur

et

Mohammad Bizhanimanzar, PhD, stagiaire postdoctoral

Septembre 2020

## Table de matières

Table de matières .....	2
1. Introduction.....	7
1.1 Mise en contexte .....	7
1.2 Mandat et objectif .....	8
2. Revue de littérature .....	9
3. Sélection du modèle hydrologique pour modélisation de la dynamique des milieux humides .....	11
4. Modélisation des milieux humides avec SWAT .....	13
4.1 Approche originale.....	13
4.2 Structure révisée de SWAT pour la modélisation explicite des milieux humides .....	16
4.2.1 Processus ‘inter-fill-spill’ .....	16
4.2.2 Évapotranspiration modifiée .....	17
5. Caractéristiques de bassin versant de la rivière Chaudière .....	18
5.1 Topographie .....	18
5.2 Climat.....	18
5.3 Utilisation du territoire.....	21
6. Méthodologie .....	24
6.1 Construction du modèle SWAT pour le bassin de la rivière Chaudière .....	24
6.2 Traitement des milieux humides .....	25
6.2.1 Classification des milieux humides.....	25
6.2.2 Reconstruction des limites de l'URH .....	26
6.2.3 Agrégation des milieux humides riverains à l'échelle du sous-bassin versant .....	27
6.2.4 Paramétrisation des milieux humides dans le modèle hydrologique SWAT-révisé .....	27
6.3 Calibration et validation du modèle .....	28
6.4 Élaboration des scénarios d'aménagement du territoire .....	31
6.4.1 Scenario 1 : Statu quo.....	32
6.4.2 Scénario 2 : Milieux humides acceptables (zéro perte nette) .....	33
6.4.3 Scénario 3 : Milieux humides efficaces .....	34
6.5 Scénarios de changements climatiques .....	36
7. Résultats .....	37
7.1 Calage et validation du modèle SWAT-révisé.....	37
7.2 Réduction des débits de crues par les milieux humides pour différentes périodes de retour ( $Q_2$ ans, $Q_{10}$ ans, $Q_{50}$ ans et $Q_{100}$ ans): étude de cas des sous-bassins versants Famine et Beurivage....	42
7.3 Effet des milieux humides sur le régime de débits mensuels des sous-bassins versants .....	43
7.4 Identification de l'emplacement et de la typologie optimaux des milieux humides pour la réduction des inondations: étude de cas de la rivière Famine .....	46
7.5 Changements climatiques : impact des changements climatiques sur la dynamique du débit des sous-bassins Famine, Beurivage, Basse, Haute et Moyenne Chaudière .....	50
7.6 L'effet de différents scénarios d'utilisation du territoire sur les débits de crues sans / avec effet des changements climatiques .....	55
7.6.1 Évolution des débits maximums annuels pour différents scénarios d'occupation du sol sous des conditions de climat actuel.....	55

7.6.2 Évolution du changement de $Q_2$ à $Q_{350}$ dans différents scénarios d'utilisation du territoire sans et avec l'effet des changements climatiques .....	58
8. Conclusion et recommandations .....	67
9. Références.....	71

## Liste des tableaux

Tableau 5-1. Superficie (km <sup>2</sup> ) des différentes classes d'occupation du sol (sauf pour les milieux humides) pour chaque secteur du bassin versant de la Chaudière selon la carte du MDDELCC 2016 (Bissonnette et al., 2016). Les superficies des milieux humides sont calculées à partir de la carte des milieux humides potentiels (MHP) version 2019. -----	21
Tableau 6-1. Superficie en km <sup>2</sup> (% sous-bassin) de milieux humides isolés et riverains dans les secteurs du bassin versant de la Chaudière selon la carte milieux humides potentiels (MELCC, 2019). -----	26
Tableau 6-2. Stations hydrométriques (CEHQ) -----	29
Tableau 6-3. Paramètres utilisés pour calage du modèle. -----	30
Tableau 6-4. Plage initiale des paramètres utilisés pour calage -----	31
Tableau 6-5. Liste des scénarios identifiés avec le CLS et l'ACP dans le cadre du projet FCM/ACA pour le bassin versant de la rivière Chaudière. -----	32
Tableau 6-6. Changement de Superficie (km <sup>2</sup> ) des différentes classes d'occupation du sol entre le scénario statu quo et le <i>Baseline</i> . Les symboles + et - signifient gain et perte de superficie, respectivement. -----	33
Tableau 6-7. Changement de Superficie (km <sup>2</sup> ) des différentes classes d'occupation du sol entre le scénario 2 et le <i>Baseline</i> . Les symboles + et - signifient respectivement gain et perte de superficie. -	34
Tableau 6-8. Choix de modification de typologie d'utilisation du territoire pour chaque mesure du scénario 3. -----	35
Tableau 6-9. Changement de superficie (km <sup>2</sup> ) des différentes classes d'occupation du sol entre le scénario 3 et le <i>Baseline</i> . Les symboles + et - signifient respectivement gain et perte de superficie. -	36
Tableau 6-10. Caractéristiques des scénarios des changements climatiques de CORDEX utilisés dans le projet -----	36
Tableau 7-1. Critères d'évaluation du modèle hydrologique pour les principaux sous-bassins de la rivière Chaudière. -----	37
Tableau 7-2. Caractéristiques des scénarios hypothétiques des milieux humides. -----	49
Tableau 7-3. Débits (médiane) des crues pour la période de référence (médiane) et variation en pourcentage dans les horizons 1 et 2. Les valeurs positives et négatives représentent respectivement l'augmentation et la réduction des débits. -----	54
Tableau 7-4. Ampleur des débits des crues sous différentes périodes de retour pour les scénarios d'occupation du territoire de statu quo et <i>Baseline</i> et les pourcentages de variation pour les scénarios 2 et 3. Une valeur négative (positive) représente une réduction (augmentation) des débits de crues. ---	60
Tableau 7-5. Résumé de l'effet des changements climatiques et de l'utilisation des terres sur l'ampleur des pics de crue des sous-bassins, couvrant les récurrences de 2 ans à 50 ans. -----	66

## Liste des figures

Figure 5-1. Classification de régime climatiques de bassin versant Chaudière selon (Gerardin & McKenney, 2001). La région 11 correspond au climat de type modéré, sub-humide. La partie nord-est de la région 12 correspond au climat subpolaire, sub-humide. La partie sud-est de la région 9 correspond au climat subpolaire-doux, sub-humide. ....	19
Figure 5-2. Modèle numérique d'élévation du bassin versant de la Chaudière avec localisation des stations météorologiques. La division du bassin versant en différents secteurs est également illustrée. ....	20
Figure 5-3. Variation mensuelle (en moyenne) des précipitations dans les stations météorologiques. Les noms et l'emplacement des stations sont affichés dans la Figure 5-2. ....	22
Figure 5-4. Variation mensuelle des températures maximale (en moyenne) dans les stations météorologiques. Les noms et l'emplacement des stations sont affichés dans la Figure 5-2. ....	23
Figure 5-5. Variation mensuelle des températures minimale (en moyenne) dans les stations météorologiques. Les noms et l'emplacement des stations sont affichés dans la Figure 5-2. ....	23
Figure 6-1. (a) Milieux humides potentiels du bassin versant de la Chaudière ainsi que leur classification en (b) milieux humides riverains et (c) isolés indiquée pour la zone dans l'encadré. ....	25
Figure 6-2. (a) Carte des URH délimités pour un sous-bassin du bassin versant de la Chaudière et (b) carte des HRU reconstitués pour le même sous-bassin en tenant compte de la zone de drainage des milieux humides isolés. Les couleurs de la figure (b) montrent les zones de drainage associées à chaque milieu humide isolé (illustrées en violet). ....	26
Figure 6-3. (a) Les milieux humides riverains (vert) avant agrégation et (b) après agrégation à l'échelle d'un sous-bassin. Des polygones violets montrent les milieux humides isolés. ....	27
Figure 7-1. Débits journaliers simulés et observés pour les périodes de calage et de validation pour le sous-bassin Famine .....	38
Figure 7-2. Débits journaliers simulés et observés pour les périodes de calage et de validation pour le secteur Basse Chaudière .....	39
Figure 7-3. Débits journaliers simulés et observés pour les périodes de calage et de validation pour le sous-bassin Beaurivage .....	40
Figure 7-4. Débits journaliers simulés et observés pour les périodes de calage et de validation pour le secteur Haute Chaudière .....	41
Figure 7-5. Débits journaliers simulés et observés pour les périodes de calage et de validation pour le secteur Moyen Chaudière .....	41
Figure 7-6. Augmentation (en pourcentage) de l'ampleur des débits des crues (par rapport à la référence) dans différents scénarios de couverture des zones humides pour les sous-bassins versants Famine et Beaurivage. ....	43
Figure 7-7. Variation relative (par rapport à la référence) des débits moyens mensuels pour les sous-bassins Famine et Beaurivage dans différents scénarios de couverture des milieux humides .....	44
Figure 7-8. Débit maximal saisonnier pour le sous-bassin versant Famine pour différents scénarios de couverture des milieux humides .....	45
Figure 7-9. Débit maximal saisonnier pour le bassin versant Beaurivage pour différents scénarios de couverture des milieux humides .....	45
Figure 7-10. Contributions mensuelles (en pourcentage) des eaux souterraines et du ruissellement de surface aux débits sortants dans les sous-bassins versants Famine et Beaurivage .....	46
Figure 7-11. Les huit scénarios hypothétiques de milieux humides ainsi que le scénario sans milieux humides. Les taches rouges et vertes représentent respectivement les milieux humides isolés et riverains. ....	47
Figure 7-12. Débit maximal annuel de différents scénarios de couverture des milieux humides. Voir le texte pour la description des acronymes. ....	48
Figure 7-13. Indice spécifique des milieux humides pour les scénarios hypothétiques de milieux humides montré dans Figure 7-11. ....	50

Figure 7-14. Hydrogrammes (moyennes journalières) des sous-bassins versants de la rivière Chaudière pour les horizons climatiques futurs proche (bleu) et lointain (rouge). .....	51
Figure 7-15. Débit maximal annuel des sous-bassins versants du bassin versant Chaudière dans les horizons climatiques futurs proche (bleu) et lointain (rouge). .....	52
Figure 7-16. Variation de l'amplitude des débits des crues des sous-bassins par rapport à la période de référence pour l'horizon H1 (2021-2050) en bleu et H2 (2041-2070) en rouge. ....	53
Figure 7-17. Variation saisonnière relative (par rapport à la période de référence) des débits mensuels des sous-bassins versants dans les horizons climatiques futurs proche (bleu) et loin (rouge). .....	55
Figure 7-18. Comparaison des débits annuels maximaux des sous-bassins versants dans différents scénarios d'utilisation des terres présentés à la section 6.4. ....	56
Figure 7-20. Variation de l'amplitude des débits des crues des sous-bassins pour les scénarios 2 et 3 par rapport à l'utilisation du territoire <i>Baseline</i> à l'horizon 1 (2021-2050). Les valeurs + et - signifient respectivement augmentation et diminution des débits des crues par rapport au <i>Baseline</i> .....	62
Figure 7-21. Variation de l'amplitude des débits des crues des sous-bassins pour les scénarios 2 et 3 par rapport à l'utilisation du territoire <i>Baseline</i> sous l'horizon 2 (2041-2070).....	64

## 1. Introduction

### 1.1 Mise en contexte

Les milieux humides sont définis comme un élément naturel offrant une variété de services hydro-écologiques qui profitent à la société. Ils agissent comme un régulateur naturel du débit, stockent l'eau pendant les périodes de débit élevé et soutiennent le débit de base pendant les périodes de faible débit. Ils contribuent également au maintien de la recharge en eau des eaux souterraines, à la protection des berges et peuvent agir comme "bassin de rétention" en zone urbaine contrôlant alors le ruissellement des eaux pluviales.

En ce qui concerne la qualité de l'eau, de nombreuses études ont montré une amélioration de la qualité de l'eau en présence des milieux humides. Ceux-ci piègent les sédiments transportés vers la source d'eau en aval (lac ou rivière) (Liu et al., 2008; Yang et al., 2010).

Les milieux humides sont également bénéfiques dans le contexte d'adaptation aux changements climatiques car elles stockent une grande quantité de carbone et peuvent considérablement réduire les émissions de gaz à effet de serre. Une étude récente sur la quantification du stockage du carbone à l'échelle du territoire du Québec a montré qu'en moyenne, le stockage du carbone dans les tourbières est 9 fois plus important que dans les forêts (100,0 kg C/m<sup>2</sup> contre 10,9 kg C/m<sup>2</sup> pour les forêts), ce qui montre l'intérêt de les intégrer dans les plans d'aménagement futurs du territoire (Garneau & Van Bellen, 2016).

Malgré ces avantages, les perturbations anthropiques telles que les activités agricoles extensives et le développement urbain ont été les principaux facteurs de stress dans la dégradation des milieux humides. À l'échelle mondiale, il a été rapporté qu'environ la moitié des milieux humides ont été perdues (Zedler et Kercher, 2005). Au Québec, il a été estimé qu'environ 6081 km<sup>2</sup> de milieux humides ont été perturbés au cours des 50 dernières années, ce qui représente une perte de 3,7 % , en excluant des perturbations dues aux activités minières (qui sont pourtant significatives dans les régions de l'Abitibi-Témiscamingue, de la Côte-Nord et du Nord-du-Québec) et du développement résidentiel (qui est plus important dans le sud de la province) (Pellerin & Poulin, 2013) . Les perturbations sont remarquablement différentes pour la région du Bas-Saint-Laurent, où 40 à 80 % des milieux humides situés dans les terres agricoles et les zones urbaines ont disparu depuis le début de la colonisation européenne (Pellerin & Poulin, 2013).

Afin de ralentir la perte de milieux humides et hydriques au Québec, le gouvernement du Québec a sanctionné en juin 2017 son projet de loi n<sup>o</sup>132 intitulé '*Loi concernant la conservation des milieux humides et hydriques*' (Gouvernement du Québec, 2017). Cette loi oblige les MRC à élaborer et mettre en œuvre un plan régional des milieux humides et hydriques (PRMHH) à l'échelle de leur territoire dans une perspective de gestion intégrée de l'eau pour tout bassin versant concerné. Les organismes de bassins versant du Québec sont donc touchés par cette loi puisqu'ils doivent produire un état de référence à intégrer dans leur plan directeur de gestion l'eau avec des objectifs clairs de conservation, restauration et création des milieux humides et hydriques. Les MRC devront ensuite consulter ces états de référence pour produire leur PRMHH.

C'est dans ce contexte que le Comité de bassin de la rivière Chaudière (COBARIC) désire obtenir un état de référence pour les milieux humides du bassin versant de la rivière Chaudière qui rencontre les fonctions écologiques de régulation du niveau d'eau pour la réduction des risques d'inondations ainsi que de l'atténuation des impacts des changements climatiques sur

les régimes hydrologiques. Le COBARIC a confié au département de génie civil et de génie du bâtiment de l'Université de Sherbrooke le mandat mettre en œuvre un modèle hydrologique du bassin versant de la rivière Chaudière dans le but d'étudier l'efficacité des milieux humides du bassin versant pour réduire le risque d'inondations. La modélisation hydrologique spatialisée constitue l'outil privilégié pour établir cet état de référence et permettra d'investiguer différentes stratégies d'intervention sur le territoire, comme la constitution/ restauration des milieux humides pour réduire les risques d'inondations en climat actuel et futur.

## **1.2 Mandat et objectif**

Ce projet vise à étudier l'efficacité des milieux humides du bassin versant de la Chaudière dans la réduction des débits des crues à l'aide d'une approche de modélisation hydrologique spatialisée. Le modèle hydrologique SWAT (*Soil Water Assessment Tool*) (Neitsch et al., 2011a) avec une représentation améliorée de milieux humides a été construit de manière à simuler l'influence de milieux humides sur le régime hydrologique local et régional dans le bassin versant de la rivière Chaudière. Le projet est divisé en cinq étapes principales, dont la description de chacune des étapes et les résultats associés sont détaillés plus loin dans ce rapport. Ces étapes sont :

- 1- Sélection du modèle hydrologique pour la modélisation des milieux humides
- 2- Traitement des milieux humides dans le modèle hydrologique
- 3- Calage et validation du modèle
- 4- Rôle des milieux humides sur le régime hydrologique
- 5- Impact des changements climatiques

Les livrables du projet sont :

- 1- Modèle hydrologique de la rivière Chaudière calibré et validé par apport des stations hydrométriques observés avec considération explicite des milieux humides
- 2- Rapport d'analyse des résultats

## 2. Revue de littérature

Dans cette section, une brève revue des recherches antérieures sur l'évaluation du rôle des milieux humides dans la réduction des inondations est présentée. L'efficacité des milieux humides pour la réduction des inondations peuvent varier en fonction de leur taille, du type et état de la végétation et sol, pente, emplacement du milieux humides dans le bassin (EPA, 2006).

L'histoire des recherches sur le rôle de réduction des crues des milieux humides remonte à 1972, où dans l'étude sur la lutte contre les inondations de la rivière Charles (Massachusetts), la Nouvelle-Angleterre, Corps des ingénieurs aux Etats-Unis a déterminé que la perte de 40% des milieux humides du bassin augmenteraient la niveau d'inondation de 2 pieds et la perte de tous les milieux humides augmenteraient la niveau d'inondation de 5 pieds (US Corps of Enginners, 1972). Dans un autre recherche, Malcolm, 1979 a rapporté qu'environ 1/3 du volume des inondations sur la rivière Souris dans le Nord du Dakota pourrait être attribuée aux pertes de milieux humides. Une autre étude sur la rivière Vermillion dans sud du Dakota par (Johnson, 1997) trouvé la restauration des milieux humides pour être efficace pour contrôler les pics d'inondation du bassin versant. Des conclusions similaires ont été rapporté par des études de (Bedinger, 1981),(Walton et al., 1996), (Hey & Philippi, 1995) et (Novitzki, 1978) confirmant l'efficacité de la réduction des inondations des milieux humides. Au Canada, le recherche menée par (Hillman, 1998) sur un petit cours d'eau dans le centre de l'Alberta a révélé que le débit en aval de la milieu humide correspondait à 6% du débit de pointe en amont (0,953 m<sup>3</sup>/s en aval, contre 15 m<sup>3</sup>/s en amont de la zone humide) montrant une grande atténuation des inondations capacité des milieux humides.

Dans une autre recherche, (Simonovic & Juliano, 2001) a étudié le rôle des milieux humides dans les inondations à basse fréquence dans le bassin versant de la rivière Rat, dans le sud-est du Manitoba, à l'aide de modèle HEC-HMS. Trois scénarios, avec l'augmentation des milieux humides, ont été effectuées à partir des données de 1997. Les résultats constatent qu'avec une augmentation de la superficie milieux humides, une réduction du volume total des crues pourrait être accompli.

Dans une autre recherche sur la région des prairies, Pomeroy et al., 2014 ont étudié l'effet de différents extension de milieux humides de 1958 à 2008 (milieux humides existaient en 1958 couvrant environ 24% de la superficie du bassin et ils couvrant environ 11% de la superficie en 2008) et dégradation complète de milieux humides sur les débits crues et volume annuel d'eau de bassin Smith Cree en Saskatchewan en en utilisant de la modèle *Prairie Hydrologic Model* (Shook et al., 2013). Les résultats ont révélé que les volumes annuels d'eau et les débits des crues sont fortement sensibles à l'existence de milieux humides, car le drainage complète des milieux humides peut augmenter de manière significative (200% à 300%) le volume annuel d'eau pendant les années à débit modéré à faible. Concernant l'ampleur du débit des crues, une augmentation entre 150% et 350% est à prévoir. Ils ont conclu que la conservation des milieux humides dans ce bassin versant avait un effet notable sur la limitation de débits de crues et du volume des inondations.

Dans une autre étude sur les bassins versants de Bécancour (les milieux humides couvrent 12% de la superficie du bassin versant) et de la Yamaska (les milieux humides couvrent 4% du bassin versant),(M. Fossey & Rousseau, 2016), ont constaté que les milieux humides peuvent

réduire les  $Q_2$ ,  $Q_{20}$  et  $Q_{100}$  à 18%, 16% et 14% pour Bécancour et 6% pour le bassin versant de Yamsaka. En comparant les résultats simulés dans les conditions climatiques actuelles et futures, ils ont conclu que la conservation de milieux humides pour le bassin versant de la Bécancour semble insuffisante pour maintenir les débits élevés actuels ( $Q_{20}$  et  $Q_{100}$ ) et, ainsi, compenser l'augmentation attendue due aux changements climatiques. Pour le bassin versant Yamaska, les résultats suggèrent qu'ils atténueraient les débits de crues réduits causés par l'effet des changements climatiques.

Tandis que les chercheurs susmentionnés affirment la capacité d'atténuation des inondations des milieux humides, il existe d'autres recherches montrant une faible réduction des inondations par les milieux humides s'il y en a. Un bon exemple est les milieux humides d'amont du bassin *Grassland Research Catchment* au Zimbabwe étudiées par (McCartney, 2000). Ils ont constaté qu'une nappe phréatique très peu profonde (moins de 50 cm) dans les milieux humides cause que le mécanisme de ruissellement par saturation complète de sol (*saturation excess runoff*) est le principal mécanisme de ruissellement du bassin versant. Ayant une nappe phréatique très peu profonde, les milieux humides ont peu de capacité d'absorber les précipitations entrantes et la nappe phréatique peut remonter jusqu'à la surface du sol quelques minutes après la pluie créant le ruissellement. Des conclusions similaires rapporté par (Holden & Burt, 2003) étudiant le processus hydrologique dans les tourbières de couverture de la réserve naturelle nationale de Moor House (NNR), en Angleterre, où 70% du bassin versant est couvert par des tourbières.

(Bullock & Acreman, 2003) après une synthèse de la littérature existante sur l'effet des milieux humides sur les inondations, indiquent qu'environ 80% des études suggèrent milieux humides de la plain inondables ont réduit les inondations, mais environ 41% des études sur les milieux humides en amont ont indiqué que ces milieux humides augmentent des inondations car elles ont tendance à être saturées et à acheminer rapidement les précipitations vers le fleuve. Ils conclure que l'emplacement des milieux humides, la topographie et la morphologie des milieux humides, les caractéristiques du sol telles que la conductivité hydraulique, l'état d'humidité du sol et les pratiques de gestion telles que l'enlèvement de la végétation ou le maintien d'un faible niveau d'eau dans les milieux humides pendant la saison des inondations peuvent considérablement modifier la capacité de stockage des milieux humides pendant les périodes d'inondation.

### **3. Sélection du modèle hydrologique pour modélisation de la dynamique des milieux humides**

Du point de vue de la modélisation hydrologique, les recherches antérieures sur la modélisation des zones humides peuvent être classées en quatre groupes: 1) modèle hydrologique et hydraulique couplé 2) modélisation des zones humides à l'aide d'un modèle physique des eaux souterraines 3) modèles hydrologiques conceptuels localisés et 4) hydrologique semi-distribué modèle: Le premier et le deuxième groupes nécessitent beaucoup de données, car la carte hydrogéologique détaillée du bassin versant ainsi qu'une carte topographique à résolution fine et la géomorphologie de la rivière et des zones humides associées sont utilisées pour simuler l'échange de flux entre les zones humides et d'autres éléments tels que rivières et aquifères. Le processus d'étalonnage est souvent impliqué dans l'étalonnage de plusieurs paramètres afin de reproduire l'étendue des crues et les débits observés. Le fait d'avoir un modèle hydraulique à base physique couplé à un modèle hydrologique permet de représenter l'échange de flux à petite échelle entre la zone humide des plaines inondables et la rivière. Dans le deuxième groupe, un modèle physique des eaux souterraines est exploité pour simuler la naissance dynamique de nappes phréatiques dans les zones humides. À l'instar du premier groupe, la topographie à petite échelle et les propriétés hydrogéologiques de l'aquifère ainsi que les hydrogrammes des puits d'observation et la distribution spatiale de la zone humide sont des intrants nécessaires de cette approche de modélisation. Contrairement aux deux premiers groupes, les milieux humides de la troisième approche de modélisation sont agrégés à l'échelle du sous-bassin hydrographique. HEC-1 et son successeur HEC-HMS sont deux modèles largement utilisés de ce groupe (référence). Le principal avantage des modèles de cette catégorie est leur efficacité computationnelle. Cependant, étant donné qu'aucune distinction n'est établie entre les zones humides isolées et les zones humides riverains ou connectées, ce qui limite leur application dans l'étude de l'effet de chaque zone humide sur l'hydrologie des bassins versants. Le dernier groupe de modèles sont des modèles hydrologiques semi-distribués qui sont conçus pour des études de marécages à l'échelle du bassin versant. Hydrotel et SWAT sont deux exemples largement utilisés de cette approche de modélisation. Les zones humides dans cette approche de modélisation sont classées en zones humides isolées ou riveraines / plaines inondables. Les zones humides isolées reçoivent le ruissellement de surface et souterrain des zones de drainage des hautes terres et la perte par infiltration et évapotranspiration. Cependant, les zones humides riveraines sont en échange constant avec le réseau fluvial correspondant. Ce type de modèles hydrologiques est utilisé pour modéliser le processus hydrologique des zones humides isolées à l'échelle des unités de réponse hydrologique (HRU) et des zones humides riveraines agrégées à l'échelle du sous-bassin sans nécessiter les informations détaillées des deux premières approches de modélisation. Cette catégorie présente un grand intérêt pour ce projet car nous visons plutôt à modéliser le rôle des milieux humides sur l'atténuation des risques d'inondation à la vente de l'ensemble du bassin versant de la Chaudière et de ses principales sous-zones où seule la localisation géospatiale des milieux humides est connue et les caractéristiques des milieux humides individuels requises pour le paramétrage à l'échelle locale dans le modèle hydrologique n'est pas possible.

Alors qu'Hydrotel et SWAT partagent une formulation similaire dans la modélisation des zones humides isolées et riveraines, il existe peu de différences clés entre elles. Tout d'abord, SWAT

est un modèle open-source qui permet de modifier le code source. De plus, des modifications peuvent être encore étendues pour la modélisation des avantages de la qualité de l'eau des zones humides telles que l'atténuation du volume de sédiments / pesticides transportés vers le plan d'eau en aval. De plus, une structure de modélisation des zones humides améliorée de SWAT peut être importée dans le modèle SWAT-MODFLOW pour une meilleure représentation de l'écoulement des eaux souterraines dans le bilan hydrique des zones humides. Sur la base de ces avantages, le modèle hydrologique SWAT avec une représentation améliorée du module des zones humides sera utilisé dans ce projet. La description de la formulation du modèle est donnée au chapitre 4.

#### 4. Modélisation des milieux humides avec SWAT

SWAT est un modèle hydrologique semi-distribué largement utilisé pour examiner les impacts des activités humaines et des facteurs de stress climatiques et environnementaux sur l'hydrologie, les cycles des nutriments et les charges de pesticides dans les bassins versants (Neitsch et al., 2011b). SWAT subdivise un bassin versant en sous-bassins versants et ensuite en les Unités de Réponse Hydrologique Homogène (URHH) qui sont les combinaisons uniques de classe d'utilisation des terres, type de sol et de topographie. SWAT simule les cycles de l'eau et des nutriments à l'échelle de l'individu URHH et les agrégées à l'échelle de sous-bassin versant puis au bassin versant via des processus de routage d'eau (Lee et al., 2018).

##### 4.1 Approche originale

Dans SWAT, les milieux humides sont modélisés par deux modules conceptuellement différents ce soit : "*pothole*" et "*wetland*" (Evenson et al., 2016). Les *potholes* qui sont représentés à l'échelle de l'URHH, sont de petites retenues d'eau formées dans les zones mal-drainées et loin du réseau hydrologique (Neitsch et al., 2011b) (voir figure 4-1). Un tel isolement du réseau hydrologique fait en sorte que le ruissellement de surface généré dans ces zones ne coule pas directement vers le réseau hydrique et ils ont plus ou moins rempli par l'eau durant l'année. Les *potholes* sont utilisés pour représenter les milieux humides isolés pour lesquelles le bilan hydrique est défini comme:

$$V = V_{sotred} + V_{flow,in} - V_{flow,out} + V_{pcp} - V_{evap} - V_{seep} \quad (4-1)$$

où  $V$  ( $m^3$ ) est le volume d'eau existant dans le milieu humide à la fin de jour,  $V_{sotred}$  ( $m^3$ ) est le volume d'eau stocké dans le milieu humide au début de jour,  $V_{flow,in}$  ( $m^3$ ) est le volume d'eau entrant dans le milieu humide pendant le jour,  $V_{flow,out}$  ( $m^3$ ) est le volume d'eau sortant de milieu humide pendant le jour,  $V_{pcp}$  ( $m^3$ ) est le volume de précipitations tombant sur le milieu humide pendant le jour,  $V_{evap}$  ( $m^3$ ) est le volume retiré de l'eau par évaporation pendant le jour et  $V_{seep}$  ( $m^3$ ) est le volume d'eau s'infiltrant de la base de milieu humide.

L'eau entrant dans le nid-de-poule un jour donné peut provenir de UHRU dans lequel le nid-de-poule est situé. La variable IPOT (dans les fichiers .hru) est définie pour spécifier si le UHRU contient un nid-de-poule et la variable POT\_FR (dans les fichiers .hru) spécifie la fraction de l'eau de surface du UHRU qui s'écoule dans le nid-de-poule. De cette façon, les UHRU contenant les nids-de-poule sont spécifiées et le modèle achemine la fraction du ruissellement de surface vers le nid-de-poule et le reste jusqu'à la portée du sous-bassin. Par conséquent, l'afflux total dans le nid de poule pour un nid de poule est calculé comme suit :

$$V_{inflow} = fr_{pot,hru} \times 10 \times A_{hru}(Q_{surf,hru}) \quad (4-2)$$

où  $fr_{pot,hru}$  (-) est la fraction du ruissellement de surface généré qui s'écoule dans le nid-de-poule,  $A_{hru}$  ( $m^2$ ) est le UHRU contenant le nid-de-poule,  $Q_{surf,hru}$  (mm) est le ruissellement de surface total généré dans UHRU.

La surface du nid-de-poule est une variable qui est nécessaire pour le calcul de volume d'eau rentre dans le milieu humide par la précipitation ainsi que la quantité d'évaporation et d'infiltration. En supposant une forme de cône pour le nid-de-poule, la surface varie en fonction

de la variation du volume d'eau stockée dans le nid-de-poule et est calculée comme suit (Neitsch et al., 2011b) :

$$SA = \frac{\pi}{10^4} \left( \frac{3V}{\pi \times Slp} \right)^{2/3} \quad (4-3)$$

où  $SA$  (ha) est la surface du nid-de-poule,  $V$  (m<sup>3</sup>) est le volume d'eau dans le nid-de-poule et  $Slp$  (m/m) est la pente de la UHRU.

Ayant la surface du nid de poule, volume de précipitations tombant sur le milieu humide est calculée comme (Neitsch et al., 2011b) :

$$V_{pcp} = 10 \times R_{day} \times SA \quad (4-4)$$

où  $V_{pcp}$ (m<sup>3</sup>) est le volume d'eau ajouté au *pothole* par les précipitations,  $R_{day}$  (mm) est la quantité de précipitations tombant , et est  $SA$  (ha) la surface de milieu humide.

Le volume d'eau perdu par infiltration à travers le fond du *pothole* est calculé en fonction de la teneur en eau pour la couche de sol sous le *pothole*,  $SW$  (-), la conductivité hydraulique de la couche de sol sous le *pothole*,  $K_{sat}$  (mm/hr), superficie de milieu humide,  $SA$  (ha), et la capacité du champ de couche de sol,  $FC$  (-) et calculé comme (Neitsch et al., 2011b) :

$$V_{seep} = 240 \times K_{sat} \times SA \quad si \quad SW < 0.5FC \quad (4-5)$$

$$V_{seep} = 240 \times \left( 1 - \frac{SW}{FC} \right) K_{sat} \times SA \quad si \quad 0.5FC \leq SW < FC \quad (4-6)$$

$$V_{seep} = 0 \quad si \quad SW \geq FC \quad (4-7)$$

Dans les équations 4-5 à 4-7, on suppose que la quantité d'humidité du sol de la couche de sol sous *pothole* détermine s'il y a une infiltration à travers le fond de *pothole*. L'augmentation du niveau d'humidité du sol réduit l'ampleur de l'infiltration de sorte que pour l'humidité du sol au-dessus de la capacité du champ, aucune infiltration à travers le fond du nid de poule ne se produit.

La quantité d'évaporation de *pothole* est calculée en fonction de indice de foliaire de la végétation qui croit dans le *pothole*,  $LAI$  (-), indice de surface foliaire auquel aucune évaporation de l'eau de surface du *pothole* ne se produit (la perte d'eau est uniquement due à la transpiration de la végétation poussant dans le *pothole*),  $LAI_{evap}$ (-), superficie du *pothole*,  $SA$  (ha), et de l'évapotranspiration potentielle,  $E_0$ (mm) comme (Neitsch et al., 2011b) :

$$V_{evap} = 5. \left( 1 - \frac{LAI}{LAI_{evap}} \right) . E_0 . SA \quad (4-8)$$

Dans le cas où le volume d'eau stocké dans le *pothole* dépasse sa capacité volumique ( $V_{max}$ ), l'excès d'eau s'écoule vers le réseau hydrique. Par conséquent, le  $V_{flow,out}$  dans l'équation 4-1 est calculé comme suit:

$$V_{flow,out} = V \quad si \quad V > V_{max} \quad (4-9)$$

Contrairement au nid-de-poule, le module *wetland* de SWAT est représenté à l'échelle des sous-bassins. Le module avec sa formulation originale ou avec ses modifications récentes a été utilisé pour la modélisation des zones humides riveraines (Lee et al., 2018, 2019; Liu et al., 2008; Martinez-Martinez et al., 2014). La différence entre la formulation originale et modifiée est la possibilité d'un échange de flux bilatéral entre le milieu humide et la rivière, ce qui n'est pas le cas dans la formulation d'origine (les milieux humides riverains reçoivent le ruissellement de surface, le flux latéral du sol et les eaux souterraines de la fraction du sous-bassin). Dans ce projet, nous avons utilisé la formulation originale du module *wetland* de SWAT pour la modélisation des milieux humides riverains car la plupart des milieux humides riveraines du bassin versant de la Chaudière sont connectées à des cours d'eau intermittents de premier ordre pour lesquels l'échange de flux bilatéral est peu probable comme discuté par (Lee et al., 2019) . De plus, les milieux humides situés dans les milieux agricoles (secteur Basse Chaudière et Beauvillage) sont reliés à des fossés artificiels afin de drainer les milieux humides vers les cours d'eau locaux (échange d'écoulement unidirectionnel des milieux humides vers la rivière) pour lesquelles les échanges bilatérale est peu probable (Lee et al., 2019).

Comme pour les milieux humides isolées, le bilan hydrique pour les milieux humides riverains est défini comme l'équation 4-1. La superficie d'une milieu humide riveraine est définie en fonction de son volume d'eau stockée comme (Neitsch et al., 2011b) :

$$SA = \beta \cdot V^\alpha \quad (4-10)$$

où  $SA$  (ha) est la surface de milieu humide,  $V$  ( $m^3$ ) est le volume d'eau stocké dans le milieu humide et  $\alpha$  (-) et  $\beta$  ( $m^{-1}$ ) sont déterminés par les équations suivantes en utilisant d'informations de deux points connus dans relations surface-volume de milieu humide (Neitsch et al., 2011b) :

$$\alpha = \frac{\log(A_{wet,max}) - \log(A_{wet,nor})}{\log(V_{wet,max}) - \log(V_{wet,nor})} \quad (4-11)$$

$$\beta = \frac{A_{wet,max}}{V_{wet,max}^\alpha} \quad (4-12)$$

où  $A_{wet,max}$  et  $A_{wet,nor}$  sont les superficies et  $V_{wet,max}$  et  $V_{wet,nor}$  sont les volumes de milieu humide lorsqu'il est rempli jusqu'au niveau maximum et normal, respectivement. Le volume d'eau ajouté à la zone humide par précipitation est calculé comme indiqué dans l'équation 4-4.

Contrairement au *pothole*, l'eau entrant dans le milieu humide riverain est la somme du ruissellement de surface, de l'écoulement latéral du sol et de l'écoulement des eaux souterraines des UHRU du sous-bassin:

$$V_{inflow} = fr_{wet} \times 10 \times (A_{sub} - SA)(Q_{surf} + Q_{gw} + Q_{lat}) \quad (4-13)$$

où  $fr_{wet}$  (-) est la fraction de la superficie du sous-bassin drainant dans la zone humide,  $A_{sub}$  (ha) est la zone du sous-bassin et  $SA$  (ha) est la surface de la milieu humide riverain calculé par l'équation 4-10.

Le volume d'eau perdu par évaporation,  $V_{evap}$  ( $m^3$ ), est une fonction de l'évapotranspiration potentielle  $E_0$  (mm), la superficie de la milieu humide,  $SA$  (ha), est coefficient d'évaporation,  $\eta$  (-) :

$$V_{evap} = 10. \eta. E_0. SA \quad (4-14)$$

Le volume d'eau perdu par infiltration du fond de milieu humide riverain,  $V_{seep}$  ( $m^3$ ), est calculé de la même manière que l'équation 4-5 expliqué pour le *pothole* en fonction de la conductivité hydraulique saturée du milieu humide riveraine,  $K_{sat}$  (mm/hr), et de sa superficie,  $SA$  (ha).

Le milieu humide s'écoule vers le réseau hydrique, si le volume stockage dépasse le stockage normal de milieu humide et est calculé comme :

$$V_{flow,out} = 0 \quad si \quad V < V_{wet,nor} \quad (4-15)$$

$$V_{flow,out} = \frac{V - V_{wet,nor}}{10} \quad si \quad V_{wet,nor} \leq V \leq V_{wet,max} \quad (4-16)$$

$$V_{flow,out} = V - V_{wet,max} \quad si \quad V > V_{wet,max} \quad (4-17)$$

## 4.2 Structure révisée de SWAT pour la modélisation explicite des milieux humides

Nous avons utilisé une version modifiée de SWAT pour une meilleure représentation des milieux humides isolés du bassin versant de la Chaudière. Les modifications initialement importées par (Evenson et al., 2016) dans la version 627 du code source. En bref, les modifications portent sur deux aspects de la modélisation des milieux humides isolées: 1) l'incorporation d'une processus '*inter-fill-spill*' pour une meilleure représentation de l'interaction spatiale entre les milieux humides isolées et les paysages entourant 2) le calcul du processus d'évapotranspiration des milieux humides isolées. Une brève description de chaque aspect suit:

### 4.2.1 Processus '*inter-fill-spill*'

Alors que dans le SWAT, les *potholes* ne peuvent recevoir que des afflux de la UHRU dans laquelle ils sont situés, dans la nouvelle formulation, une milieu humide isolée est définie comme une URH individuelle et selon son aire de drainage, les URH se drainant vers la milieu humide isolée sont identifiées (voir Figure 6-2). Par conséquent, dans la nouvelle structure, le ruissellement de surface, l'écoulement latéral ainsi que l'écoulement des eaux souterraines des UHRU situées en amont d'une milieu humide isolée s'écouleront vers le milieu humide isolée. Ceci est différent de la structure originale du *pothole* dans laquelle le ruissellement de surface généré, l'écoulement latéral l'écoulement des eaux souterraines des UHRU situés sur l'aire drainage d'une zone humide isolée n'auront pas d'effet sur son bilan hydrique. De plus, dans la nouvelle structure, les milieux humides isolées peuvent interagir entre eux, ce qui signifie que celles situées en amont se draineront vers celles en aval (voir figure 4-1 b). Une telle formulation révisée permet une description plus réaliste de l'interaction entre les zones humides isolées dans le bassin versant.

### 4.2.2 Évapotranspiration modifiée

Dans la version révisée de modèle, l'évaporation de la milieu humide isolée se produit seulement pour les jours où la température quotidienne moyenne de l'air était supérieure à zéro (Evenson et al., 2016) :

$$V_{evap} = 5 \times PET \times SA \quad si \quad T_{hru} > 0 \quad (4-18)$$

$$V_{evap} = 0 \quad si \quad T_{hru} \leq 0 \quad (4-19)$$

où  $PET$  (mm) est l'évapotranspiration potentielle pour la journée,  $T_{hru}$ (°C) est la température quotidienne moyenne de l'air. De plus, la perte par évaporation du profil de sol de la UHRU de milieu humide isolée UHRU est modifié pour tenir compte de la part de la d'évapotranspiration potentielle ( $PET$ ) satisfaite par l'évaporation du milieu humide isolée ( $V_{evap}$ ) (Evenson et al., 2016) :

$$E_{s,max} = (PET - V_{evap}) \times cov_{sol} \times \left(1 - \frac{SA}{A_{hru}}\right) \quad (4-20)$$

Où  $E_{s,max}$  (mm) est la quantité maximale de pertes par transpiration du profil de sol de la zone humide isolée et  $cov_{sol}$  (-) est un paramètre concernant la couverture du sol (c.-à-d. la biomasse aérienne et résidu).  $A_{hru}$  (ha) est la superficie de la UHRU.

Il est important de noter que dans la formulation modifiée, même que le module *pothole* de SWAT, le milieu humide isolée est supposé d'être en forme de cône. Cependant, dans ce projet, nous avons remplacé la formulation en forme de cône de la superficie de la milieu humide isolée par une relation volume-surface linéaire expliqué dans (Maxime Fossey et al., 2015; Yang et al., 2010) :

$$V_{wet} = 0.96535 \times SA_{wet} \quad (4-21)$$

## **5. Caractéristiques de bassin versant de la rivière Chaudière**

### **5.1 Topographie**

Le bassin versant de la rivière Chaudière comprend deux régions physiographiques: les basses terres du Saint-Laurent et les Appalaches. Les basses terres du Saint-Laurent se caractérisent par une vaste plaine relativement plate et couvrent la région nord du bassin versant (sous-bassins Beaurivage et secteur bases Chaudière situées à l'embouchure de la rivière Chaudière).

La région des Appalaches où se trouve le bassin versant de la Rivière Chaudière est divisée en quatre sous-régions, grosso modo de l'aval vers l'amont: les premiers contreforts, la vallée de la Chaudière et les côteaux adjacents, le plateau surcreusé et enfin le massif des Montagnes Blanches. Les premiers contreforts sont situés entre Valle-jonction et Scott où il y a plus de 300 m de dénivelé entre le fond de la rivière et les hauts reliefs. Dans La Vallée de la Chaudière et les côteaux de la région adjacente aux reliefs sont plus modérés et l'altitude varie entre 200 m à 300 m. Les principales zones urbaines du bassin versant se trouvent dans cette région (Saint-Joseph-de-Beauce, Beauceville et la partie nord de Saint-Georges). L'agriculture et les villages sont plus développés sur la rive gauche de la rivière tandis que la rive droite est dominée par la forêt. Dans le plateau surcreusé (de Saint-Georges à Lac Mégantic) les reliefs sont modérés à élevés (l'altitude varie de 300 m à 600 m). L'agriculture et les zones urbaines se développent au fond de la vallée de la rivière Chaudière. Les hauts reliefs sont couverts de forêt. La région du massif des Montagnes Blanches est caractérisée par une forêt sur les sommets du Massif des *White Mountains*, aux États-Unis, où la rivière Chaudière prend sa source (Carrier, et al., 2015).

### **5.2 Climat**

Selon (Gerardin et McKenney, 2001) le bassin versant de la rivière Chaudière est influencé par trois types de climat : 1- modéré, sub-humide; 2- subpolaire-doux, sub-humide; 3-subpolaire, sub-humide (Figure 5-1). La classe modérée couvre la majeure partie du bassin versant et est représentée par une longue période de croissance. Pour cette classe, la température annuelle moyenne et les précipitations totales annuelles varient entre 2,9 °C et 6,6 °C et 823 mm et 1324 mm, respectivement. La classe subpolaire-doux représente le sud-est du bassin versant où la température annuelle moyenne varie de 0,9 °C à 3,9 °C et les précipitations annuelles totales de 797 mm à 1253 mm. Le nord-est du bassin versant est sous l'influence du climat subpolaire où les précipitations annuelles totales et la température annuelle moyenne varient de 861 mm à 1303 mm et de -0,4 °C à 3,7 °C, respectivement.

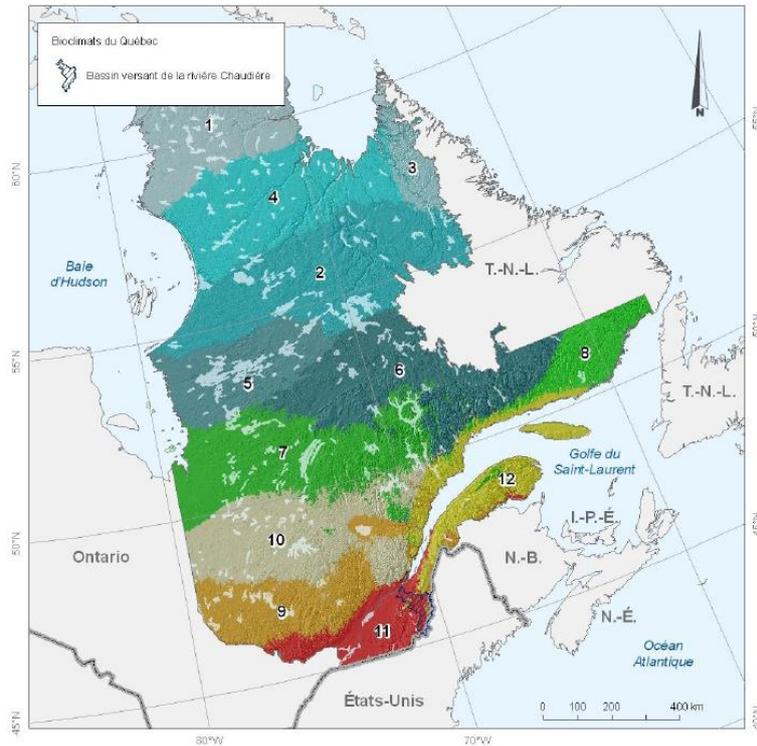


Figure 5-1. Classification de régime climatiques de bassin versant Chaudière selon (Gerardin & McKenney, 2001). La région 11 correspond au climat de type modéré, sub-humide. La partie nord-est de la région 12 correspond au climat subpolaire, sub-humide. La partie sud-est de la région 9 correspond au climat subpolaire-doux, sub-humide.

Dans cette étude, nous avons utilisé les précipitations quotidiennes ainsi que les températures quotidiennes maximale et minimale de 16 stations météorologiques illustrées à la Figure 5-2. L'analyse de la variation mensuelle des précipitations, de la température maximale et de la température minimale des stations utilisées (Figures 5-3 à 5-5) montre que la station Beauséjour enregistre la précipitation annuelle moyenne la plus élevée avec une valeur de 1283 mm, tandis que la plus faible précipitations moyenne annuelle est enregistrée à la station de St-Théophile avec une valeur de 655 mm.

La température maximale atteint sa valeur la plus élevée en juillet-août et renvoie sa valeur la plus basse en décembre-janvier. Elle varie de  $-9,1^{\circ}\text{C}$  en janvier (station St Germaine) à  $25,5^{\circ}\text{C}$  en juillet (station Beausejour) (Figure 5-4). De même pour la température minimale, la plage de variation est de  $-17,8^{\circ}\text{C}$  en janvier (station St Come) à  $14^{\circ}\text{C}$  en juillet (station Scott) (Figure 5-5).

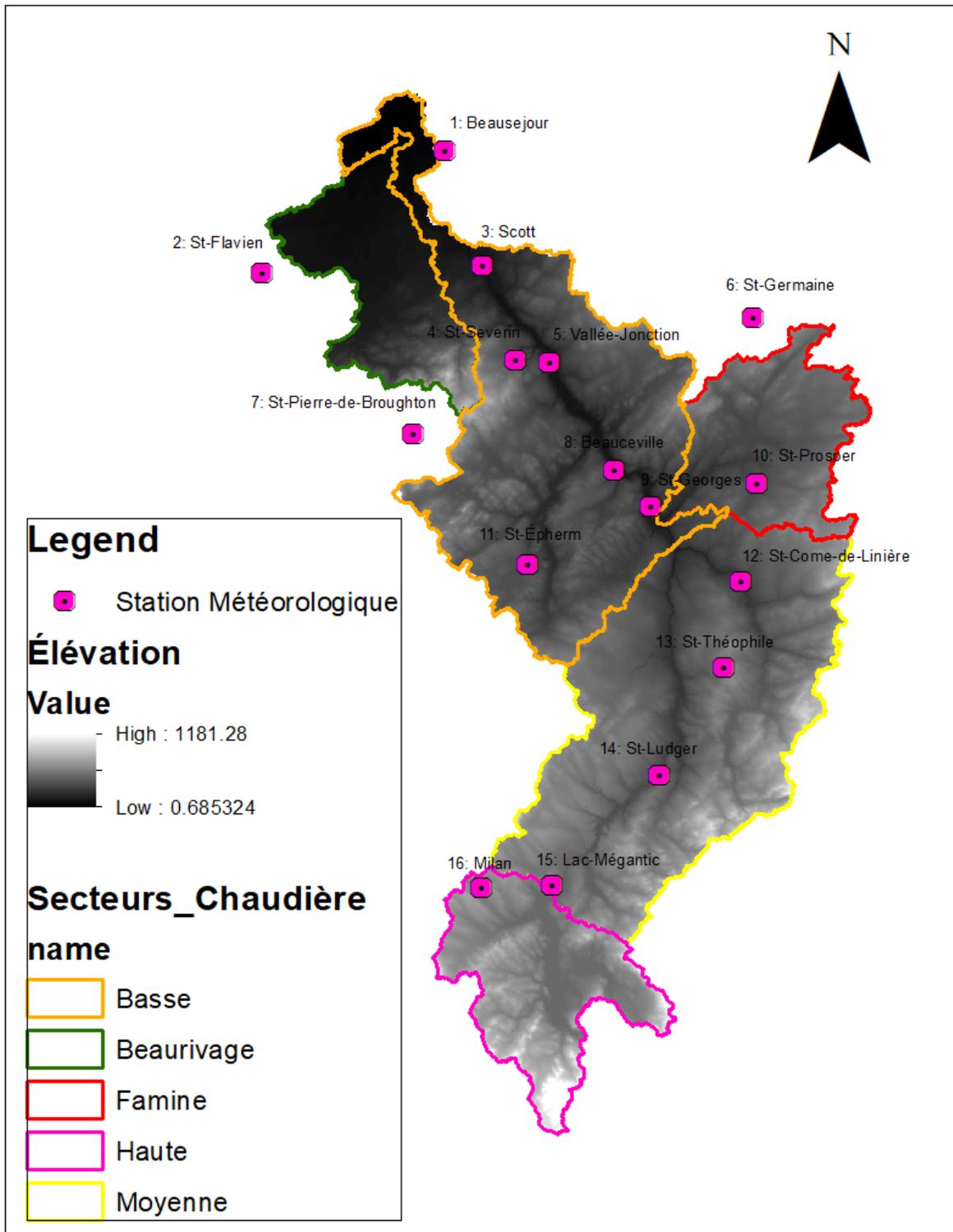


Figure 5-2. Modèle numérique d'élévation du bassin versant de la Chaudière avec localisation des stations météorologiques. La division du bassin versant en différents secteurs est également illustrée.

### 5.3 Utilisation du territoire

Les forêts (forêt mixte, forêt de conifères et forêt de feuillus) couvrent la majeure partie du bassin versant de la Chaudière (61% de sa superficie totale). Les forêts sont principalement concentrées dans la partie amont du bassin versant, (79% du secteur Haute Chaudière) et se retrouvent moins en aval du bassin versant (32% à Beaurivage). Les terres agricoles sont la deuxième classe d'occupation des sols majoritaire du bassin versant (22,7% de la superficie en moyenne) avec une concentration croissante de l'amont vers l'aval du bassin versant (5% dans le secteur Haute Chaudière contre 38,6% à Beaurivage). Les terres restantes sont occupées par des milieux humides (11%), des zones urbaines (3,6%) ou de l'eau (1,5%).

Tableau 5-1. Superficie (km<sup>2</sup>) des différentes classes d'occupation du sol (sauf pour les milieux humides) pour chaque secteur du bassin versant de la Chaudière selon la carte du MDDELCC 2016 (Bissonnette et al., 2016). Les superficies des milieux humides sont calculées à partir de la carte des milieux humides potentiels (MHP) version 2019.

Classe	Basse Chaudière	Beaurivage	Moyenne Chaudière	Famine	Haute Chaudière
Milieux forestiers	1006,70 (46,9)*	206,74 (30,1)	1492,12 (67,6)	401,22 (57,0)	598,07 (77,1)
Milieux agricoles	415,54 (19,4)	171,11 (24,9)	197,64 (9,0)	60,99 (8,7)	29,60 (3,8)
Zones urbaines	133,66 (6,2)	20,12 (2,9)	42,39 (1,9)	22,44 (3,2)	17,52 (2,3)
Milieux humides	146,72 (6,8)	178,49 (26,0)	206,56 (9,4)	129,17 (18,4)	67,30 (8,7)
Milieux aquatiques	25,84 (1,2)	2,69 (0,4)	21,69 (1,0)	6,48 (0,9)	39,41 (5,1)
Milieux arbrisseau	418,10 (19,5)	107,82 (15,7)	246,80 (11,2)	83,16 (11,8)	23,57 (3,0)
<b>Superficie totale</b>	<b>2146,56</b>	<b>686,97</b>	<b>2207,20</b>	<b>703,45</b>	<b>775,49</b>

\* les valeurs entre parenthèses représentent le pourcentage par rapport à la surface totale des secteurs.

Il est important de noter que les superficies des milieux humides indiquées dans le tableau 5-1 ne sont pas tirés de Bissonnette et al. (2016). Elles sont plutôt calculées à partir de la carte des milieux humides potentiels (MHP) version 2019 produite et diffusée par le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques qui se base sur la compilation des sources suivantes (MELCC, 2019) :

- 1- Les unités du Système d'information écoforestière (SIEF)
- 2- Les milieux humides de la base de données topographiques du Québec (BDTQ);
- 3- Les milieux humides de la base de données topographiques produites par Ressources Naturelles Canada (CanVec);

4- L'Atlas de conservation des terres humides de la vallée du Saint-Laurent (1993-1994)  
- Portion fluviale.

Cette carte fournit les informations les plus détaillées et complètes sur la présence potentielle de milieux humides. Les applications d'utilisation de cette carte sont nombreuses et concernent le développement de plans de conservation / restauration des milieux humides, la prise en compte des milieux humides dans la planification et l'aménagement futur du territoire, mais aussi la modélisation hydrologique des bassins versants avec une intégration spécifique des milieux humides et le développement des plans régionaux des milieux humides et hydriques (PRMHH) (MELCC, 2019).

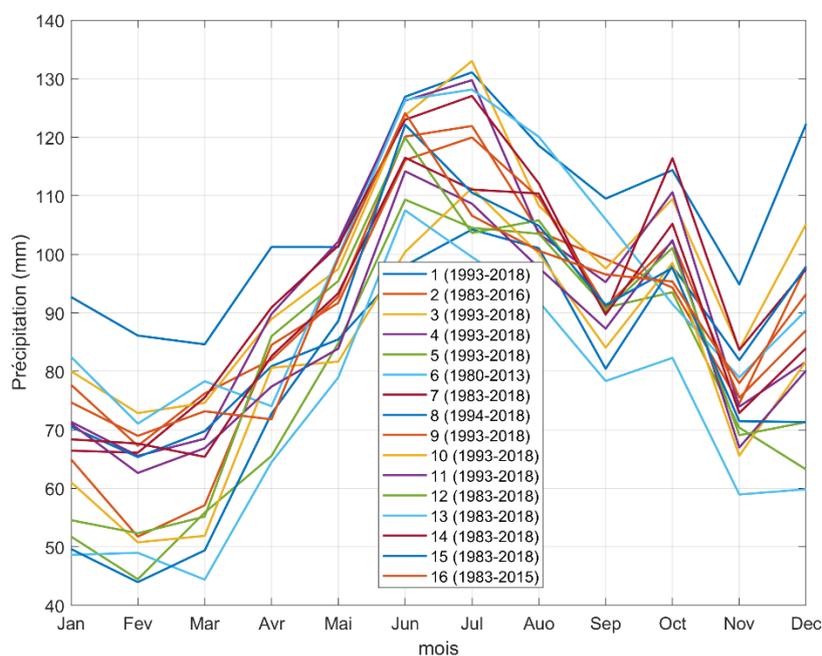


Figure 5-3. Variation mensuelle (en moyenne) des précipitations dans les stations météorologiques. Les noms et l'emplacement des stations sont affichés dans la Figure 5-2.

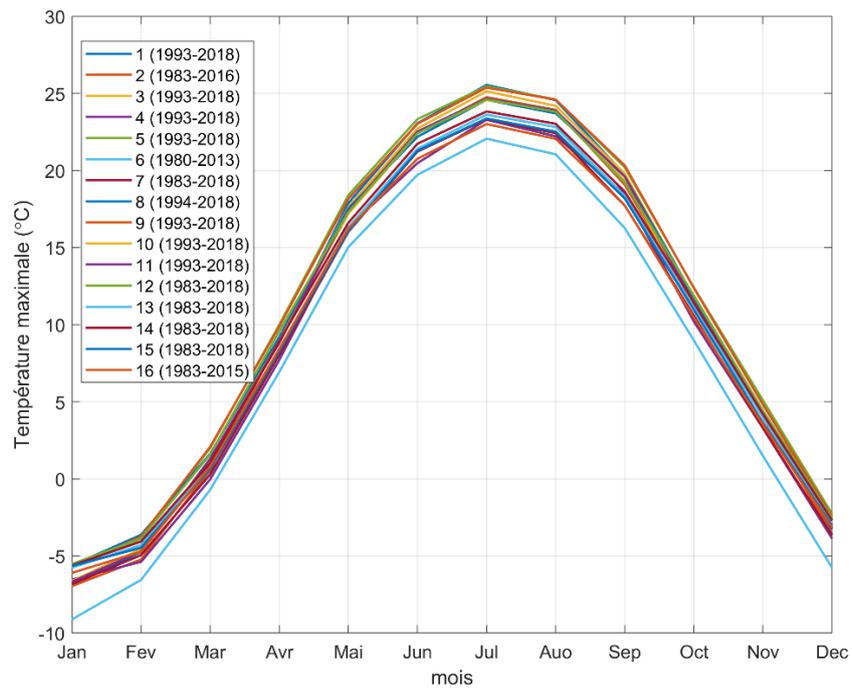


Figure 5-4. Variation mensuelle des températures maximale (en moyenne) dans les stations météorologiques. Les noms et l'emplacement des stations sont affichés dans la Figure 5-2.

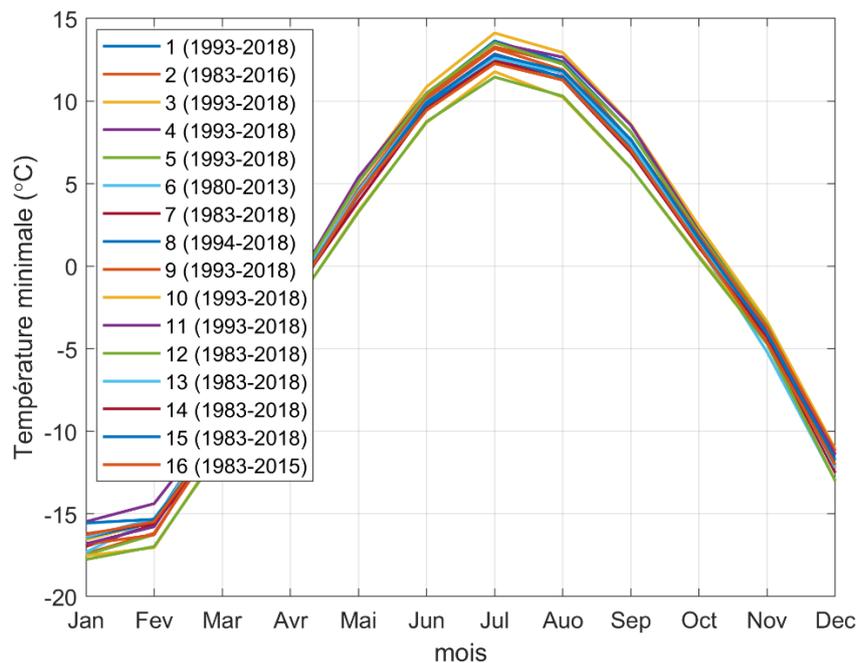


Figure 5-5. Variation mensuelle des températures minimale (en moyenne) dans les stations météorologiques. Les noms et l'emplacement des stations sont affichés dans la Figure 5-2.

## **6. Méthodologie**

### **6.1 Construction du modèle SWAT pour le bassin de la rivière Chaudière**

Dans cette section, le processus de construction du modèle hydrologique SWAT pour le bassin versant de la Chaudière est expliqué. L'extension ArcSWAT (version 2012.10\_5.21) du logiciel ArcGIS (version 10.5.1) a été utilisée pour la préparation des entrées du modèle. La première étape est la délimitation du réseau hydrographique (rivières) et des sous-bassins. À cette fin, ont été utilisés un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) de 30 m qui provient de la base de données MELCC ainsi que la carte du Réseau Hydrographique du Québec (GRHQ) fourni par COBARIC.

La carte du MNE a été utilisée pour la préparation des cartes de direction et d'accumulation de l'écoulement du bassin versant. Une fois cela fait, l'utilisateur doit définir le paramètre d'aire de drainage minimum pour la délimitation des sous-bassins et la carte du réseau de rivières. Plus la valeur d'aire de drainage minimum est élevée, moins la carte de réseau hydrique est détaillée. Pour le cas du bassin versant de la Chaudière, ce paramètre a été fixé à 120 ha, résultant dans la création de 1064 sous-bassins. Un nombre aussi élevé de sous-bassins est justifié en raison de la représentation des milieux humides riverains à l'échelle du sous-bassin hydrographique. Par exemple, en augmentant la valeur de l'aire de drainage de 120 à 500 ha, la carte du réseau hydrique n'inclura que les principaux cours d'eau des bassins versants, résultant en une conversion de milieux humides riverains en milieux humides isolés. Par conséquent, la valeur choisie pour ce paramètre affectera la classification des milieux humides du bassin versant.

Les sous-bassins ont eux-mêmes été subdivisés en unités de réponse hydrologique (URH) selon les types de sol provenant de la Base nationale de données sur les sols (BNDS) d'Agriculture et Agroalimentaire Canada (Agriculture et Agroalimentaire Canada, 2020) et des classes d'occupation du sol (MELCC version 2016 fourni par COBARIC) dominants au sein de chaque sous-bassin. À noter que, tel que mentionné dans la section 5.3, la carte des milieux humides potentiels version 2019 (MELCC, 2019) a été utilisée pour la modélisation hydrologique des milieux humides. Par rapport aux milieux humides identifiés dans la carte d'utilisation des terres du MELCC, la carte milieux humides potentiels couvre plus de zones définies comme zones humides car il est basé sur une combinaison de différentes sources. Par conséquent, la classe de milieux humides de la carte du MELCC a été remplacée par la carte des milieux humides potentiels pour la délimitation des URH.

À cette étape, les données météorologiques, c'est-à-dire les précipitations quotidiennes, les températures maximales et minimales journalières provenant de 16 stations météorologiques (voir la Figure 5-2 pour leur localisation) ont été utilisées en entrée. ArcSWAT identifie ensuite les stations météorologiques qu'un sous-bassin utilisera. Une fois terminé, le modèle SWAT est prêt à être exécuté. Cependant, dans ce projet, certaines étapes supplémentaires ont été nécessaires pour la simulation du modèle SWAT modifié pour la modélisation des milieux humides. Ces étapes sont décrites dans les sections 6.2.1 à 6.2.4.

## 6.2 Traitement des milieux humides

### 6.2.1 Classification des milieux humides

La classification des milieux humides en type isolés et riverains a été effectuée en fonction de la connexion de chaque milieu humide au réseau hydrographique. A cet effet, la carte des milieux humides potentielles a été superposée à la carte du réseau hydrographique pour identifier les milieux humides riverains (intersection avec un réseau hydrographique) et isolés (sans interaction avec le réseau hydrographique) tel que montré à la Figure 6-1. Le résultat de la classification des milieux humides pour chaque secteur du bassin versant est donné dans le Tableau 6-1. On constate que, à l'exception du secteur Basse Chaudière, les milieux humides riverains couvrent des superficies plus vastes que les milieux humides isolés. Ceci est plus prononcé dans le sous-bassin hydrographique de Beaurivage, où les milieux humides riverains couvrent près de deux fois plus de superficie que les milieux humides isolés. Alors que les milieux humides couvrent 26% et 18,3% de la superficie des sous-bassins Beaurivage et Famine, ils ne couvrent que 6,7% du secteur Basse Chaudière, démontrant la répartition éparse des milieux humides dans ce bassin versant.

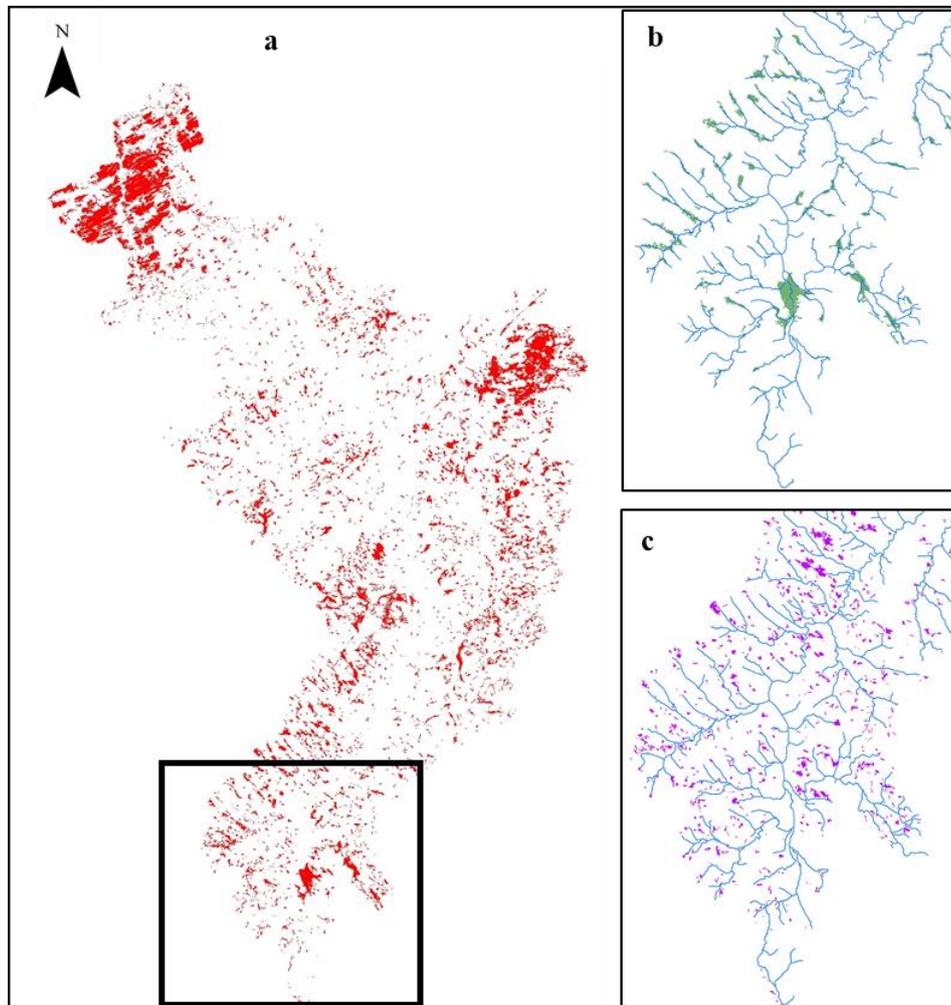


Figure 6-1. (a) Milieux humides potentiels du bassin versant de la Chaudière ainsi que leur classification en (b) milieux humides riverains et (c) isolés indiquée pour la zone dans l'encadré.

Tableau 6-1. Superficie en km<sup>2</sup> (% sous-bassin) de milieux humides isolés et riverains dans les secteurs du bassin versant de la Chaudière selon la carte milieux humides potentiels (MELCC, 2019).

Classe de MH	Basse Chaudière	Beaurivage	Moyenne Chaudière	Famine	Haute Chaudière
<b>MH isolé (%)</b>	92,4(4,3)	62,4(9,1)	100,3(4,5)	37,4(5,3)	22,4(2,9)
<b>MH riverain (%)</b>	52,3(2,4)	115,6(16,9)	110(5)	91,7(13)	44(5,7)
<b>Superficie totale (%)</b>	144,3(6,7)	178(26)	210,3(9,5)	129,1(18,3)	66,4(8,6)

### 6.2.2 Reconstruction des limites de l'URH

Tel que discuté dans la section 4.2., pour chaque milieu humide isolé, les URH situées dans sa zone de drainage sont identifiées. Une fois cette identification réalisée pour tous les milieux humides isolés du sous-bassin, l'interaction spatiale entre les milieux humides isolés est établie. Pour ce faire, la carte des URH créée à la section 6.1 est utilisée avec la carte de milieux humides isolés du bassin versant pour créer une nouvelle URH qui sera utilisée dans le processus de calcul du modèle SWAT révisé. La Figure 6-2 compare la carte originale (a) et reconstruite des URH (b) pour une région du bassin versant de la Chaudière.

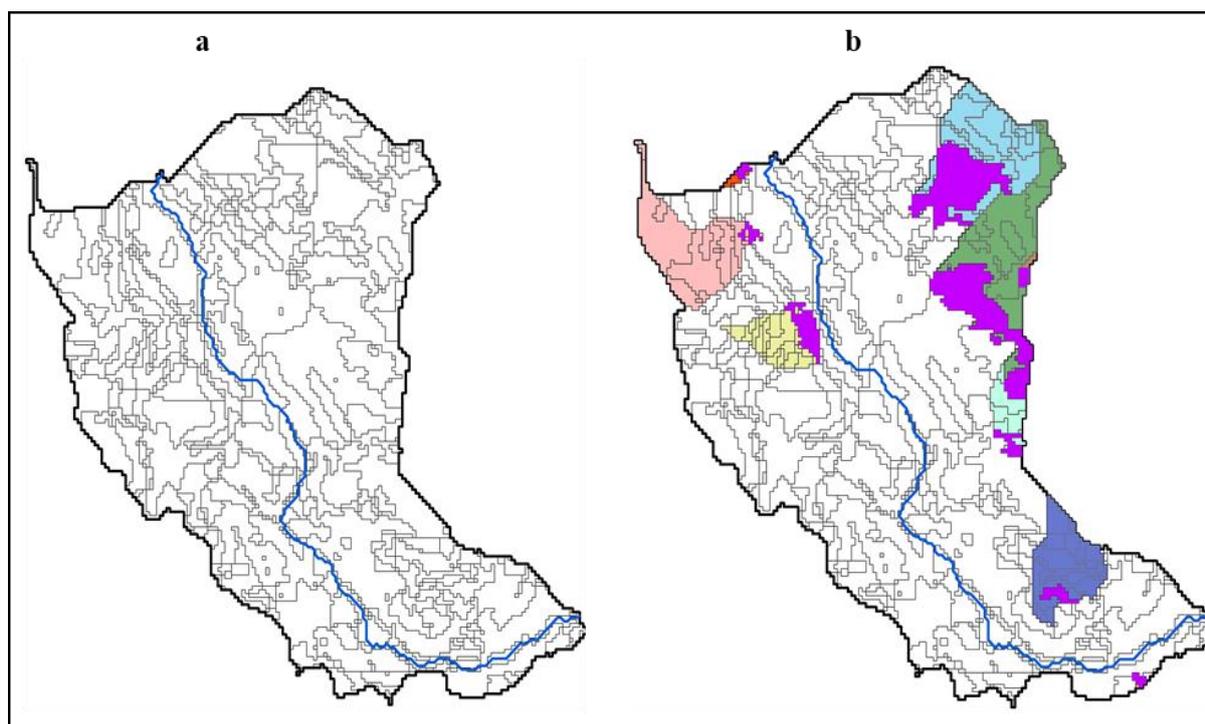


Figure 6-2. (a) Carte des URH délimités pour un sous-bassin du bassin versant de la Chaudière et (b) carte des HRU reconstitués pour le même sous-bassin en tenant compte de la zone de drainage des milieux humides isolés. Les couleurs de la figure (b) montrent les zones de drainage associées à chaque milieu humide isolé (illustrées en violet).

### 6.2.3 Agrégation des milieux humides riverains à l'échelle du sous-bassin versant

Il peut y avoir plusieurs milieux humides riverains à l'échelle du sous-bassin. Leur modélisation implique qu'ils doivent être regroupés à cette échelle. Cela signifie que les multiples milieux humides riverains dans un sous-bassin seront remplacés par un seul milieu humide riverain « équivalent » qui représente leur effet hydrologique agrégé. Ceci est fait sur la base du concept (*Hydrologically equivalent wetland - HEW*) introduit par Liu et al. (2008) qui suppose que la longueur et la superficie du milieu humide équivalent sont respectivement la somme de la longueur et de la superficie de chaque milieu humide et que son centre de gravité est le point médian géométrique du HEW avec une longueur établie comme allant de l'amont vers l'aval du point. Le principal avantage du concept HEW est qu'il évite la division d'un tronçon de rivière en plusieurs longueurs (sous-bassins) tout en conservant l'effet hydrologique des milieux humides riverains individuels, division qui peut considérablement augmenter le temps d'exécution du modèle (Liu et al., 2008). En d'autres termes, le milieu humide équivalent aura les mêmes paramètres que les milieux humides individuels et reflétera les relations non linéaires entre les milieux humides. Dans la Figure 6-3, les milieux humides riverains d'origine (a) et les milieux humides équivalents créés du sous-bassin (b) sont illustrés.

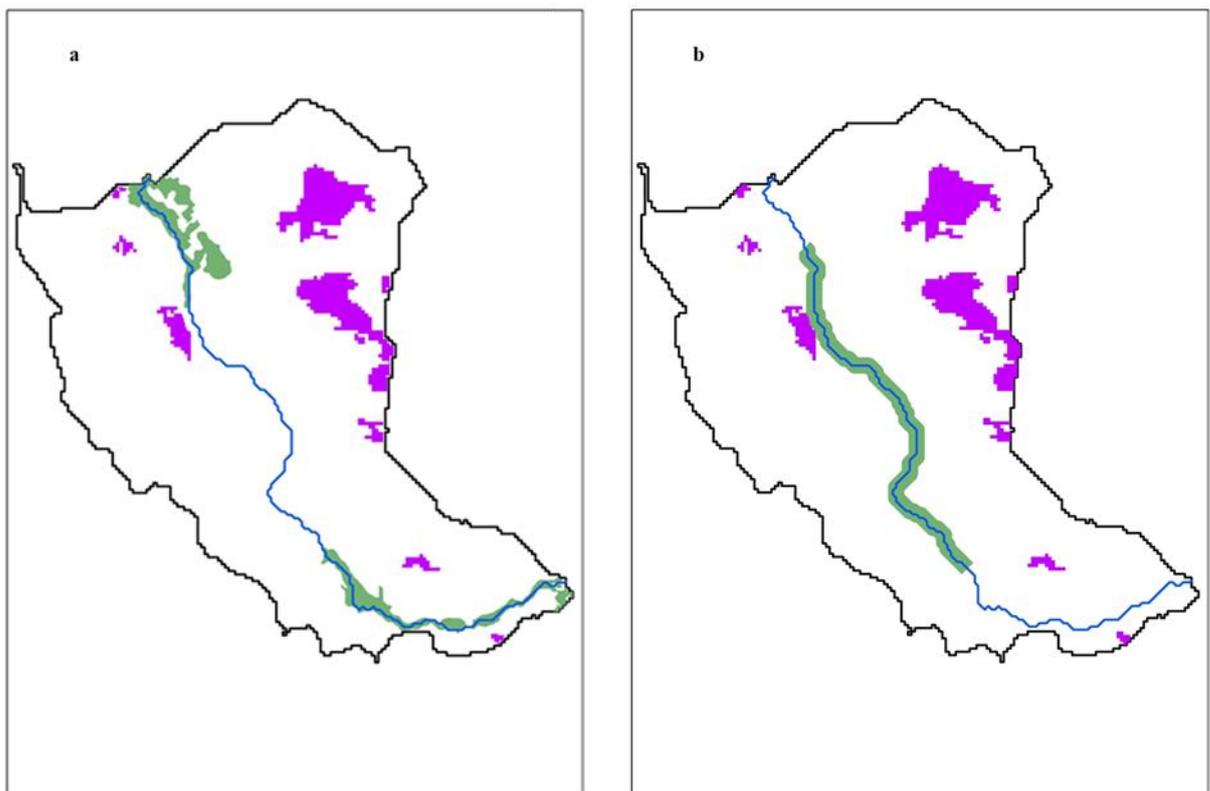


Figure 6-3. (a) Les milieux humides riverains (vert) avant agrégation et (b) après agrégation à l'échelle d'un sous-bassin. Des polygones violets montrent les milieux humides isolés.

### 6.2.4 Paramétrisation des milieux humides dans le modèle hydrologique SWAT-révisé

Les milieux humides isolés et riverains ont des paramètres d'entrée différents qui doivent être spécifiés. Pour un milieu humide isolé, la capacité de stockage ( $V_{max}$ ), ainsi que la conductivité

hydraulique à sa base ( $K_{sat}$ ) doivent être définies. La capacité de stockage est calculée sur la base de la superficie maximale du milieu humide donné dans l'équation 4-21. La conductivité hydraulique de la base du milieu humide est supposée être la même que la conductivité hydraulique de la première couche de sol dans laquelle le milieu humide réside.

Pour le milieu humide riverain, il y a six intrants à spécifier : la fraction de la superficie du sous-bassin qui se déverse dans le HEW ( $fr_{wet}$ ), la surface de milieu humide au niveau normal de l'eau ( $A_{wet,nor}$ ), le volume d'eau stocké dans le milieu humide lorsque il est rempli à un niveau d'eau normal ( $V_{wet,nor}$ ), la superficie maximale de milieu humide ( $A_{wet,max}$ ), le volume d'eau stocké dans le HEW lorsqu'il est rempli à niveau d'eau maximum ( $V_{wet,max}$ ) et la conductivité hydraulique à la base du milieu humide ( $K_{sat}$ ). Pour chaque milieu humide riverain,  $fr_{wet}$  est déterminé en fonction du drainage proportionnel dans le sous-bassin. Les autres paramètres des milieux humides sont issus de la littérature (Fossey et al., 2015; Liu et al., 2008) car les paramètres des milieux humides pour le bassin versant Chaudière ne sont pas disponibles.  $A_{wet,nor}$  est supposé être 30% de la superficie maximale ( $A_{wet,max}$ ) et en supposant que les profondeurs d'eau maximale et normale des milieux humides riverains sont de 0,5 m et 0,1 m, la capacité de stockage ( $V_{wet,max}$ ) et le volume du milieu humide à niveau normal ( $V_{wet,nor}$ ) sont déterminés par la multiplication des superficies et des profondeurs d'eau correspondantes.

### 6.3 Calibration et validation du modèle

Le modèle SWAT comprend plusieurs paramètres que l'on peut grouper selon leur signification physique (sol, eau souterraine, neige, bassin versant, URH et routage). Certains paramètres peuvent être mesurés ou déterminés (sol, bassin versant), alors que d'autres sont généralement difficiles à déterminer (écoulement de l'eau souterraine, routage). Les paramètres de sol sont liés aux propriétés de sol pour chaque type de sol présent dans le bassin versant, tels que la texture, la profondeur, la conductivité hydraulique du sol à saturation et la capacité de rétention d'eau du sol (eau disponible pour les plantes). Les paramètres d'écoulement de l'eau souterraine et d'écoulement de base sont liés aux caractéristiques d'aquifères et de la nappe phréatique.

Il est important de noter que le bassin versant Chaudière a une utilisation des terres et des types de sol hétérogènes, ce qui peut entraîner des comportements hydrologiques différents de l'amont à l'aval. Cela complique le processus de recherche de la valeur optimale des paramètres pendant le processus de calage. Par exemple, l'abondance des forêts dans le secteur Haute Chaudière peut entraîner une réduction de la valeur des variables associées au ruissellement de surface tel que le *curve number* (CN2). Par contre, pour le sous-bassin versant de Beaurivage pour lequel le ruissellement de surface domine la composante de débit de base, une augmentation de la valeur du CN2 est attendue. Par conséquent, une méthode de calibration séquentielle a été utilisée pour le calage du bassin versant afin de prendre en compte le comportement hétérogène et contrasté des variables dans différents secteurs du bassin versant. Dans cette approche, le bassin versant est divisé en plusieurs secteurs (voir Figure 5-2) et chaque secteur est calibré par rapport à sa station hydrométrique correspondante. Les caractéristiques des stations hydrométriques utilisées pour le calage du modèle sont montrées dans le Tableau 6-2.

Tableau 6-2.Stations hydrométriques (CEHQ)

<b>Numéro</b>	<b>Description de la station</b>	<b>Lac ou cours d'eau</b>	<b>Bassin versant en amont (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Période de disponibilité des données</b>	<b>Mesure</b>
<b>023401</b>	À 1,1 km en aval du pont route 171 à Saint-Étienne	Rivière Beaurivage	708	1925-présent	Débit
<b>023402</b>	Au pont-route 218 à Saint-Lambert-de-Lauzon	Rivière Chaudière	5820	1915-présent	Débit
<b>023422</b>	À 6,3 km en amont du pont-route 173 à Saint-Georges	Rivière Famine	696	1964-présent	Débit
<b>023427</b>	En aval du barrage Mégantic	Rivière Chaudière	781	1976-présent	Débit
<b>023429</b>	À 0,1 km en aval du barrage Sartigan	Rivière Chaudière	3085	1969-présent	Débit

Par rapport aux autres approches de calage tel que le calage simultané sur plusieurs sites ou le calage du modèle sur un seul site et sa validation à d'autres stations, le calage séquentiel est plus performant, considérant la nature hétérogène des paramètres du modèle dans le processus de calage (Nkiaka et al., 2018).

Au total, 22 paramètres (Tableau 6-3) ont été choisis pour le calage du modèle, en se basant sur les différents processus hydrologiques, comme la fonte de neige, les paramètres d'écoulement d'eau souterraine qui contrôlent l'écoulement de base, les paramètres de ruissellement et les paramètres de propriétés du sol qui contrôlent l'infiltration et l'écoulement de surface.

Tableau 6-3. Paramètres utilisés pour calage du modèle.

Paramètre	Description
<b>ALPHA_BF</b>	Constante de récession de l'écoulement de base (jours)
<b>CANMX</b>	Hauteur maximale de pluie interceptée par la végétation (mm)
<b>CH_K2</b>	Perméabilité du fond du cours d'eau principal (mm.h <sup>-1</sup> )
<b>CH_N2</b>	Coefficient de rugosité du cours d'eau principal du sous-bassin
<b>CH_K1</b>	Perméabilité du fond des cours d'eau tributaires (mm.h <sup>-1</sup> )
<b>CH_N1</b>	Coefficient de rugosité des cours d'eau tributaires
<b>CN2</b>	Nombre utilisé dans le calcul du ruissellement par la méthode SCS
<b>EPCO</b>	Facteur limitant la reprise d'eau du sol par les plantes
<b>ESCO</b>	Facteur limitant la reprise par évaporation dans le sol
<b>GW_DELAY</b>	Variable relative à l'écoulement dans l'aquifère superficiel
<b>GW_REVAP</b>	Variable limitant la migration d'eau de l'aquifère vers la zone non saturée
<b>GWQMN</b>	Hauteur minimale d'eau dans l'aquifère pour retour à la rivière (mm)
<b>RCHRG_DP</b>	% d'eau de l'aquifère superficiel qui percole vers le bas
<b>REVAPMN</b>	Hauteur minimale d'eau dans l'aquifère pour reprise par évaporation (mm)
<b>SFTMP</b>	Température sous laquelle la précipitation tombe sous forme de neige (°C)
<b>SMFMN</b>	Facteur minimal de fonte de la neige
<b>SMFMX</b>	Facteur maximal de fonte de la neige
<b>SMTMP</b>	Température au-dessus de laquelle fond la neige (°C)
<b>SOL_AWC</b>	Eau disponible = porosité totale – eau de drainage (mm.mm <sup>-1</sup> )
<b>SOL_K</b>	Perméabilité du sol à la saturation (mm.h <sup>-1</sup> )
<b>SOL_BD</b>	Masse volumique du sol (gr/cm <sup>3</sup> )
<b>SURLAG</b>	Paramètre qui définit la rapidité de l'écoulement de surface

Pour chaque paramètre, une plage initiale des valeurs possibles est spécifiée selon le base de données de modèle (voir Tableau 6-4), suivie par un calage automatique à l'aide de l'algorithme SUFI2 (*Sequential Uncertainty Fitting*) (Abbaspour et al., 2007), dans lequel le modèle exécute plusieurs itérations (chaque itération comprend plusieurs simulations avec différentes valeurs de paramètre).

La performance du modèle à simuler les débits observés a été évaluée avec deux indicateurs de performance. Le premier indicateur est le coefficient de Nash-Sutcliffe (NS). Cet indicateur évalue la performance du modèle dans la capture des débits élevés. Le deuxième indicateur est le biais du volume simulé par rapport au volume observé. De plus, il y a une comparaison visuelle entre les hydrogrammes observés et simulés.

Tableau 6-4. Plage initiale des paramètres utilisés pour calage

PARAMÈTRE	MIN	MAX	VARIATION	Processus
ALPHA_BF	0,0	1,0	Valeur	Écoulement souterrain
CANMX	0,0	10,0	Valeur	Végétation
CH_K2	0	150	Valeur	Routage
CH_N2	-50	50	Pourcentage	Routage
CH_K1	0	150	Valeur	Routage
CH_N1	-50	50	Pourcentage	Routage
CN2	-50	50	Pourcentage	Écoulement de surface
EPCO	0,0	1,0	Valeur	Sol
ESCO	0,0	1,0	Valeur	Sol
GW_DELAY	0,0	150	Valeur	Écoulement souterrain
GW_REVAP	0,02	0,2	Valeur	Écoulement souterrain
GWQMN	0,0	5000	Valeur	Écoulement souterrain
RCHRG_DP	0,0	1,0	Valeur	Écoulement souterrain
REVAPMN	0,0	500	Valeur	Écoulement souterrain
SFTMP	-5,0	5,0	Valeur	Neige
SMFMN	0,0	10,0	Valeur	Neige
SMFMX	0,0	10,0	Valeur	Neige
SMTMP	-5,0	5,0	Valeur	Neige
SOL_AWC	-50	50	Pourcentage	Sol
SOL_K	-50	50	Pourcentage	Sol
SOL_BD	-50	10	Pourcentage	Sol
SURLAG	-50	50	Pourcentage	Écoulement de surface

#### 6.4 Élaboration des scénarios d'aménagement du territoire

Tel que discuté, le calage du modèle hydrologique de la rivière Chaudière s'est appuyé sur la couche d'utilisation du territoire issue du croisement entre les cartes d'occupation du sol 2016 et celle des milieux humides et hydriques potentiels 2019 (MELCC, 2019). La couche résultante, appelée « *Baseline* », est considérée comme représentative de l'occupation 'actuelle' du sol du bassin.

C'est à partir de cette couche que les scénarios pour la modélisation prospective des scénarios d'aménagement ont été générés en appliquant des modifications dans la couche *Baseline*, généralement associées à la création ou à la destruction des milieux humides et hydriques, mais aussi à des modifications dans les pratiques d'usage matérialisées par une transposition de l'une à l'autre des catégories de couverture (ex : diminution de la couverture forestière et augmentation de la couverture agricole).

L'élaboration des scénarios d'aménagement a été définie après plusieurs ateliers et rencontres avec le Comité local de Suivi (CLS) et l'Assemblée consultative de Priorisation (ACP) en présence d'aménagistes et d'élus des 8 MRC présents sur le territoire du bassin versant, ainsi qu'avec le COBARIC, le consortium Ouranos, le ROBVOQ et différents experts en hydrologie, hydraulique et en milieux humides et hydriques. Il en a résulté l'élaboration de trois scénarios

décrits dans le Tableau 6-4. Chaque scénario représente une stratégie possible de développement futur du territoire en relation avec la présence des milieux humides. Une brève description de chaque scénario suit.

Tableau 6-5. Liste des scénarios identifiés avec le CLS et l'ACP dans le cadre du projet FCM/ACA pour le bassin versant de la rivière Chaudière.

Catégorie	NOM	Description
1	SQ	Poursuite des politiques actuellement en œuvre, Pertes de milieux humides déjà autorisées à Lévis
2	MHH acceptable	Signifie zéro perte nette en MHH pour le BV Implique un minimum de changements d'utilisation du sol ou une optimisation des espaces existants. Permet de tenir compte des perspectives de développement des territoires
3	MHH efficace	Gain net en MHH pour le BV Présence ultérieure naturelle de milieux humides dans le corridor; Bandes riveraines sur les milieux anthropiques et agricoles; Importants changements dans l'utilisation du sol.

#### 6.4.1 Scénario 1 : Statu quo

Le scénario de Statu quo se définit comme la poursuite des politiques actuellement en œuvre. Il suppose les pertes de milieux humides déjà autorisées, mais uniquement dans le territoire de la ville de Lévis. À partir de la couche d'origine d'utilisation du territoire, les milieux humides et hydriques identifiés par la MRC Lévis lors de l'atelier de l'ACP ont été extraits. De cette extraction, une partie seulement a été retenue pour destruction. En outre, la municipalité ayant fourni une couche issue du plan de conservation, les aires de conservation identifiées comme essentielles ne seront ainsi pas détruites malgré leur présence dans les aires désignées lors de l'atelier, ou dans le plan d'urbanisme. Les milieux humides et hydriques retenus pour destruction ont été convertis vers la catégorie « Anthropique » en prévision, dans les 30 prochaines années, de la création d'espaces résidentiels, industriels ou commerciaux. Ces nouvelles entités anthropiques ont ainsi été insérées dans la couche d'utilisation du territoire et constituent la seule modification apportée à la couche d'origine.

Dans le Tableau 6-6, les changements dans les différentes classes d'utilisation des terres entre le scénario statu quo et le scénario de *Baseline* sont décrits. On constate que le secteur Basse Chaudière a perdu 2,3 km<sup>2</sup> des milieux humides qui ont été converties en zones anthropiques. Les autres secteurs ont la même utilisation des terres que la carte du *Baseline*.

Tableau 6-6. Changement de Superficie (km<sup>2</sup>) des différentes classes d'occupation du sol entre le scénario statu quo et le *Baseline*. Les symboles + et - signifient gain et perte de superficie, respectivement.

Classe	Basse Chaudière	Beaurivage	Moyenne Chaudière	Famine	Haute Chaudière
Milieux forestiers	-	-	-	-	-
Milieux agricoles	-	-	-	-	-
Zones urbaines	+2,3	-	-	-	-
Milieux humides	-2,3	-	-	-	-
Milieux aquatiques	-	-	-	-	-
Milieux arbrisseau	-	-	-	-	-

#### 6.4.2 Scénario 2 : Milieux humides acceptables (zéro perte nette)

Le postulat de base pour ce scénario est celui d'un équilibre parfait entre gains et pertes de milieux humides sur l'ensemble du bassin versant de la Chaudière. Il consiste donc en la conversion de certains milieux humides vers des surfaces anthropiques (en lieu et place des plans d'urbanisme jugés trop restrictifs par les aménagistes d'après les perspectives de développement des municipalités) ou vers des espaces agricoles, là où l'identification a été faite lors de l'ACP. À l'inverse, pour balancer ces pertes, des milieux humides ont été générés dans les espaces ciblés par les aménagistes et pour lesquels des prédispositions physiographiques (topographie) ont été identifiées.

Comme pour le scénario statu quo, ce scénario est issu d'un processus d'Interprétation et de transposition des informations produites par les aménagistes lors de l'atelier de l'ACP et deux rencontres individuelles du ROBVQ avec la MRC de Lévis et la MRC du Granit. Les milieux humides pour destruction ont été identifiés après la superposition des informations précédemment produites durant l'ACP (MHH pour destruction) ainsi que celles des plans d'urbanisme pour être en accord avec les considérations et besoins de développement des municipalités.

Du point de vue de la création des milieux humides, un prétraitement a été effectué par le ROBVQ en utilisant la fonction *Topographic Wetness Index (TWI)*, un indice d'humidité considéré comme représentatif de la prédisposition des espaces (généralement riverains aux cours d'eau et aux lacs) à l'existence de milieux humides ou à leur création. Une comparaison des résultats des TWI obtenus sur le bassin versant avec la couche des MHH potentiels a montré une corrélation raisonnablement bonne pour considérer le TWI comme un bon indicateur de la prédisposition physiographique du territoire à recevoir des MHH. La couche des MHH a ainsi été découpée avec celles des polygones de création fournie par les aménagistes afin de tracer précisément les contours des milieux humides à créer.

Dans le Tableau 6-7, les changements dans les différentes classes d'utilisation des terres entre le scénario 2 et celle de *Baseline* sont décrits. On constate que les évolutions vont dans le sens d'une augmentation de la surface perméable pour certains secteurs et d'une augmentation du potentiel de ruissellement de surface pour d'autres. Par exemple, pour le secteur Basse Chaudière, on note une diminution des superficies forestières (0,67 km<sup>2</sup>), d'arbrisseaux (0,85 km<sup>2</sup>), agricoles (0,98 km<sup>2</sup>) et milieux humides (0,25 km<sup>2</sup>), et 2,75 km<sup>2</sup> d'augmentation de la superficie totale des zones urbanisées. Par conséquent, on peut s'attendre à une augmentation du ruissellement de surface généré par rapport au scénario de *Baseline*. La situation est moins critique pour le sous-bassin de la rivière Famine, où 0,08 km<sup>2</sup> de milieux humides est remplacé par des zones urbanisées tandis que les forêts et terres agricoles restent intactes. Dans le secteur Moyenne Chaudière, les zones forestières, agricoles, urbanisées et d'arbrisseaux détruits sont remplacées par des milieux humides. Pour le sous-bassin Beauvillage, il y a une augmentation des zones forestières, agricoles et urbanisées qui ont remplacé des surfaces d'arbrisseaux et des milieux humides dans le sous-bassin.

Tableau 6-7. Changement de Superficie (km<sup>2</sup>) des différentes classes d'occupation du sol entre le scénario 2 et le *Baseline*. Les symboles + et - signifient respectivement gain et perte de superficie.

Classe	Basse Chaudière	Beauvillage	Moyenne Chaudière	Famine	Haute Chaudière
Milieux forestiers	-0,67	+0,19	-0,4	-	-0,31
Milieux agricoles	-0,98	+1,2	-0,07	-	-0,37
Zones urbaines	+2,75	+0,19	-0,07	+0,08	+0,21
Milieux humides	-0,25	-1,08	+0,58	-0,08	+0,84
Milieux aquatiques	-	-	-	-	-
Milieux arbrisseau	-0,85	-0,1	-0,03	-	-0,37

### 6.4.3 Scénario 3 : Milieux humides efficaces

Le scénario 3 constitue le scénario d'aménagement ultime envisagé dans le cadre des travaux de modélisation hydrologique sur le bassin versant de la rivière Chaudière. Il va au-delà des objectifs de conservation de zéro perte nette et combine ainsi deux grandes catégories de mesures issues : 1) de l'application de la politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables (bandes riveraines) et, 2) de l'application des zones d'intervention spéciales à l'aménagement dans la base de données des zones inondables (corridors d'inondabilité).

La complexité inhérente au scénario 3 est liée à son arrimage avec les outils de modélisation hydrologique et donc des choix de modification de la typologie d'utilisation du territoire. En outre ces choix ont dû être effectués de manière à 1) correspondre au mieux à ce qui pourrait être concrètement mis en œuvre sur le territoire et, 2) représenter au mieux les modifications

dans les transferts et bilans hydrologiques ayant réellement lieu lors de la mise en place de ces mesures.

Il a été convenu que l'application de la mesure des bandes riveraines devait être raisonnable pour envisager une mise en place à l'échelle du bassin versant. Des bandes riveraines de 15 mètres sur l'ensemble des cours d'eau permanents et intermédiaires ainsi que sur les plans d'eau ont donc été retenues comme la première composante du scénario 3. De cette manière, les bandes riveraines croisant des territoires agricoles ou anthropiques ont ensuite été distinguées de manière à être converties en catégorie arbustive.

En ce qui concerne l'application de la mesure du corridor d'inondabilité, la couche des zones d'interventions spéciales est croisée avec la couche des TWI de manière à effectuer une distinction entre les espaces propices à la création de MHH dans le corridor d'inondabilité et de ceux qui sont moins disposés. La transposition dans les catégories d'utilisation du territoire a ensuite été appliquée en accord avec le Tableau 6-8. Ceci suppose que toutes les entités d'utilisation du territoire ne rentrant pas dans les catégories listées dans la colonne « typologie initiale » ont été conservées telles quelles. Ce commentaire est aussi valide dans le cas d'un mauvais TWI, pour l'utilisation « Fourrage ».

Tableau 6-8. Choix de modification de typologie d'utilisation du territoire pour chaque mesure du scénario 3.

Catégorie	Typologie initiale	Typologie pour la mesure « Corridor d'inondabilité »	
		Bon TWI	Mauvais TWI
<b>Anthropique</b>	Routes et communications	Arbustive	Arbustive
	Commercial	Arbustive	Arbustive
<b>Agricole</b>	Agriculture indifférenciée	Milieu humide	Fourrage
	Autre culture	Milieu humide	Fourrage
	Culture à grand interligne	Milieu humide	Fourrage
	Culture à interligne étroit	Milieu humide	Fourrage
	Fourrage	Milieu humide	Fourrage
<b>Autre</b>	Coupe et régénération	Arbustive	Arbustive
	Sol dénudé	Arbustive	Arbustive
	Non classifié	Arbustive	Arbustive

Dans le Tableau 6-9, les changements dans les différentes classes d'utilisation des terres entre le scénario 3 et celle du *Baseline* sont décrits. Dans ce scénario, on constate que le milieu forestier reste intact. En outre, il y a des pertes dans les zones agricoles et les zones urbanisées qui ont été remplacées soit par des milieux humides soit par des arbrisseaux.

Tableau 6-9. Changement de superficie (km<sup>2</sup>) des différentes classes d'occupation du sol entre le scénario 3 et le *Baseline*. Les symboles + et - signifient respectivement gain et perte de superficie.

Classe	Basse Chaudière	Beaurivage	Moyenne Chaudière	Famine	Haute Chaudière
Milieux forestiers	-	-	-	-	-
Milieux agricoles	-31,06	-14,87	-5,86	-2,09	-1,25
Zones urbaines	-10,71	-1,39	-1,98	-0,86	-0,85
Milieux humides	+23,24	+2,67	+1,34	+0,59	+1,09
Milieux aquatiques	-	-	-0,01	-	-
Milieux arbrisseaux	+18,53	+13,6	+6,51	+2,37	+1,01

### 6.5 Scénarios de changements climatiques

L'évaluation de l'effet des changements climatiques sur l'efficacité des zones humides sur la réduction des pics de crue a été étudiée à l'aide de 10 projections climatiques CORDEX présentées dans le Tableau 6-10. Ces projections climatiques ont été fournies par Ouranos dans le but de couvrir différents scénarios possibles de climat futur. Pour la simulation du modèle en mode changements climatiques, les données météorologiques du modèle SWAT, c'est-à-dire les précipitations journalières ainsi que les températures maximales et minimales journalières, ont été modifiées. Ensuite, pour chaque scénario climatique, trois simulations avec une couverture temporelle différente ont été effectuées, soit 1971-2000 (période de référence), 2021-2050 (future rapproché) et 2041 -2070 (futur lointain).

Tableau 6-10. Caractéristiques des scénarios des changements climatiques de CORDEX utilisés dans le projet

Projection climatique	Modèle global	Modèle régional	RCP scénario
COR_CE2_CA2_R81	CanESM2	CanRCM4	RCP 8.5
COR_CE2_CA4_R81	CanESM2	CanRCM4	RCP 8.1
COR_CE2_CU4_R41	CanESM2	CanRCM4	RCP 4.5
COR_CE2_RC4_R41	CanESM2	CanRCM4	RCP 4.5
COR_CE2_RC4_R81	CanESM2	CanRCM4	RCP 8.5
COR_ECE_HH4_R43	EC-EARTH	HIRHAM5	RCP 4.5
COR_ECE_HH4_R83	EC-EARTH	HIRHAM5	RCP 8.5
COR_ECE_RC4_412	EC-EARTH	RCA4	RCP 4.5
COR_MPL_CU4_R41	MPI-ESM-LR	CRCM5-UQAM	RCP 4.5
COR_MPM_CU4_R81	MPI-ESM-MR	CRCM5-UQAM	RCP 8.5

## 7. Résultats

### 7.1 Calage et validation du modèle SWAT-révisé

Les résultats de calage des sous-bassins sont présentés aux Figures 7-1 à 7-5 et résumés dans le Tableau 7-1. La période de calage est d'une durée de 11 ans, soit 2000-2010, pour les secteurs Basse Chaudière, Moyenne Chaudière et Famine; et de 16 ans, soit 1995-2010, pour les secteurs Haute Chaudière et Beaurivage. La période de calage inclut une période de chauffe de 2 années. Cette période est requise pour initialiser le modèle hydrologique.

Un examen visuel des résultats indique que le modèle représente de manière satisfaisante la réponse hydrologique et la dynamique de l'écoulement à l'exutoire du bassin versant avec une certaine sous-estimation des crues printanières. Ceci est en partie lié au fait que les paramètres de fonte de neige du modèle sont représentés à l'échelle du bassin. À noter que les effets de cette sous-estimation seront minimales dans les simulations des différents scénarios d'aménagement du territoire, car l'intérêt est de modéliser l'effet de ces scénarios relatif au scénario de base.

Tableau 7-1. Critères d'évaluation du modèle hydrologique pour les principaux sous-bassins de la rivière Chaudière.

Sous-bassin	Années calibration	Années validation	Métriques statistiques			
			NS		P-bias (%)	
			Cal.	Val.	Cal.	Val.
<b>Basse</b>	2000-2010	2011-2016	0,61	0,60	4,8	3,5
<b>Beaurivage</b>	1995-2010	2011-2016	0,54	0,51	-1,6	7
<b>Famine</b>	2000-2010	2011-2018	0,62	0,57	-3,9	13,1
<b>Moyenne</b>	2000-2010	2011-2016	0,53	0,50	4,8	8,1
<b>Haute</b>	1995-2010	2011-2018	0,58	0,62	7,6	11,2

Le coefficient de Nash-Sutcliffe (NS) en calage varie de 0,53 pour le secteur Moyen Chaudière à 0,62 pour le sous-bassin Famine. De plus, le coefficient P-bias varie de -3,9 à 1,4 % indiquant que les performances du modèle sont généralement bonnes selon le critère de Moriasi et al. (2007). Un % de biais positif indique que le modèle produit un volume d'écoulement moins élevé que le volume d'écoulement observé sur toute la période de calage et un % de biais négatif indique le contraire. On rappelle qu'un modèle qui 'colle' parfaitement aux observations a un critère de NS de 1 et un P-Bias de 0 %.

La performance du modèle en validation offre des résultats comparables à la performance en calage, avec le critère de NS variant entre 0,50 et 0,62 et le critère P-bias variant de 3.5 à 13.1%. Ici encore, le modèle a tendance à légèrement sous-estimer le volume d'écoulement par rapport aux observations.

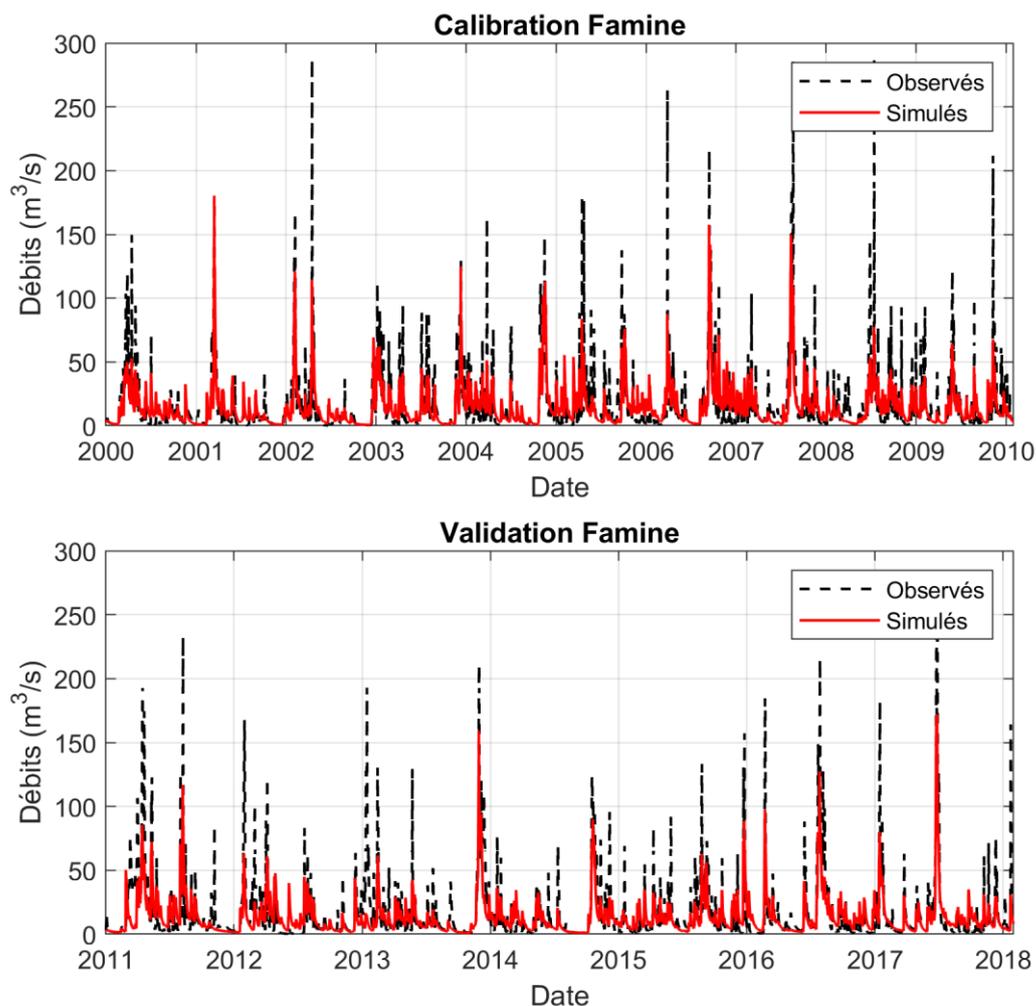


Figure 7-1. Débits journaliers simulés et observés pour les périodes de calage et de validation pour le sous-bassin Famine

Les valeurs les plus faibles du coefficient de NS pour les secteurs de la Haute et de la Moyenne Chaudière sont en partie dues à la présence de réservoirs situés juste en amont des stations hydrométriques affectant le régime d'écoulement. À noter qu'au total 21 réservoirs à l'échelle du bassin versant de la Chaudière sont inclus dans le modèle. Cependant, comme les règles opérationnelles de ces réservoirs ne sont pas disponibles, leurs paramètres correspondants n'ont pas été calibrés.

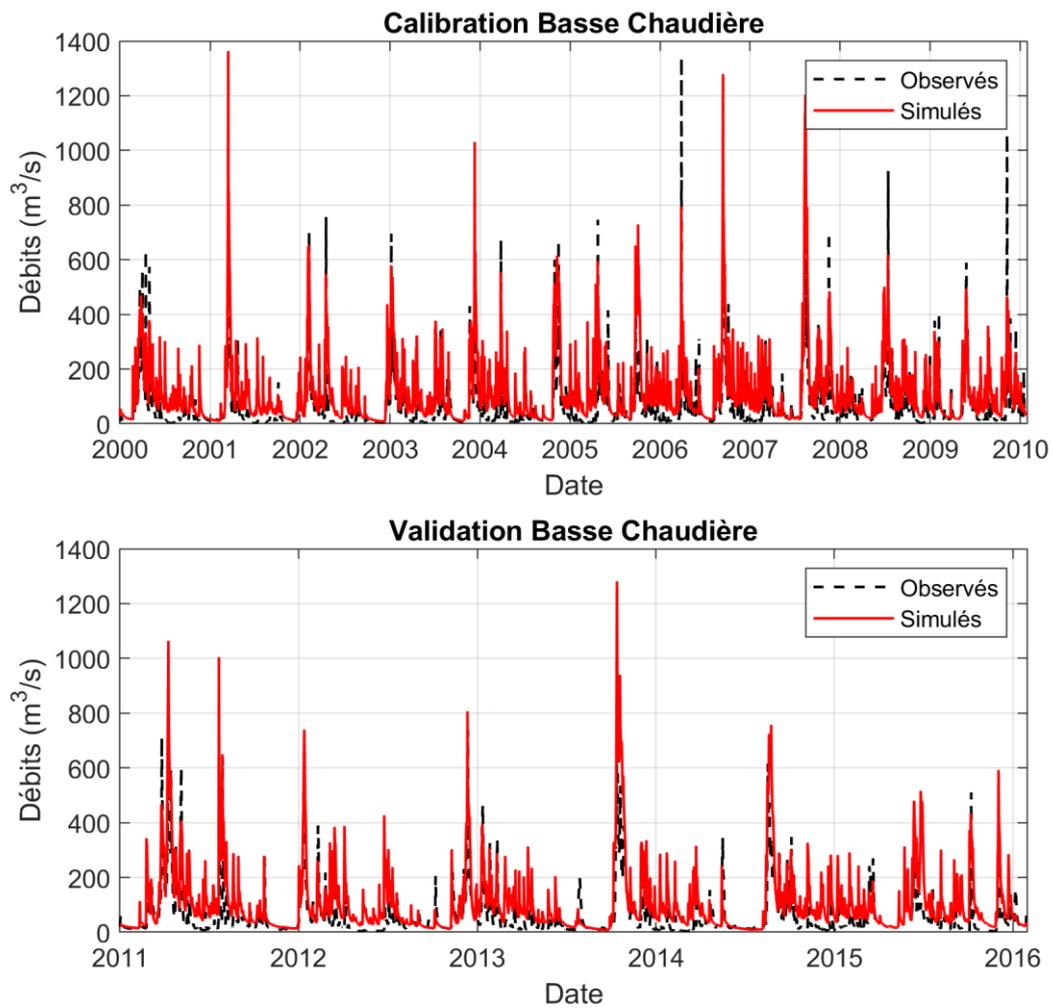


Figure 7-2. Débits journaliers simulés et observés pour les périodes de calage et de validation pour le secteur Basse Chaudière

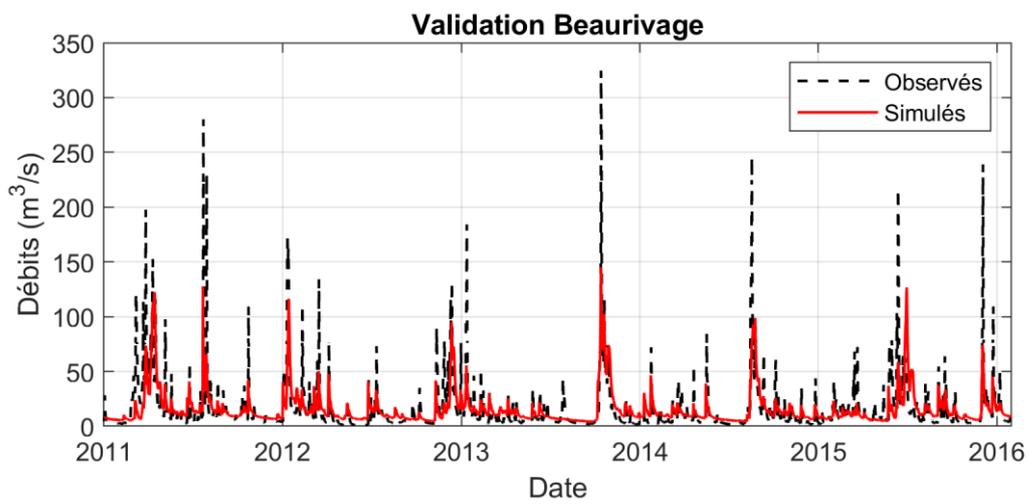
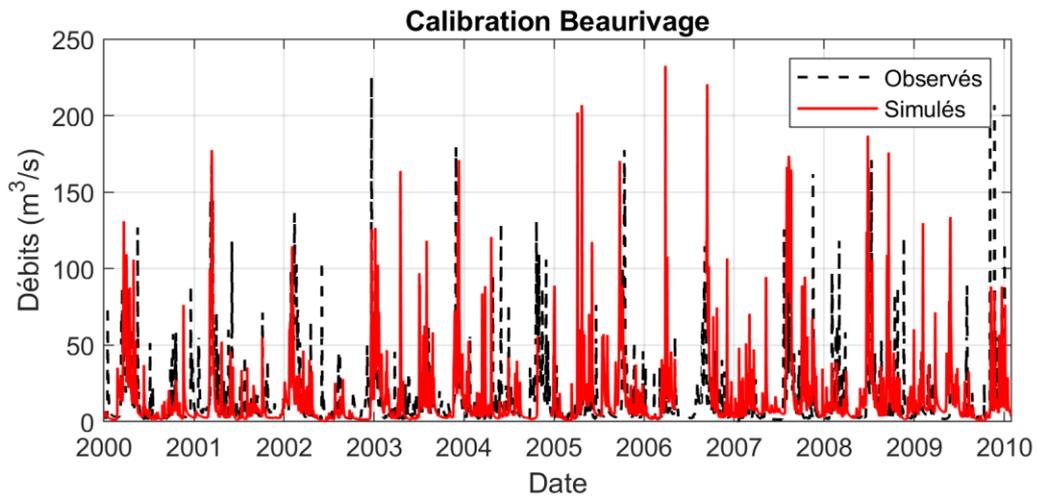
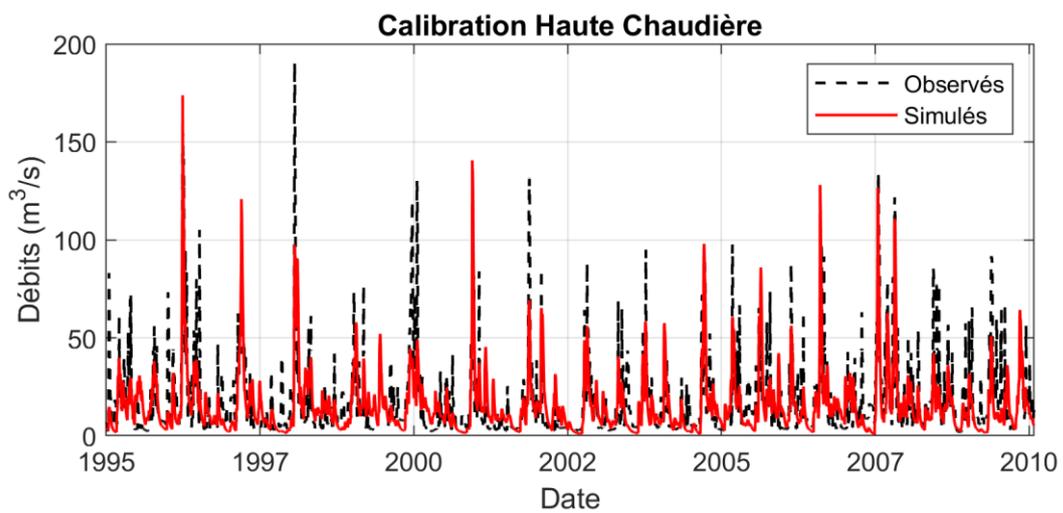


Figure 7-3. Débits journaliers simulés et observés pour les périodes de calage et de validation pour le sous-bassin Beurivage



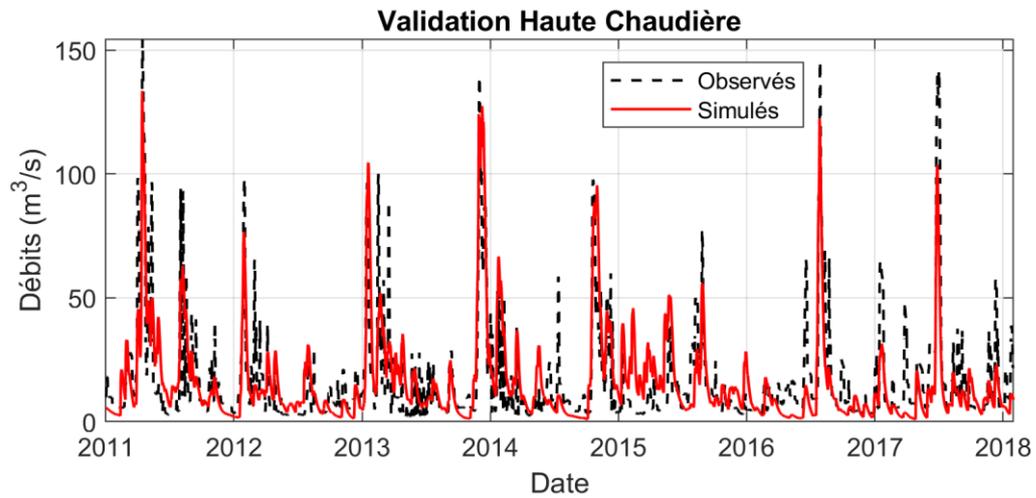


Figure 7-4. Débits journaliers simulés et observés pour les périodes de calage et de validation pour le secteur Haute Chaudière

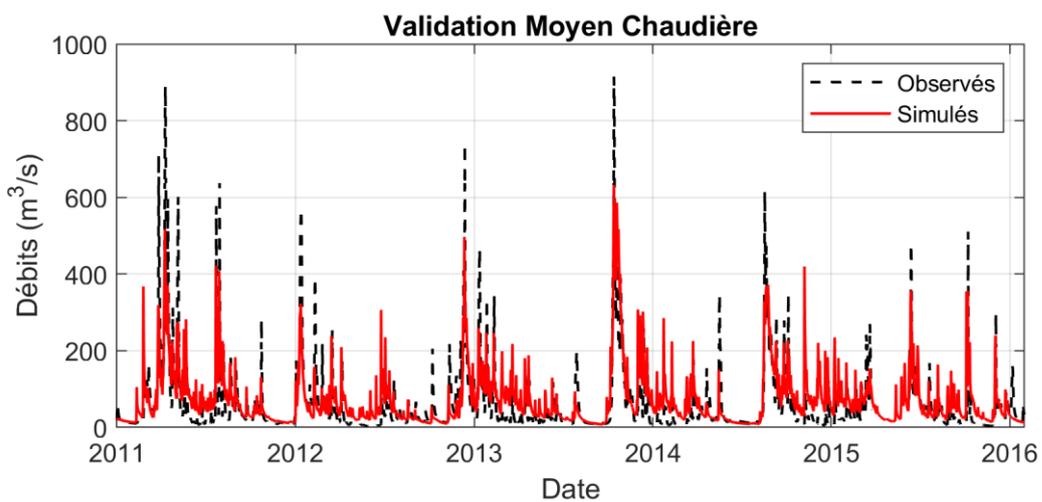
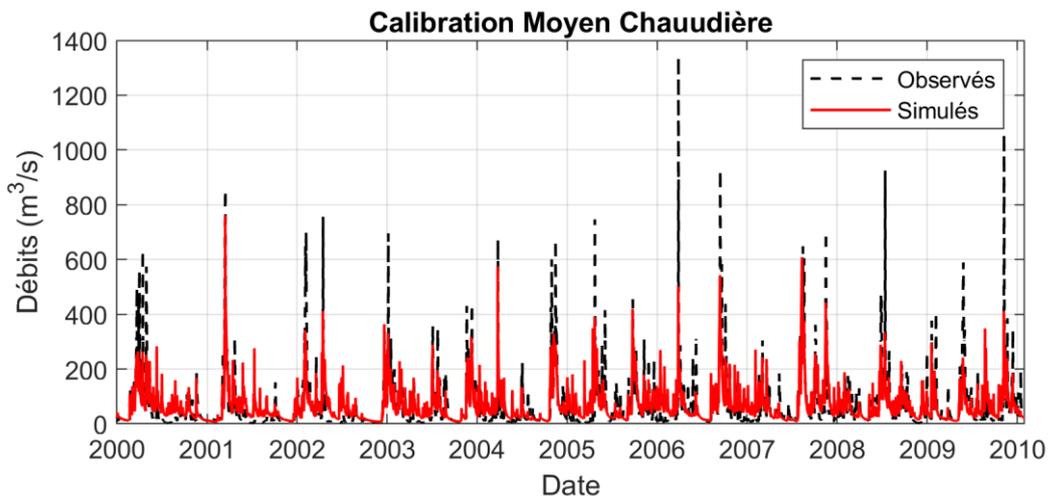


Figure 7-5. Débits journaliers simulés et observés pour les périodes de calage et de validation pour le secteur Moyenne Chaudière

## **7.2 Réduction des débits de crues par les milieux humides pour différentes périodes de retour ( $Q_2$ ans, $Q_{10}$ ans, $Q_{50}$ ans et $Q_{100}$ ans): étude de cas des sous-bassins versants Famine et Beaurivage**

Afin de mieux comprendre l'effet des milieux humides sur la réduction des pics de crues, une série de simulations avec enlèvement complet des milieux humides dans les sous-bassins versants Famine et Beaurivage a été réalisée. L'idée principale est de savoir jusqu'à quel point les milieux humides sont capables d'atténuer les pics de crues et comment leur efficacité pour réduire les crues dépend de l'ampleur de la crue et de la typologie de milieux humides, c'est-à-dire les milieux isolés versus riverains. La justification du choix de ces deux sous-bassins versants est liée à l'importance de la couverture des zones humides dans ces régions (voir le Tableau 6-1), qui peut mieux révéler leur influence sur les régimes d'écoulement.

Le scénario extrême comprend trois sous-scénarios : 1) l'élimination de toutes les milieux humides isolées et la conservation des seules milieux humides riveraines dans le sous-bassin hydrographique, 2) l'élimination de toutes les milieux humides riveraines et la conservation des milieux humides isolées et 3) l'élimination de tous les milieux humides riverains et isolés. Dans chaque scénario, le milieu humide enlevé est remplacé par une terre agricole représentant le scénario de développement agricole extensif dans la région.

Dans la Figure 7-6, l'augmentation des débits de pointe en période de crue par rapport au scénario au *Baseline* (représentant l'état actuel des milieux humides) des deux sous-bassins versants est illustrée. Différentes distributions de probabilité (ex : extrémum généralisée, log-normale) ont été testées pour l'analyse fréquentielle des débits maximum annuels simulés et la distribution qui donnait le meilleur ajustement par rapport aux données simulées a été retenue pour le calcul des débits pour les récurrences de 2 à 100 ans.

On constate que la suppression de tous les milieux humides (barres jaunes) peut entraîner une augmentation des débits de pointe de 42% pour le débit de récurrence de 2 ans, soit le  $Q_2$ , à 53% pour le  $Q_{100}$  dans le sous-bassin Famine et de 31% pour le  $Q_2$  à 33% pour le  $Q_{100}$  dans Beaurivage. De plus, la Figure 7-6 révèle que dans les deux cas, l'élimination des milieux humides riverains entraînerait une augmentation des débits de pointe plus élevée que la suppression des milieux humides isolés.

Alors que l'effet de la suppression totale de tous les milieux humides augmente avec une augmentation de la récurrence de la crue, ce comportement diffère dépendamment que l'on considère les milieux humides isolés ou riverains, ainsi que le bassin versant étudié. En ce qui a trait aux milieux humides isolés, la performance de réduction des crues diminue à mesure que leur ampleur augmente. Par exemple, dans le cas de Beaurivage, la suppression des milieux humides isolés entraînerait une augmentation du  $Q_2$  d'environ 7%, cependant, cette augmentation est inférieure à 5% pour  $Q_{100}$ . Un comportement similaire est observé avec le sous-bassin Famine. Ceci met en évidence l'effet de la capacité de stockage des milieux humides isolés sur la diminution des pics de crues car pour les crues plus petites ( $Q_2$  par exemple), la capacité des milieux humides isolées permet de stocker une grande partie du ruissellement généré.

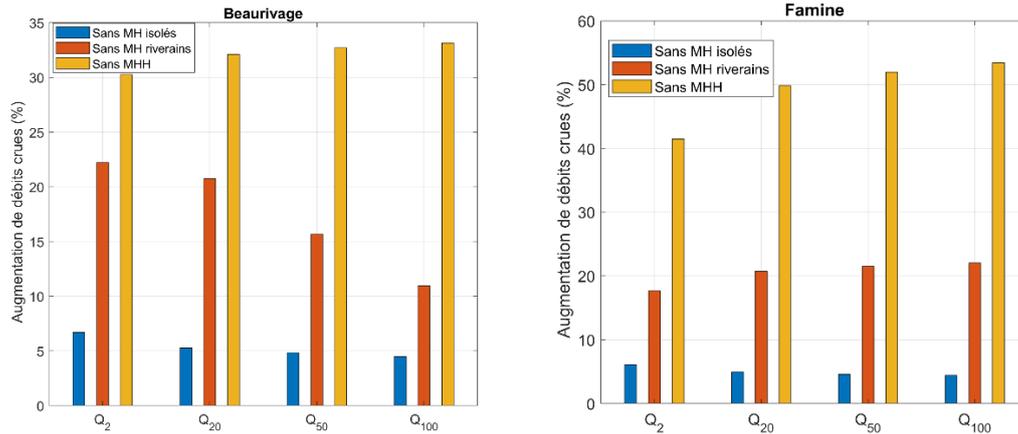


Figure 7-6. Augmentation (en pourcentage) de l'ampleur des débits des crues (par rapport au *Baseline*) dans différents scénarios de couverture des zones humides pour les sous-bassins versants Famine et Beurivage.

En ce qui concerne le scénario d'élimination des milieux humides riverains, alors que les pics de crue passent de 18% pour le Q<sub>2</sub> à 22% pour le Q<sub>100</sub> pour la Famine, ils diminuent de 23% pour le Q<sub>2</sub> et de 11% pour le Q<sub>100</sub> pour Beurivage. En d'autres termes, les milieux humides de Beurivage seraient plus efficaces lors d'inondations plus petites que lors d'inondations plus importantes.

Ceci révèle le comportement différent des milieux humides dans le bassin versant agricole de Beurivage par rapport à au bassin plus forestier de la Famine, car un plus grand ruissellement potentiel généré par les terres agricoles fait que le milieu humide reçoit plus d'eau et, par conséquent, atténue mieux le pic de crue. Cependant, pour les bassins versants à prédominance forestière comme celui de la Famine, de plus grandes inondations apporteront plus d'eau aux milieux humides que les plus petites, ce qui améliorerait leur rôle d'atténuation des inondations. Cette analyse indique que l'efficacité de la réduction des crues des milieux humides n'est pas seulement liée à leur superficie, mais aussi à leur typologie, leur emplacement dans le bassin versant, ainsi que la physiographie, la géologie et la couverture végétale du bassin versant.

### 7.3 Effet des milieux humides sur le régime de débits mensuels des sous-bassins versants

La variation relative (par rapport à la référence) des débits mensuels moyens pour les sous-bassins Famine et Beurivage sous différents scénarios de couverture des milieux humides est illustrée à la Figure 7-7. On constate que la plus grande variation des débits mensuels se produit en cas de dégradation complète des milieux humides.

Pendant la période hivernale (décembre à février), la suppression complète des milieux humides entraîne une diminution du débit moyen des rivières de 27% à 31% pour le sous-bassin versant Famine et de 28% à 35% pour Beurivage.

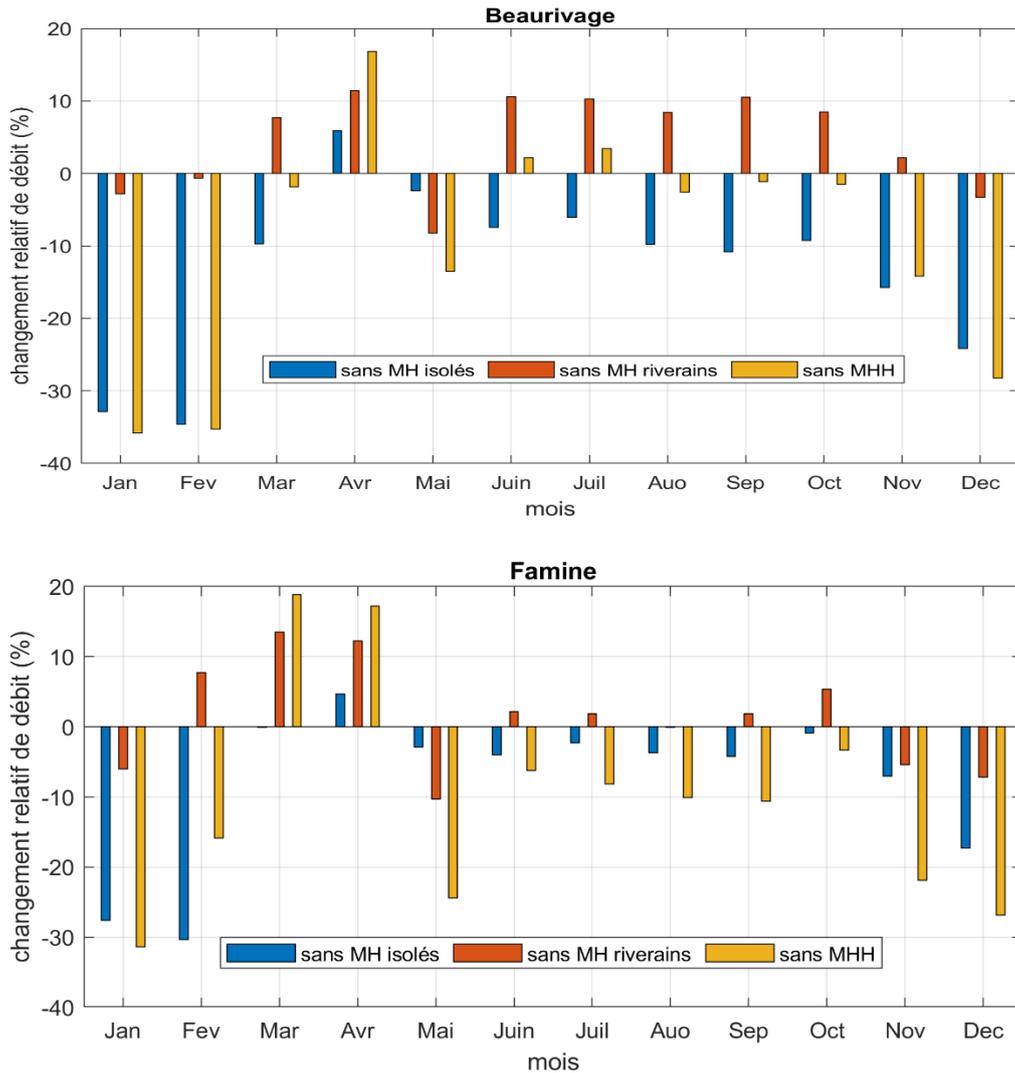


Figure 7-7. Variation relative (par rapport à la référence) des débits moyens mensuels pour les sous-bassins Famine et Beaurivage dans différents scénarios de couverture des milieux humides

Entre les milieux humides isolés et riverains, la diminution est plus prononcée pour la suppression des milieux humides isolés, allant de 17% à 30% pour Famine et de 25% à 32% pour Beaurivage. À noter que la diminution relative illustrée à la Figure 7-7 est basée sur le débit moyen mensuel et n'implique pas que l'ampleur des débits des crues hivernales sera aussi diminuée, comme en font foi les figures 7.8 et 7.9. Sur ces figures, on constate en effet que les crues hivernales augmentent lorsque les milieux humides sont supprimés pour les scénarios d'élimination des milieux humides.

Au printemps (mars à mai), l'enlèvement des milieux humides riverains entraîne une plus grande variation du débit moyen que les milieux humides isolés, ce qui concorde avec l'augmentation relative de débits des crues illustrée dans la Figure 7-6. À noter que la direction du changement s'inverse d'avril à mai, soit une augmentation du débit mensuel en avril suite à la suppression des milieux humides, à une diminution du débit mensuel en mai.

Pendant l'été (de juin à août), la suppression des milieux humides riverains entraîne une augmentation du débit mensuel, alors que l'inverse est observé pour les milieux humides isolés.

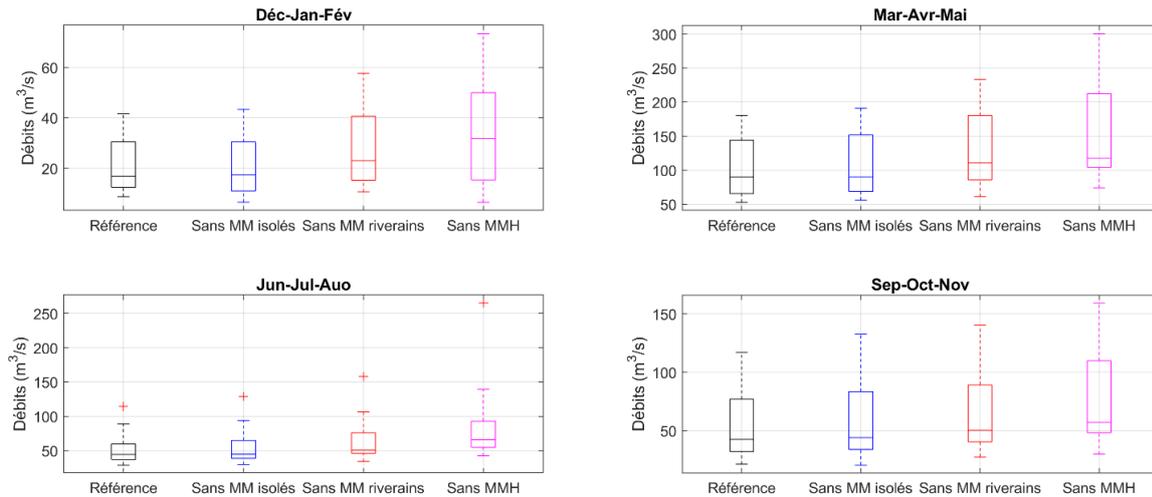


Figure 7-8. Débit maximal saisonnier pour le sous-bassin versant Famine pour différents scénarios de couverture des milieux humides

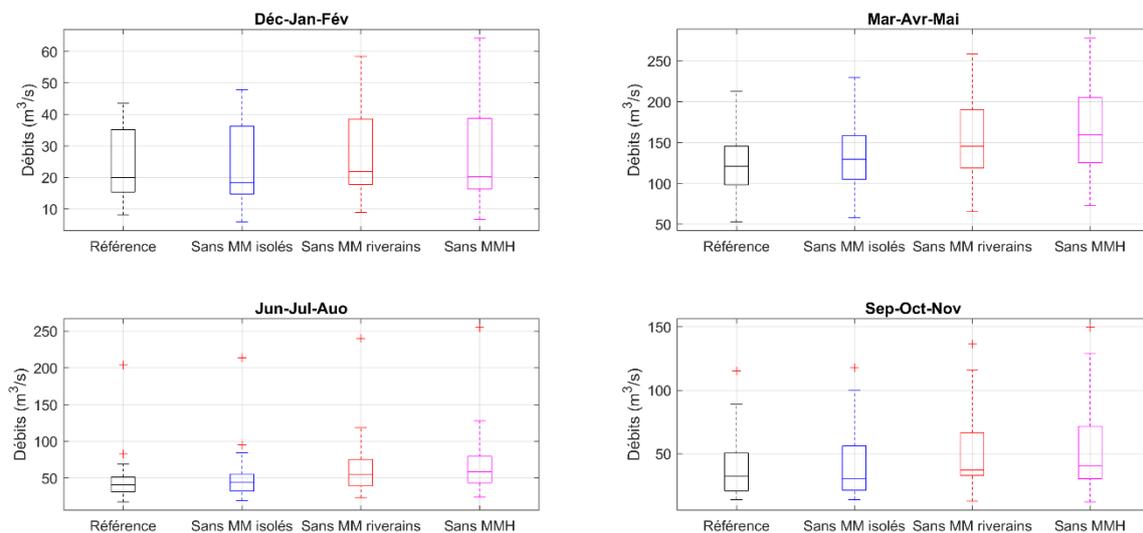


Figure 7-9. Débit maximal saisonnier pour le bassin versant Beurivage pour différents scénarios de couverture des milieux humides

On observe aussi que les variations des débits mensuels pour les scénarios de suppression des milieux humides isolés et riverains sont beaucoup plus faibles pour le sous-bassin Famine que pour Beurivage. Par exemple, alors que la suppression des milieux humides riverains à Beurivage entraîne une augmentation du débit moyen mensuel (8% à 11%), les débits mensuels restent relativement inchangés pour le cas de Famine (moins de 3% d'augmentation). Une contribution plus élevée du débit des eaux souterraines pour le sous-bassin Famine par rapport à Beurivage (illustré à la Figure 7-10) peut en partie expliquer une telle différence de comportement, car pour ce bassin versant, la présence ou l'absence des milieux humides aurait moins d'effet sur le débit.

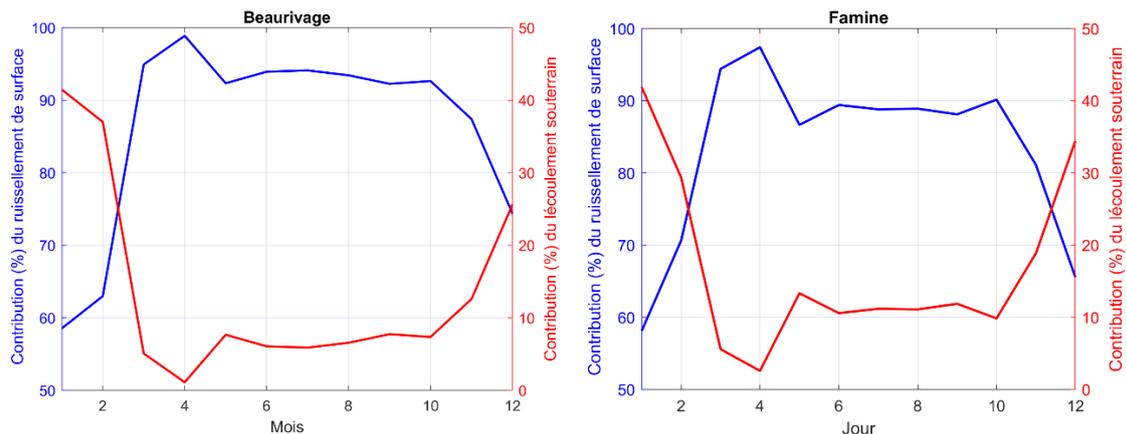


Figure 7-10. Contributions mensuelles (en pourcentage) des eaux souterraines et du ruissellement de surface aux débits sortants dans les sous-bassins versants Famine et Beurivage

Comme l'été, à l'automne (septembre-novembre), les milieux humides riverains de Beurivage ont tendance à continuer leur rôle de stockage, alors que, dans le sous-bassin Famine, leur rôle dans le débit mensuel reste relativement faible.

#### 7.4 Identification de l'emplacement et de la typologie optimaux des milieux humides pour la réduction des inondations: étude de cas de la rivière Famine

Une considération importante dans l'élaboration de scénarios de conservation / restauration des milieux humides est l'identification des milieux humides ayant un impact important sur le comportement hydrologique. En d'autres termes, si la présence des milieux humides crée un conflit avec le développement futur d'occupation du sol du bassin versant, quels milieux humides doivent être conservés / protégés? Une telle analyse est d'une grande importance pour les organismes des bassins versants et les MRC pour mieux connaître le rôle individuel de leurs milieux humides sur l'efficacité d'atténuation des crues. À l'aide du module semi-distribué des milieux humides dans le modèle hydrologique, nous visons à répondre aux questions suivantes:

- 1) Les milieux humides isolés situés en amont (loin des réseaux hydriques) et ceux situés en aval (proche des réseaux hydriques) ont-ils le même rôle dans la réduction des inondations? sinon, lequel est le meilleur pour réduire les pics de crue?
- 2) Les milieux humides riverains situés sur des cours d'eau de premier ordre ont-ils le même impact que ceux reliés au chenal principal? sinon, lequel est le plus efficace pour réduire les pics de crue?

Pour répondre à ces questions, une série de huit scénarios hypothétiques de milieux humides est conçue comme illustrée à la Figure 7-11. Dans chaque scénario, une combinaison unique de typologie et d'emplacement des milieux humides a été prise en compte alors que d'autres milieux humides ont été convertis en terres agricoles. Dans les deux premiers scénarios, soit Milieux Humides Isolés (MHI) et Milieux Humides Riverains (MHR), une typologie spécifique de milieux humides a été conservée et l'autre est convertie en terres agricoles. Dans les scénarios 3 et 4, les milieux humides isolés ont été classés en deux groupes : Milieux Humides Isolés amont (MHI amont) et Milieux Humides Isolés aval (MHI aval) selon leur emplacement dans le sous-bassin. Dans le cas où un milieu humide isolé est plus proche de la

limite de son sous-bassin, il est classé comme MHI amont et s'il est plus proche du segment de rivière que la limite du sous-bassin, il s'agit d'un MHI aval. Les quatre scénarios restants sont liés aux milieux humides riverains, où les milieux humides isolés sont convertis en terres agricoles. MHR S1 représente la conservation des milieux humides riverains reliés aux cours d'eau de premier ordre (classification de Strahler), MHR S2 est lié aux milieux humides situés dans les tronçons de second ordre et ainsi de suite. L'efficacité de la réduction des crues pour chaque scénario a été évaluée par rapport au scénario de dégradation complète des terres humides du bassin versant (nommé SMM dans les Figures 7-11 à 7-13).

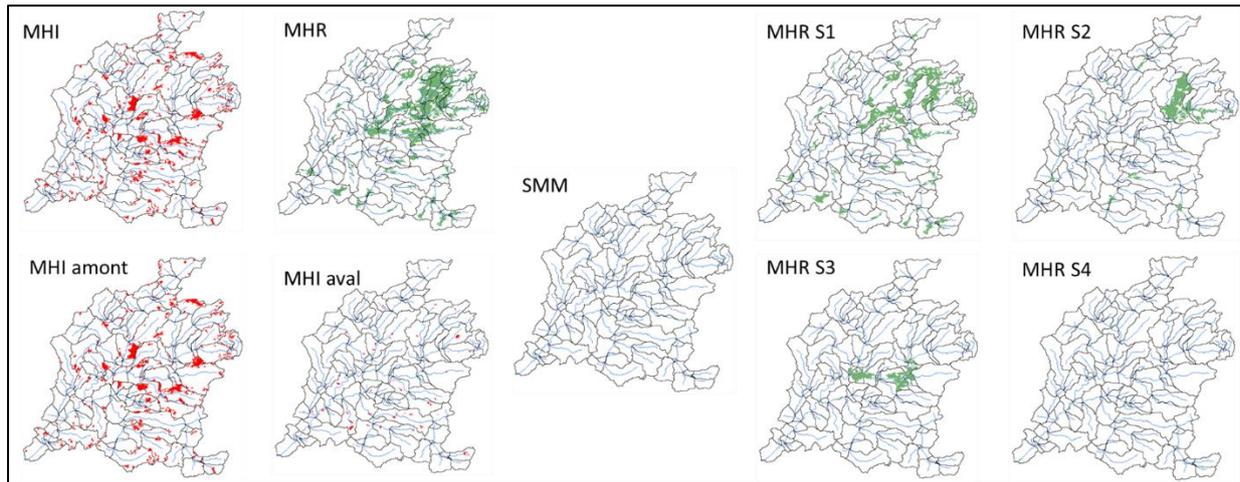


Figure 7-11. Les huit scénarios hypothétiques de milieux humides ainsi que le scénario sans milieux humides. Les taches rouges et vertes représentent respectivement les milieux humides isolés et riverains.

La Figure 7-12 présente les résultats des débits maximums annuels de scénarios pour la période de simulation, c'est-à-dire 2000-2018. Les boîtes à moustaches illustrent la variabilité des débits maximum annuels durant la période de simulation. Les résultats montrent que la conservation des milieux humides riverains permet une meilleure réduction des pics de crue comme discuté dans la section 7-2. Les milieux humides isolés situés en amont présentent des performances relativement meilleures (valeur de  $Q_{max}$  inférieure) que ceux situés en aval. Cela peut être lié à leur plus grande aire de drainage (voir le Tableau 7-2) stockant une plus grande quantité du ruissellement de surface produit. En ce qui concerne les milieux humides riverains, ceux connectés au cours d'eau de premier ordre affichent une meilleure performance de réduction des crues que les milieux humides riverains adjacents au chenal principal.

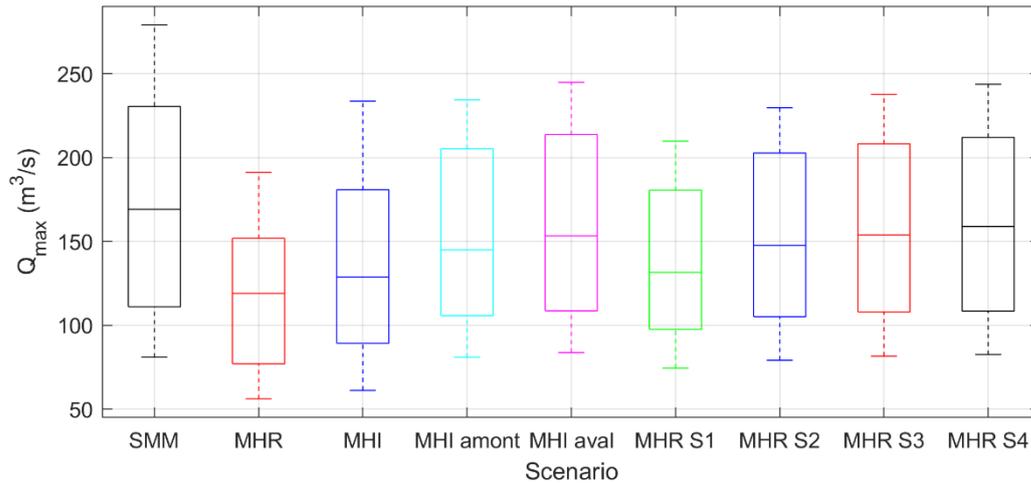


Figure 7-12. Débit maximal annuel de différents scénarios de couverture des milieux humides. Voir le texte pour la description des acronymes.

Les  $Q_{max}$  présentés dans la Figure 7-12 révèlent la façon dont la typologie et l'emplacement des milieux humides peuvent jouer un rôle dans le potentiel de réduction des crues des milieux humides. Cependant, comme les scénarios ont une couverture de milieu humide et une aire de drainage différentes, la normalisation des résultats en fonction de leur superficie montrera mieux la réduction des crues associée sous une surface unitaire. Pour ce faire, 'l'indice spécifique des milieux humides' introduit par Fossey et al. (2016) est utilisé et se définit comme suit :

$$WSI_i = \frac{(Q_{max,i} - Q_{max,SMM})}{A_{wet,i}} \quad (7-1)$$

Où  $WSI_i$  ( $m^3/s/km^2$ ) est l'indice spécifique du milieu humide pour le scénario  $i$ ,  $Q_{max,i}$  est le débit maximal annuel pour le scénario  $i$ ,  $Q_{max,SMM}$  est le débit maximal annuel pour le scénario sans milieux humides et  $A_{wet,i}$  est la superficie du milieu humide dans le scénario  $i$ . Le  $WSI$  est négatif car la présence des milieux humides réduit le débit maximal. Plus la valeur du  $WSI$  est négative, plus le scénario est efficace pour réduire le débit de crue.

Tableau 7-2. Caractéristiques des scénarios hypothétiques des milieux humides.

<b>Scenario</b>	<i>Baseline</i>	<b>MHI</b>	<b>MHR</b>	<b>MHI amont</b>	<b>MHI aval</b>	<b>MHR S1</b>	<b>MHR S2</b>	<b>MHR S3</b>	<b>MHR S4</b>
<b>Superficie MHI (Km<sup>2</sup>)</b>	37,4	37,4	-	34,5	2,9	37,4	37,4	37,4	37,4
<b>Aires drainées par MHI (Km<sup>2</sup>)</b>	84,0	84,0	-	62,8	21,2	84,0	84,0	84,0	84,0
<b>Superficie MHR (km<sup>2</sup>)</b>	91,8	-	91,8	91,8	91,8	55,1	23,3	12,8	0,6
<b>Aires drainées par MHR (Km<sup>2</sup>)</b>	314,1	-	314,1	314,1	314,1	186,8	81,63	28,3	17,4
<b>Superficie totale de MH (Km<sup>2</sup>)</b>	129,2	37,4	91,8	126,3	94,7	92,5	60,7	50,2	38

Les valeurs WSI des scénarios sont illustrées à la Figure 7-13. On peut voir que suivant les résultats de la modélisation hydrologique, qu'un km<sup>2</sup> de milieu humide isolé peut réduire plus efficacement le débit maximal qu'un km<sup>2</sup> de milieu humide riverain. De plus, les milieux humides isolés situés en aval sont plus efficaces que ceux situés en amont. En ce qui concerne les scénarios des milieux humides riverains, ceux connectés au chenal principal (MHR S4) montrent meilleure performance par rapport aux milieux humides riverains situés dans des cours d'eau d'ordre supérieur dans la réduction des débits élevés (valeur de WSI plus négative que les autres). Ces résultats concordent avec ceux trouvés par Fossey et al., 2016 pour le bassin versant de Bécancour et sont nécessaires pour l'élaboration de plans de conservation des milieux humides.

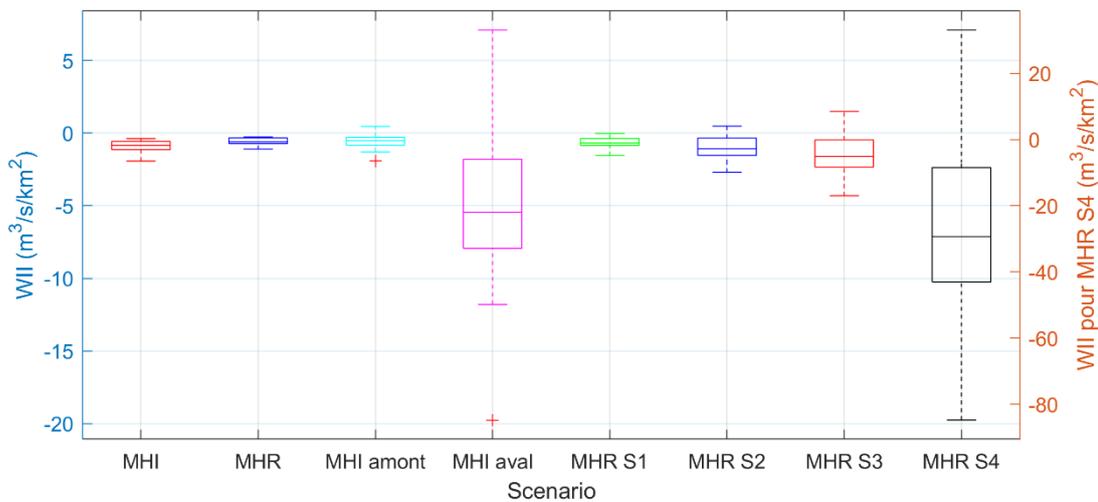


Figure 7-13. Indice spécifique des milieux humides pour les scénarios hypothétiques de milieux humides montré dans Figure 7-11.

### 7.5 Changements climatiques : impact des changements climatiques sur la dynamique du débit des sous-bassins Famine, Beaurivage, Basse, Haute et Moyenne Chaudière

Dans cette section, l'effet des changements climatiques sur le régime des débits sortants des principaux sous-bassins versants de la rivière Chaudière sera discuté. Trois types de résultats seront présentés: 1- à quoi ressemblera le régime futur de débits? 2- comment les crues vont évoluer à l'avenir? 3- comment les changements climatiques influence l'écoulement mensuel? Les changements relatifs présentés dans cette section seront basés sur la simulation de la période de référence, c'est-à-dire 1971-2000. Le scénario d'utilisation du territoire est le *Baseline*, scénario qui est représentatif de l'occupation 'actuelle' du sol du bassin.

La figure 7-14 présente les débits moyens journaliers des sous-bassins versants pour différents horizons de climat futur. L'horizon 1 correspond à la période 2021-2050, alors que l'horizon 2 correspond à la période 2041-2070. On constate qu'il y a un devancement de la période de la crue printanière dans tous les sous-bassins versants, en particulier pour la période future lointaine (2041-2070). Ceci est davantage observé pour les secteurs Moyenne Chaudière, Haute Chaudière, et de façon moins importante, pour Beaurivage. De plus, la Figure 7-9 révèle qu'il y a une augmentation du débit hivernal dans tous les sous-bassins versants.

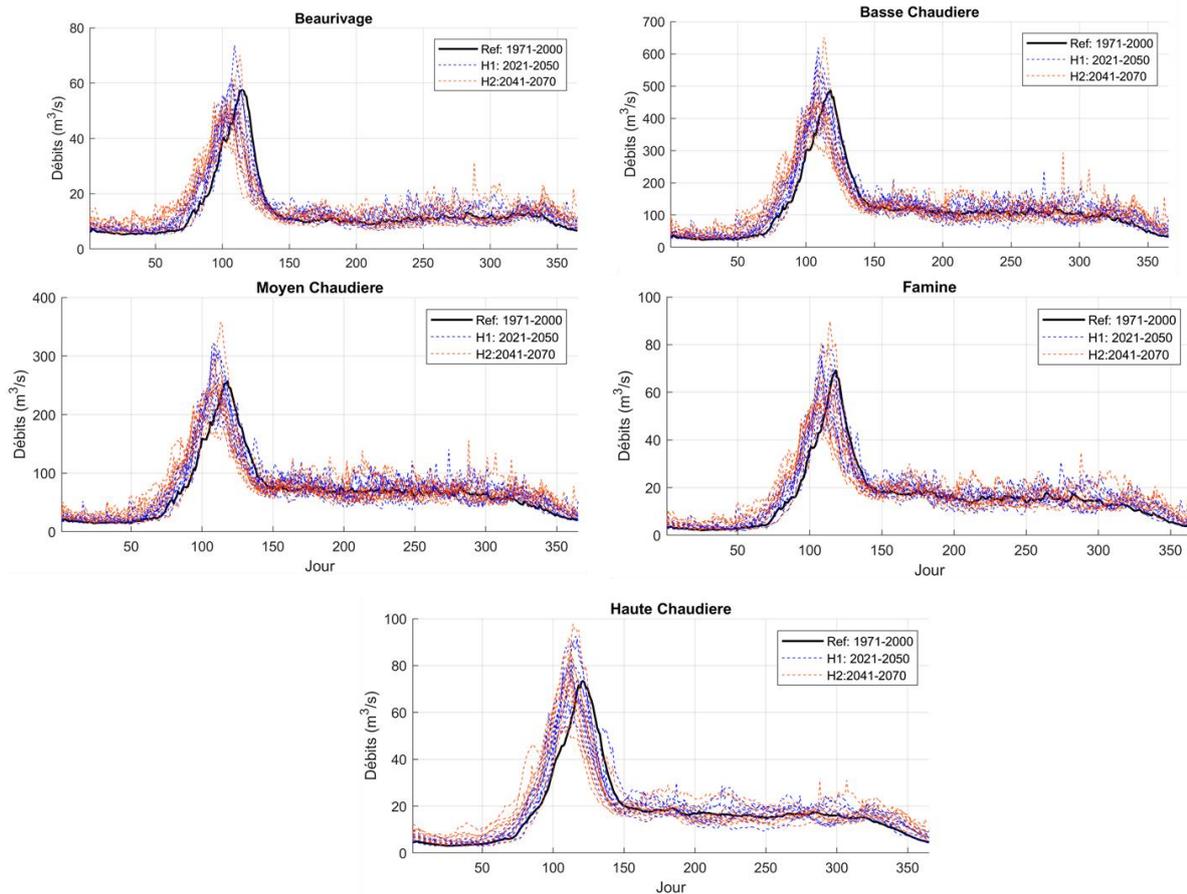


Figure 7-14. Hydrogrammes (moyennes journalières) des sous-bassins versants de la rivière Chaudière pour les horizons climatiques futurs proche (bleu) et lointain (rouge).

La figure 7-15 présente l'évolution des débits maximums annuels pour différents horizons climatiques. Alors que tous les sous-bassins versants ont tendance à avoir un débit accru pour le futur lointain (2041-2070), l'augmentation est moins nette pour le futur proche (2021-2050). Par exemple, le maximum annuel à l'horizon 1 augmente en moyenne de 6%, 4%, 4% et 1% respectivement pour les secteurs Moyenne Chaudière, Basse Chaudière, Haute Chaudière et Famine. Le sous-bassin Beurivage, en revanche, montre une diminution de 3% du débit maximal annuel pour cet horizon. Pour l'horizon 2, une augmentation moyenne de 4%, 5%, 10%, 14% et 17% a été observée pour les secteurs Beurivage, Famine, Moyenne Chaudière, Haute Chaudière et Basse Chaudière. L'augmentation moindre de débits dans les sous-bassins versants Beurivage et Famine peut être, du moins en partie, attribuée à leur couverture élevée en milieux humides (voir le Tableau 6-1). La vérification de cette hypothèse nécessiterait de réaliser des scénarios additionnels en faisant varier la superficie en milieux humides dans ces sous-bassins versants.

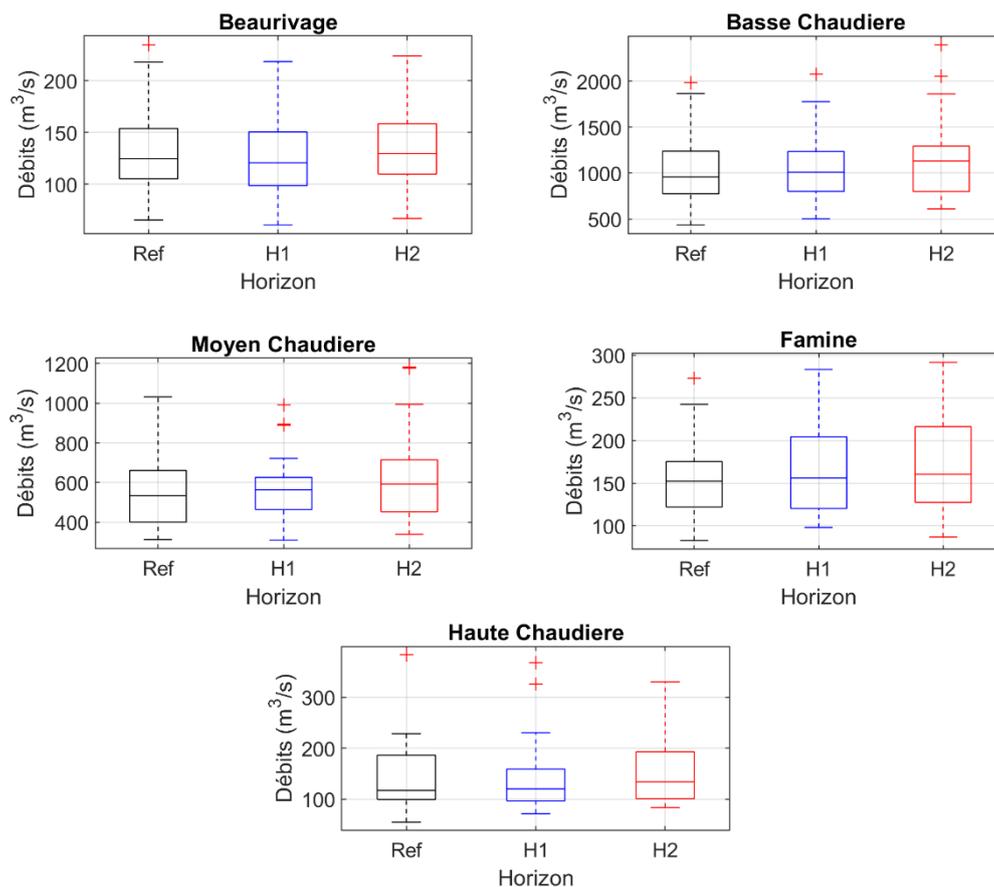


Figure 7-15. Débit maximal annuel des sous-bassins versants du bassin versant Chaudière dans les horizons climatiques futurs proche (bleu) et lointain (rouge).

Le pourcentage de variation de la moyenne des pics de crue annuels avec différentes périodes de retour (par rapport à la période de référence) pour différents horizons est présentée dans la Figure 7-16 et le Tableau 7-3. Les valeurs dans le Tableau 7-3 correspondent à la médiane des débits de crue en période de référence et à leur variation en pourcentage dans les deux horizons. Les limites supérieure et inférieure de la boîte à moustaches représentent la plage de variation par rapport aux projections climatiques utilisées. On note que des modèles climatiques ont résulté en la simulation de débits ‘extrêmes’, soient des valeurs au-delà du 95<sup>ème</sup> percentile (représentées par des croix rouges). L’analyse de la fréquence de crues a été effectuée en utilisant la fonction de distribution de probabilité log-normale, qui a donné le meilleur ajustement pour la série chronologique des débits maximums annuels en utilisant de test statistique d’Anderson Darling (Anderson & Darling, 1952).

La Figure 7-16 et le Tableau 7-3 montrent que l’effet des changements climatiques sur les pics de crue des sous-bassins versants diffère selon le sous-bassin considéré. Lorsque la médiane de la distribution des pics est considérée, on voit qu’il y a une augmentation de débits de crues pour tous les sous bassins sauf la Haute Chaudière, où une légère tendance à la diminution des crues pour l’horizon 1 est attendue. L’augmentation est plus importante dans le secteur de la Moyenne Chaudière, où Q<sub>350</sub> peut être 20% plus grand par rapport à la période de référence. Le sous-bassin Haute Chaudière présente la plus faible variation des crues, atteignant une

réduction de 2% au Q<sub>350</sub> pour l'horizon 1. Une augmentation médiane pour la même période de retour de 3% est obtenue à l'horizon 2.

Le sous-bassin de Beurivage montre une augmentation médiane allant jusqu'à 6% à l'horizon 1 et à 4% à l'horizon 2. Pour ce sous-bassin, les Q<sub>2</sub> et Q<sub>5</sub> à l'horizon 2 diminueront respectivement de 4% et 2%. Pour la Famine, l'augmentation médiane est beaucoup plus prononcée à l'horizon 2, soit de 3% à 21%, par rapport à l'horizon 1 avec 6% à 9%. Le secteur Basse Chaudière expérimente la deuxième plus forte augmentation de l'ampleur des pics des crues, qui se situe entre 10% à 15% à l'horizon 1 et entre 3% à 16% à l'horizon 2. Il importe de noter que les crues de grande récurrence, soient supérieures à 50 ans, comportent une marge d'incertitude élevée qui augmente avec la récurrence et doivent donc être interprétées avec discernement. Le nombre relativement faible de projections climatiques utilisées (10) est également une source d'incertitude pouvant influencer la distribution des changements de débits maximums simulés.

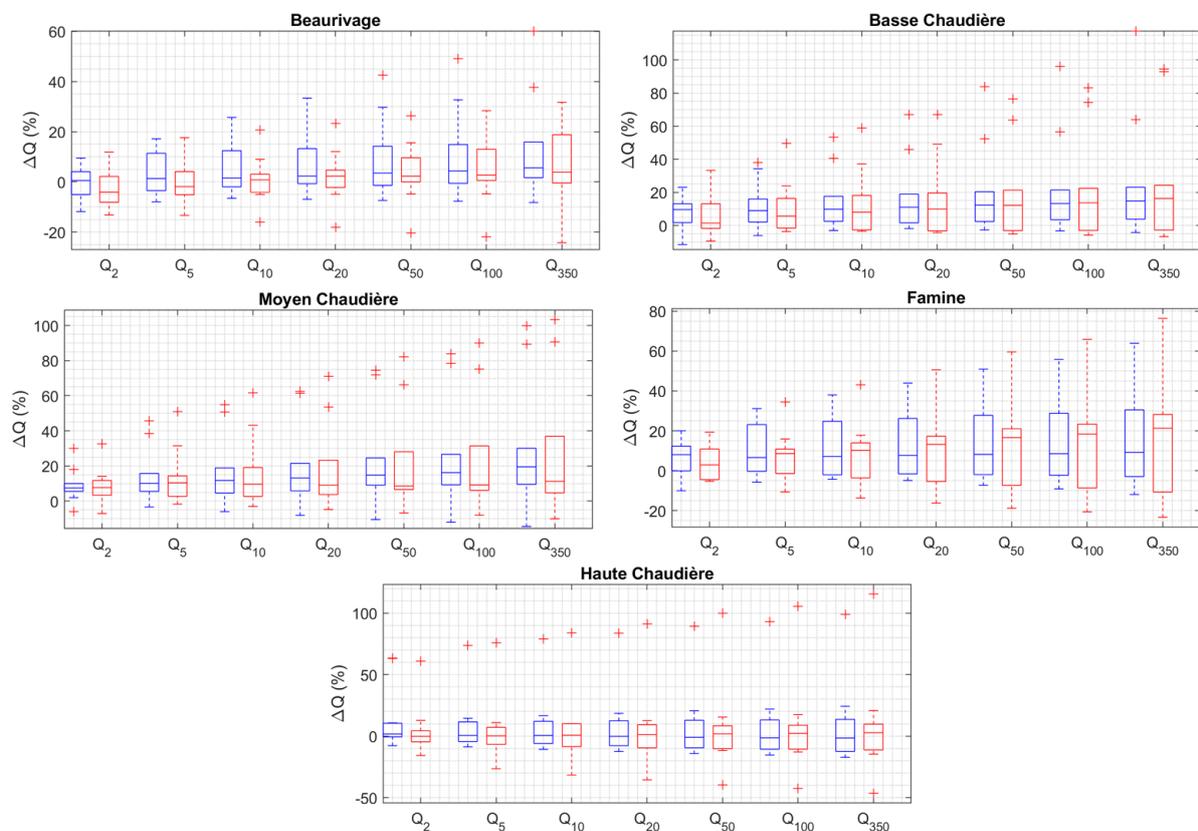


Figure 7-16. Variation de l'amplitude des débits des crues des sous-bassins par rapport à la période de référence pour l'horizon H1 (2021-2050) en bleu et H2 (2041-2070) en rouge.

La variation des débits mensuels dans le climat futur de chacun des sous-bassins hydrographiques étudiés est présentée à la Figure 7-17. La variation la plus significative se produit pendant la période hivernale, en particulier pour l'horizon 2, où le débit mensuel peut augmenter jusqu'à 110% (pour le cas de la Famine). Tous les sous-bassins versants présentent un comportement similaire dans la variation des débits mensuels. Par exemple, ils affichent tous une diminution du débit pour le mois de mai, une légère augmentation des débits estivaux et des débits accrus pour l'automne.

Tableau 7-3. Débits (médiane) des crues pour la période de référence (médiane) et variation en pourcentage dans les horizons 1 et 2. Les valeurs positives et négatives représentent respectivement l'augmentation et la réduction des débits.

Secteur	Q <sub>2</sub>			Q <sub>5</sub>			Q <sub>10</sub>			Q <sub>20</sub>			Q <sub>50</sub>			Q <sub>100</sub>			Q <sub>350</sub>		
	Ref	H1	H2	Ref	H1	H2	Ref	H1	H2	Ref	H1	H2	Ref	H1	H2	Ref	H1	H2	Ref	H1	H2
<b>Basse Chaudière</b>	921,9	+10	+3	1234,9	+10	+5	1430,6	+10	+8	1615,4	+11	+10	1856,1	+12	+12	2040,8	+13	+14	2379,6	+15	+16
<b>Moyenne Chaudière</b>	509,8	+8	+8	653,5	+10	+10	744,2	+12	+10	828,6	+13	+9	936,8	+15	+9	1019,3	+16	+9	1164,6	+20	+11
<b>Haute Chaudière</b>	128,1	+2	0	180,7	+1	0	220,7	+1	+1	260,5	0	+1	309,8	-1	+2	347,5	-1	+2	417,7	-2	+3
<b>Beaurivage</b>	120,1	0	-4	153,7	+2	-2	174,9	+3	+1	194,5	+3	+3	218,6	+4	+3	235,8	+5	+3	266,2	+6	+4
<b>Famine</b>	133,4	+7	+3	180,6	+6	+8	207,8	+6	+10	233,3	+6	+12	264,7	+7	+16	286,9	+7	+17	329,9	+9	+21

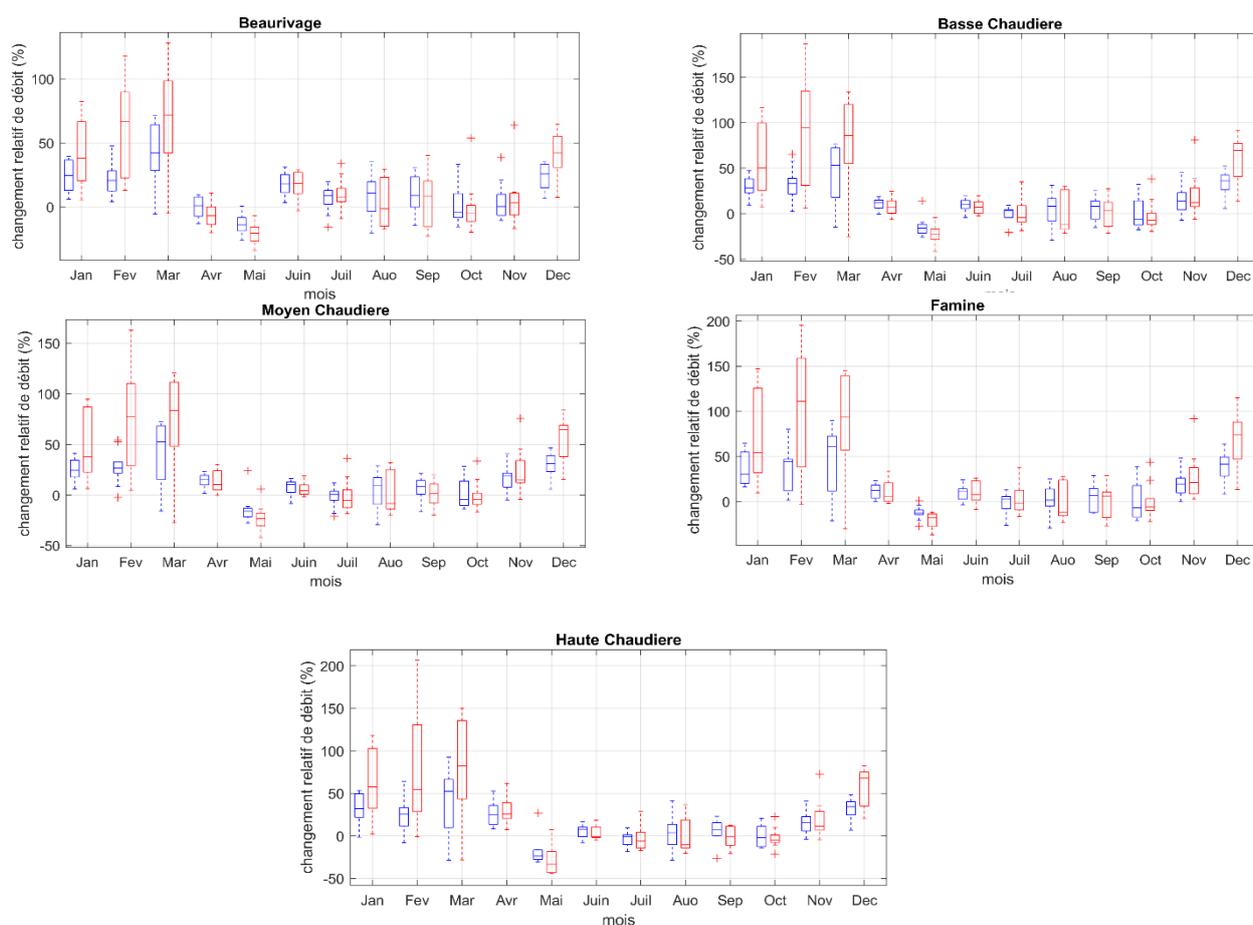


Figure 7-17. Variation saisonnière relative (par rapport à la période de référence) des débits mensuels des sous-bassins versants dans les horizons climatiques futurs proche (bleu) et loin (rouge).

## 7.6 L'effet de différents scénarios d'utilisation du territoire sur les débits de crues sans / avec effet des changements climatiques

Dans cette section, les changements du régime hydrologique du bassin versant selon différents scénarios d'utilisation du territoire sont discutés. Deux types de résultats sont présentés et discutés: 1) évolution des débits maximaux annuels pour différents scénarios d'occupation du sol pour la période de référence, soit l'horizon climat actuel; 2) analyse fréquentielle des crues par une évaluation de l'augmentation / diminution de  $Q_2$  à  $Q_{350}$  pour différents scénarios d'utilisation du territoire sans ou avec l'effet des changements climatiques. L'analyse aidera à mieux comprendre comment les débits de crue peuvent être influencés par le changement de l'utilisation du territoire comparativement à l'effet des changements climatiques. Puisque les chroniques de débits maximums couvrent toutes une plage de 30 années, les valeurs de  $Q_{100}$  et  $Q_{350}$  doivent être interprétés avec grande prudence, puisque la période de retour excède par 2 fois la longueur des chroniques de débit.

### 7.6.1 Évolution des débits maximums annuels pour différents scénarios d'occupation du sol sous des conditions de climat actuel

La Figure 7-18 présente les débits maximums annuels des sous-bassins versants simulés pour les différents scénarios d'utilisation du territoire détaillés dans la section 6.4. À noter que les

changements dans l'utilisation du territoire de la Basse Chaudière dans le scénario statu quo se situent en aval de la station hydrométrique et n'ont donc eu aucun effet sur les résultats de débit présentés à la Figure 7-18.

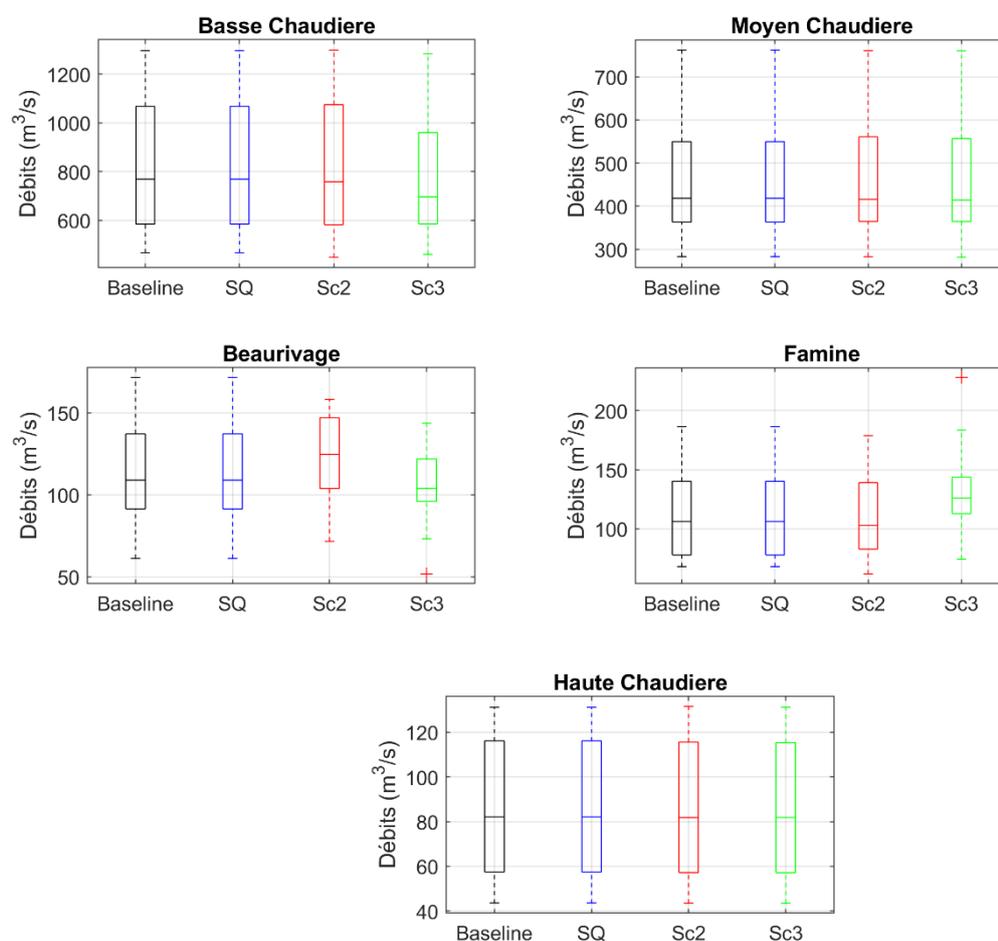


Figure 7-18. Comparaison des débits maximums annuels des sous-bassins versants dans différents scénarios d'utilisation des terres présentés à la section 6.4.

Dans le scénario 2, représentant le concept 'zéro perte nette', il y a une nette augmentation des débits maximums annuels pour Beaurivage. L'augmentation est associée à l'élimination de 1,8 km<sup>2</sup> de superficie de milieux humides et de 0,19 km<sup>2</sup> d'arbrisseaux en raison de l'augmentation de 0,19 km<sup>2</sup> de zones urbanisées, de 1,2 km<sup>2</sup> de zones agricoles et de 0,19 km<sup>2</sup> de forêts. Cela signifie que l'élimination des milieux humides dans ce sous-bassin versant peut grandement affecter l'ampleur des pics des crues, même s'il y a augmentation des superficies de milieux forestiers.

Dans le secteur Basse Chaudière, il y a une réduction des surfaces de 0,67 km<sup>2</sup> de milieux forestiers, de 0,25 km<sup>2</sup> de milieux humides, de 0,98 km<sup>2</sup> de milieux agricoles, de 0,85 km<sup>2</sup> d'arbrisseaux du fait de l'extension de 2,75 km<sup>2</sup> de zones urbanisées. Cependant, ces changements n'ont eu aucun effet significatif sur les débits maximums annuels de ce secteur.

Pour la Famine, la suppression de 0,08 km<sup>2</sup> de milieux humides remplacées par des zones urbanisées a entraîné une légère augmentation des débits maximums annuels.

Dans le secteur Moyenne Chaudière, on note une augmentation de la superficie des milieux humides de 0,58 km<sup>2</sup> en raison de la diminution de superficie pour les milieux forestiers (0,4 km<sup>2</sup>), les milieux agricoles (0,07 km<sup>2</sup>), les arbrisseaux (0,03 km<sup>2</sup>) et les zones urbanisées (0,07 km<sup>2</sup>). De tels changements dans ce secteur se sont traduits par une légère augmentation des débits maximaux.

Dans le secteur Haute Chaudière, on note une augmentation de la superficie des milieux humides de 0,84 km<sup>2</sup> et de la zone urbanisée de 0,21 km<sup>2</sup>, et une diminution des superficies forestières, agricoles et arbrisseaux respectivement de 0,31 km<sup>2</sup>, 0,37 km<sup>2</sup> et 0,37 km<sup>2</sup>. La comparaison des résultats montre que les milieux humides ajoutés ont pu limiter l'augmentation prévue des débits maximaux.

De manière générale, on peut conclure que le scénario 2 introduit des changements mineurs dans les débits maximums annuels à l'exutoire de chacun des 5 principales zones (sous-bassins) de la rivière Chaudière. Les débits du secteur Basse Chaudière, qui correspondent à ceux à l'exutoire du bassin versant Chaudière dans son ensemble, ne connaissent qu'une diminution marginale.

La comparaison des débits maximaux des scénarios 2 et 3 montre une nette réduction de l'ampleur des débits des crues pour les secteurs Basse Chaudière et Beaurivage et une augmentation pour le sous-bassin Famine. Les débits maximaux pour les secteurs Moyenne Chaudière et Haute Chaudière semblent peu affectés par les changements respectifs d'utilisation du territoire. À noter que la direction des changements d'utilisation du territoire (augmentation ou diminution des surfaces) dans le scénario 3 est similaire pour tous les secteurs, c'est-à-dire l'ajout de milieux humides, la conservation des forêts, la conversion des terres agricoles et milieux arbrisseaux et la diminution des surfaces des zones urbanisées. Cependant, les sous-bassins versants montrent des réponses différentes à des changements similaires, indiquant une relation complexe entre le changement d'utilisation du territoire et la réponse du bassin versant.

Dans tous les cas, les résultats comparatifs de la Figure 7-18 peuvent montrer que l'application du concept de « zéro perte nette » conservera la superficie totale des milieux humides, mais n'atténuera pas nécessairement les débits de crues du bassin versant. Une exception est le bassin Beaurivage, qui un accroissement notable de ses débits, résultat d'une perte en milieux humides au détriment d'augmentations en zones urbanisées et en milieu agricole. Des changements régionaux ou locaux sont cependant à prévoir, tout dépendant de l'importance du changement de l'occupation du territoire à ces échelles. Le présent rapport ne fait pas état de ces changements, mais le modèle hydrologique a été construit de manière à extraire les débits dans l'ensemble du réseau hydrographique du bassin de la rivière Chaudière. Le cas échéant, les valeurs de débits 'locaux' devront être interprétées avec prudence, car le modèle hydrologique n'a pas été calé à cette échelle. Concernant l'application des mesures « Bandes riveraines » et « corridor d'inondabilité », on constate une amélioration de l'atténuation des débits des crues pour Beaurivage et Basse Chaudière, mais pas pour les secteurs Haute Chaudière, Moyenne Chaudière et Famine.

### 7.6.2 Évolution du changement de $Q_2$ à $Q_{350}$ dans différents scénarios d'utilisation du territoire sans et avec l'effet des changements climatiques

Le Tableau 7-4 et la Figure 7-19 présentent les résultats de l'analyse fréquentielle de crues des scénarios d'utilisation du territoire 2 et 3 qui correspondent à la situation en climat actuel.

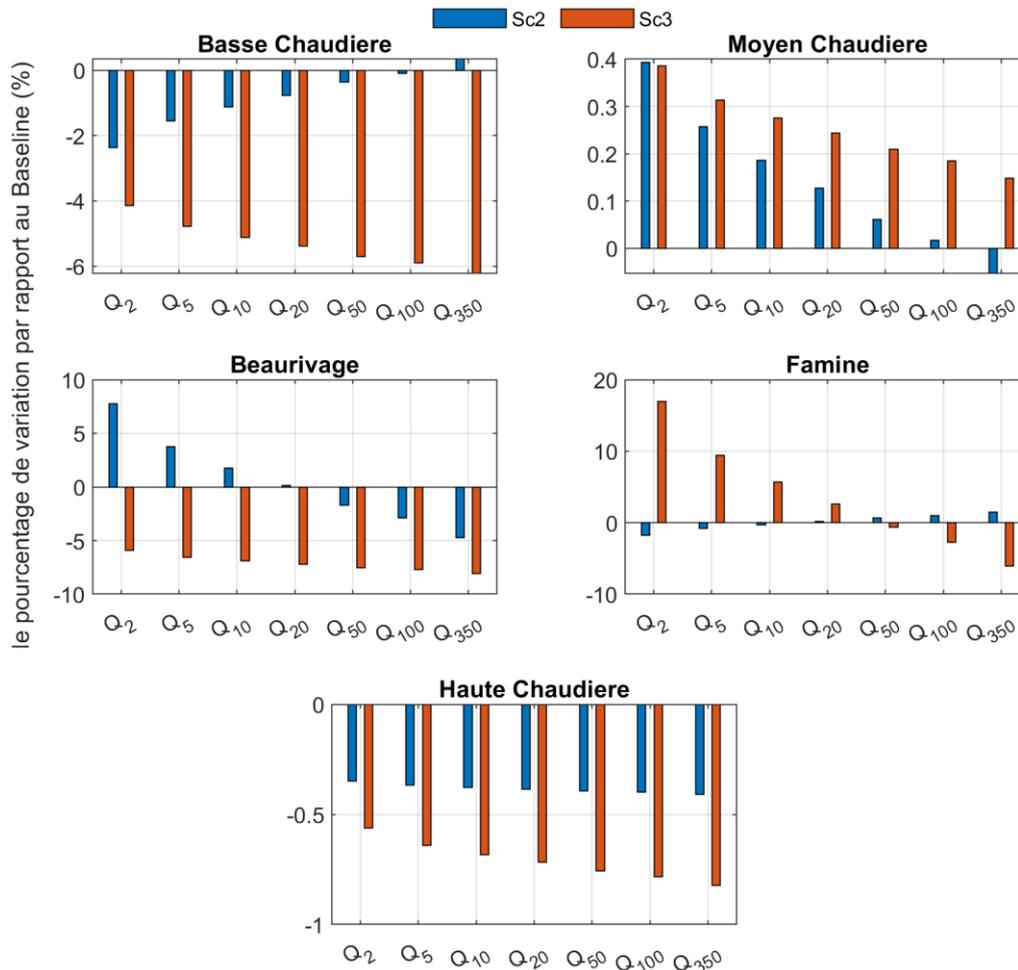


Figure 7-19. Variation de l'amplitude des débits des crues des sous-bassins pour les scénarios 2 et 3 par rapport à l'utilisation du territoire *Baseline*. Les valeurs + et - signifient respectivement augmentation et diminution des débits des crues par rapport à l'utilisation du territoire *Baseline*.

On y montre le pourcentage de variation de l'ampleur des débits de crue par rapport au scénario d'occupation du territoire *Baseline*. On peut voir dans le Tableau 7-4 que l'effet du changement d'utilisation du territoire sur l'ampleur des crues n'est pas uniforme pour les sous-bassins. Par exemple, le secteur Basse Chaudière affiche une réduction de 2,4% du  $Q_2$  pour le scénario 2, alors qu'une diminution de 0,8% et une augmentation de 0,3% sont obtenues respectivement à  $Q_{20}$  et  $Q_{350}$ . Pour ce secteur, le scénario 3 d'utilisation du territoire entraîne une réduction de 4,1% au  $Q_2$ , qui passe à 6,2% de réduction au  $Q_{350}$ . Le secteur Moyenne Chaudière montre une légère augmentation de l'ampleur des crues pour les scénarios 2 et 3. Pour ce secteur, le scénario 2 cause une augmentation du  $Q_2$  d'environ 0,4% et une réduction de 0,1% pour le  $Q_{350}$ . Le scénario 3 montre une augmentation de 0,4% du  $Q_2$  et 0,1% du  $Q_{350}$ . Pour le sous-bassin

Beaurivage, le  $Q_2$  augmente jusqu'à 7,7% dans le scénario 2, mais il change progressivement de direction de changement (d'une augmentation à une diminution des débits) à partir de  $Q_{50}$  (réduction de 1,7%) et arrive à 4,7 % de réduction au  $Q_{350}$ . Le scénario 3 pour ce sous-bassin montre une réduction continue des débits de crues de 5,9% au  $Q_2$  à 8,1% au  $Q_{350}$ . Le sous-bassin Famine montre comment les changements d'occupation du territoire peuvent entraîner une augmentation de l'ampleur de débits des crues. Alors qu'il y a une diminution de 1,8% au  $Q_2$  dans le scénario 2, une légère augmentation du pic de crue à  $Q_{20}$  est obtenue, qui augmente progressivement avec la récurrence pour atteindre 1,5% au  $Q_{350}$ . Une inversion dans la direction du changement est également obtenue pour le scénario 3, avec une augmentation de 16,9% du  $Q_2$  et une diminution du 6,1% au  $Q_{350}$ .

Pour le secteur Haute Chaudière, l'ampleur des crues diminue dans les scénarios 2 et 3, bien que très légèrement. Pour le scénario 2, la réduction est uniforme d'environ 0,4% du  $Q_2$  et au  $Q_{350}$ . Pour le scénario 3, il y a une augmentation monotone de la réduction des débits de 0,6% au  $Q_2$  à 0,8% au  $Q_{350}$ . À nouveau, les changements dans les débits de crue doivent être interprétés avec une prudence pour les grandes récurrences étant donné l'augmentation de l'incertitude des résultats associée à procédure d'analyse fréquentielle. Néanmoins, les résultats de la modélisation hydrologique illustrent que l'ampleur et la direction du changement des pics de crue varie d'un secteur à l'autre du bassin et traduisent la complexité des interactions entre l'écoulement et la couverture du territoire.

Les résultats du tableau 7-4 sont illustrés dans la Figure 7-19. On voit qu'il y a une légère réduction de l'ampleur des crues dans les scénarios 2 et 3 d'utilisation du territoire pour les sous-bassins Basse et Haute Chaudière. Cependant, les secteurs Moyenne Chaudière et Famine montrent une augmentation des pics de crue par rapport à l'utilisation des territoires du scénario *Baseline*.

Afin de déterminer comment ces variations de débits des crues seront affectées par les changements climatiques, l'analyse fréquentielle des crues pour différents scénarios d'utilisation du territoire est également effectuée pour les horizons 1 (2021-2050) et 2 (2041-2070) comme illustré dans les Figures 7-20 et 7-21. L'axe des ordonnées montre la variation de l'amplitude des débits des crues par rapport à la période de référence. Les limites supérieure et inférieure de la boîte à moustaches représentent la plage de variation, ou incertitude, par rapport aux projections climatiques utilisées.

Tableau 7-4. Ampleur des débits des crues sous différentes périodes de retour pour les scénarios d'occupation du territoire de statu quo et *Baseline* et les pourcentages de variation pour les scénarios 2 et 3. Une valeur négative (positive) représente une réduction (augmentation) des débits de crues.

Secteur	Q <sub>2</sub>			Q <sub>5</sub>			Q <sub>10</sub>			Q <sub>20</sub>			Q <sub>50</sub>			Q <sub>100</sub>			Q <sub>350</sub>		
	SQ/ Baseline	SC2	SC3	SQ/ Baseline	SC2	SC3	SQ/ Baseline	SC2	SC3												
Basse Chaudière	782,4	-2,4	-4,1	1041,2	-1,6	-4,8	1209	-1,1	-5,1	1367,7	-0,8	-5,4	1571,4	-0,4	-5,7	1723,8	-0,1	-5,9	1999,8	0,3	-6,2
Moyenne Chaudière	448,2	0,4	0,4	563,8	0,3	0,3	635,6	0,2	0,3	707,7	0,1	0,2	784,5	0,1	0,2	844,9	0	0,2	951,9	-0,1	0,1
Haute Chaudière	79,9	-0,4	-0,6	109	-0,4	-0,6	128,1	-0,4	-0,7	146,4	-0,4	-0,7	170,1	-0,4	-0,8	188,1	-0,4	-0,8	220,9	-0,4	-0,8
Beaurivage	110,8	7,7	-5,9	138,1	3,4	-6,6	154,9	1,8	-6,9	170,5	0,1	-7,2	189,7	-1,7	-7,6	203,8	-2,9	-7,7	228,6	-4,7	-8,1
Famine	109,5	-1,8	16,9	144,4	-0,8	9,4	166,9	-0,3	5,6	188,2	0,2	2,6	215,3	0,6	-0,6	235,5	0,9	-2,8	271,9	1,5	-6,1

L'examen des figures 7-20 et 7-21 montre d'une manière générale une plus grande incertitude dans les résultats de modélisation pour le scénario 2 comparativement au scénario 3. Les causes derrière un tel comportement ne sont pas bien comprises, mais il se peut qu'elles aient un lien avec l'analyse fréquentielle qui a servi pour établir les débits de récurrence. Il est aussi possible que le nombre de modèles / projections climatiques utilisés dans l'analyse (10) soit insuffisant pour quantifier adéquatement l'incertitude. On peut enfin penser que le comportement observé soit le résultat d'interactions complexes entre les données climatiques, les caractéristiques physiographiques des sous-bassins et le comportement hydrologique de ceux-ci. On note par exemple que le sous-bassin Haute Chaudière présente un patron d'incertitude différent des autres secteurs du bassin de la Chaudière. Or, ce sous-bassin est celui possédant la plus grande proportion de son territoire en forêts (77.1%) et en milieux aquatiques (5.1%) des 5 secteurs à l'étude. C'est aussi celui où l'ajout de milieux humides suivant le scénario 2 est le plus grand. Les résultats tirés du scénario 2 en combinaison avec l'effet du changement climatique doivent donc être quantitativement interprétés avec prudence. Les paragraphes qui suivent détaillent les résultats tirés de ces figures pour chacun des principaux secteurs du bassin versant de la Chaudière.

Pour le secteur Basse Chaudière, le scénario d'utilisation du territoire 2 se traduit par une légère réduction de l'ampleur des pics de crue (par exemple -0,4 % en  $Q_{50}$ ) comme montré dans le Tableau 7-4 et à la figure 7-19. Comme l'exutoire du secteur Basse Chaudière correspond à celui du bassin Chaudière dans son ensemble, la légère diminution enregistrée est le résultat des modifications du territoire sur l'ensemble du bassin versant et pas uniquement sur celui du secteur Basse Chaudière. Puisque l'effet des changements climatiques sur ce secteur est une augmentation de la valeur médiane des débits de récurrence de 2 à 350 ans (voir Tableau 7-3 et figure 7-16), on s'attend à ce que la prise en compte du scénario 2 sous conditions de changements climatiques amenuise l'effet des changements climatiques sur les débits de récurrence. Or, les valeurs médianes augmentent, ce qui est un résultat contre intuitif. Les raisons évoquées au paragraphe ci-dessus peuvent expliquer ce comportement. Aussi, on peut se questionner sur l'emploi de la valeur médiane des débits de récurrence comme métrique pour caractériser l'effet combiné des changements climatiques et du changement de l'utilisation du territoire sur les pics de crue. En considérant le scénario 3 pour ce sous-bassin, la situation est cependant très différente, où l'augmentation attendue des pics de crue à l'horizon 1, qui est de l'ordre de 10 à 12% pour des débits de crue de récurrence de 2 à 50 ans (et jusqu'à 15% pour  $T=350$  ans, voir Tableau 7-3 et Figure 7-16) sera réduite d'environ 4 à 5% lorsque le scénario d'utilisation du territoire 3 est en vigueur. En d'autres termes, avec le scénario d'utilisation des territoire 3, l'impact des changements climatiques sur les pics de crue se traduira par des hausses plus modestes de 5 à 7%. Un phénomène similaire est attendu pour l'horizon 2 où une réduction jusqu'à 6% des pics de crue est attendue par le recours au scénario d'utilisation du territoire 3. Cela clarifie la façon dont la pratique de l'utilisation des terres peut atténuer l'ampleur accrue des pics des crues par les changements climatiques.

Dans le secteur Moyenne Chaudière, le scénario d'aménagement du territoire 2 entraîne une légère augmentation de l'ampleur des débits des crues (augmentation de 0,4 à 0,1% de  $Q_2$  à  $Q_{50}$ ) comme montré à la Figure 7-19 et au Tableau 7-4. Les résultats de la Figure 7-21 montrent qu'à l'horizon 1, on peut s'attendre à une augmentation allant de 8 à 23% de l'amplitude des crues entre  $Q_2$  et  $Q_{50}$ . On s'attend à ce que l'effet combiné soit une augmentation de l'amplitude par rapport au seul effet des changements climatiques. Or, l'effet des changements climatiques

seuls suggère une augmentation de 8 à 15% de l'amplitude des pics de crues. En d'autres termes, il y a effectivement une aggravation de la situation future considérant l'introduction du scénario 2 par rapport au *Baseline*. Par contre, l'augmentation des crues en climat futur causée par l'introduction du scénario 2 est considérable, allant de 0 à 8% pour les crues de Q<sub>2</sub> à Q<sub>50</sub>, ce qui est largement supérieur au seul effet du scénario 2. Les causes de cette amplification ne sont pas connues avec certitude et ont été évoquées plus haut (analyse fréquentielle, faible nombre de projections climatiques, complexité des interactions climat-hydrologie-territoire). On peut quand même avancer que le scénario d'utilisation des terres 2 entraînerait une augmentation de l'ampleur des crues à l'horizon 1, et que les changements climatiques peuvent intensifier l'effet négatif de l'utilisation du territoire par une augmentation d'amplitude des crues. Une situation similaire prévaut à l'horizon 2, à savoir que l'introduction du scénario 2 d'utilisation du territoire va aggraver l'effet des changements climatiques sur les pics de crues.

Compte tenu du scénario d'utilisation des terres 3, l'ampleur des débits des crues augmente entre 0,1% et 0,4% dans l'horizon climatique actuel (Figure 7-19 et Tableau 7-4). Avec le scénario 3 d'utilisation des terres, l'effet négatif des changements climatiques à l'horizon 1, soit une augmentation de 8 à 15% de la médiane de Q<sub>2</sub> à Q<sub>50</sub> (et jusqu'à 20% pour le Q<sub>350</sub>) sera réduit de 0 à 5%, la réduction augmentant avec la récurrence (jusqu'à 6% pour le Q<sub>350</sub>). Pour ce sous-bassin, le scénario 3 d'utilisation du territoire ne sera pas aussi efficace à l'horizon 2, où l'ampleur des pics de crue à cet horizon (valeur médiane des crues de récurrence 2 à 50 ans) est similaire à celle observée dans le scénario *Baseline* (Figure 7-19 et Tableau 7-4).

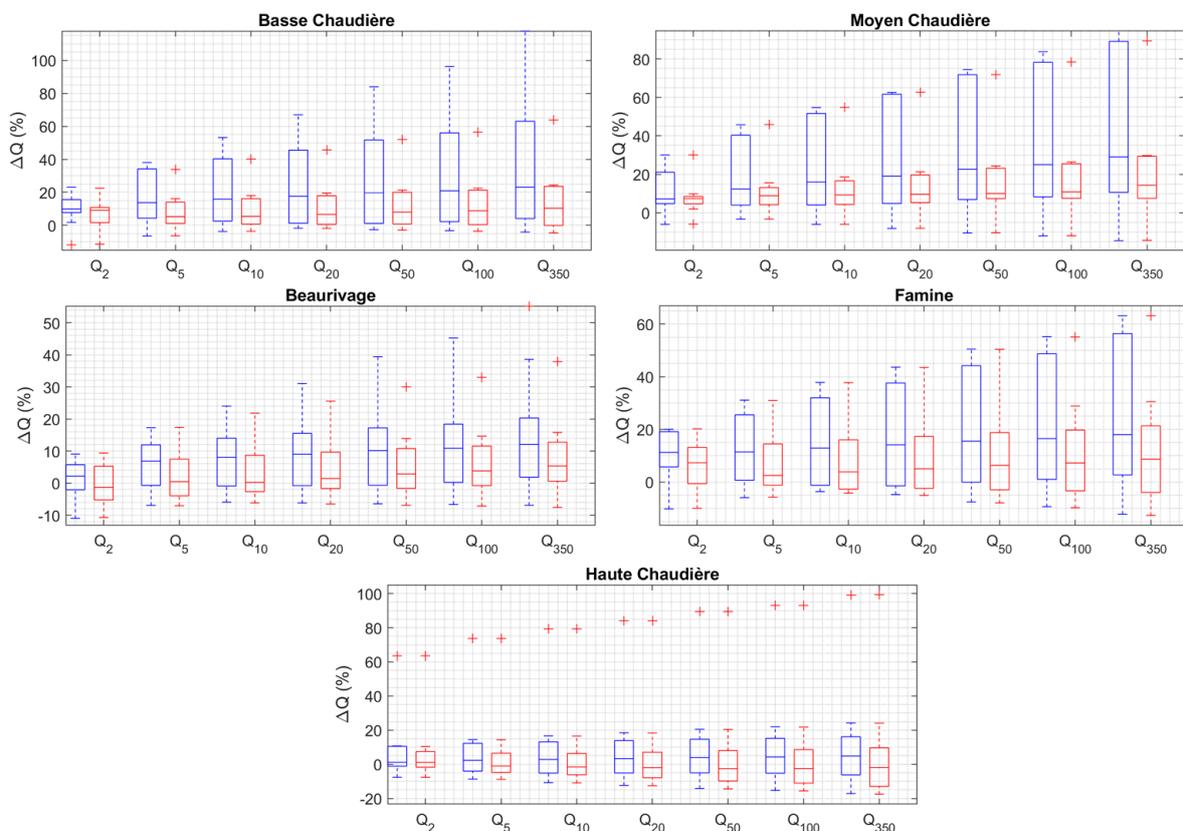


Figure 7-19. Variation (en pourcentage) de l'amplitude des débits des crues des sous-bassins pour les scénarios d'utilisation du territoire 2 (bleu) et 3 (rouge) pour l'horizon 1 par rapport à la période de référence.

Pour Beurivage, le scénario d'aménagement du territoire 2 entraîne une augmentation de 7,7% à 0,1% pour les pics des crues de Q<sub>2</sub> à Q<sub>20</sub> et une réduction de 1,7% à 4,7% pour les pics de crue entre Q<sub>50</sub> à Q<sub>350</sub>, comme le montrent la Figure 7-19 et le Tableau 7-4. Il s'agit du sous-bassin où l'effet du scénario 2 est le plus significatif. Pour ce sous-bassin, les changements climatiques provoquent une augmentation de 0 à 3% et de -4 à 3% de la médiane des crues Q<sub>2</sub> à Q<sub>20</sub> respectivement pour les horizons 1 et 2. L'augmentation attendue est de 4 à 6% et de 3 à 4% de la médiane des crues Q<sub>50</sub> à Q<sub>350</sub> respectivement pour les horizons 1 et 2. On doit donc s'attendre à ce que l'effet combiné amène une amplification de l'effet des changements climatiques par le recours au scénario 2 d'utilisation du territoire pour les crues de faible récurrence (2 à 20 ans) et à une réduction de l'effet pour les crues de plus grandes récurrences (50 à 350 ans). Si l'effet attendu a bien lieu pour les plus petites récurrences, où l'introduction du scénario 2 amène dans le futur une amplification de l'effet des changements climatiques de l'ordre de 2 à 5%, les crues de plus grandes récurrences sont également amplifiées. Un tel comportement trouve possiblement sa source dans les causes évoquées plus haut. D'autre part, le scénario 3 d'utilisation des terres peut entraîner jusqu'à 2% de réduction de l'effet des changements climatiques sur les valeurs médianes des pics de crue pour les récurrences de 2 à 50 ans pour l'horizon 1. Par contre, une augmentation des pics de crue de l'ordre de 1 à 8% est attendue à l'horizon 2. Ce résultat est à première vue contre intuitif et nécessite une analyse approfondie des résultats des simulations. Il n'est pas impossible que l'une ou l'autre des causes évoquées plus haut au sujet du scénario 2 explique ce résultat.

Pour la Famine, le scénario d'utilisation du territoire 2 entraîne une légère variation des pics à l'horizon climatique actuel, soit une réduction jusqu'à 2% pour les pics de crue Q<sub>2</sub> à Q<sub>10</sub> et augmentation jusqu'à 1,5% pour les autres. On s'attend par conséquent à une augmentation de l'effet des changements climatiques pour les faibles récurrences et à une diminution de l'effet pour les fortes récurrences avec le recours au scénario 2 d'utilisation du territoire. Or, si une augmentation de l'effet est effectivement constatée pour les pics de crue de récurrence 20 à 350 ans, cet effet, de l'ordre de 8 à 9%, dépasse largement l'effet seul du scénario 2 sous des conditions climatiques actuelles. À nouveau, la cause possible de cet effet d'amplification trouve sa source dans l'une ou l'autre des causes évoquées plus haut. Quant au scénario 3 d'utilisation du territoire, celui-ci montre une réduction modeste des pics de crue pour les récurrences excédant 20 années sous des conditions actuelles de climat. Pour ces récurrences, l'introduction du scénario 3 a tel que prévu une influence bénéfique sur les pics de crue dans le futur rapproché, soit l'horizon 1, en réduisant légèrement la valeur médiane des pics de 1%. Quant à l'horizon 2, une légère diminution des pics de crue est constatée pour les faibles récurrences (2 à 10 ans), alors qu'une faible augmentation des pics est obtenue pour les crues de forte récurrence. Ce dernier résultat devra être analysé en profondeur pour bien comprendre l'origine de cette augmentation.

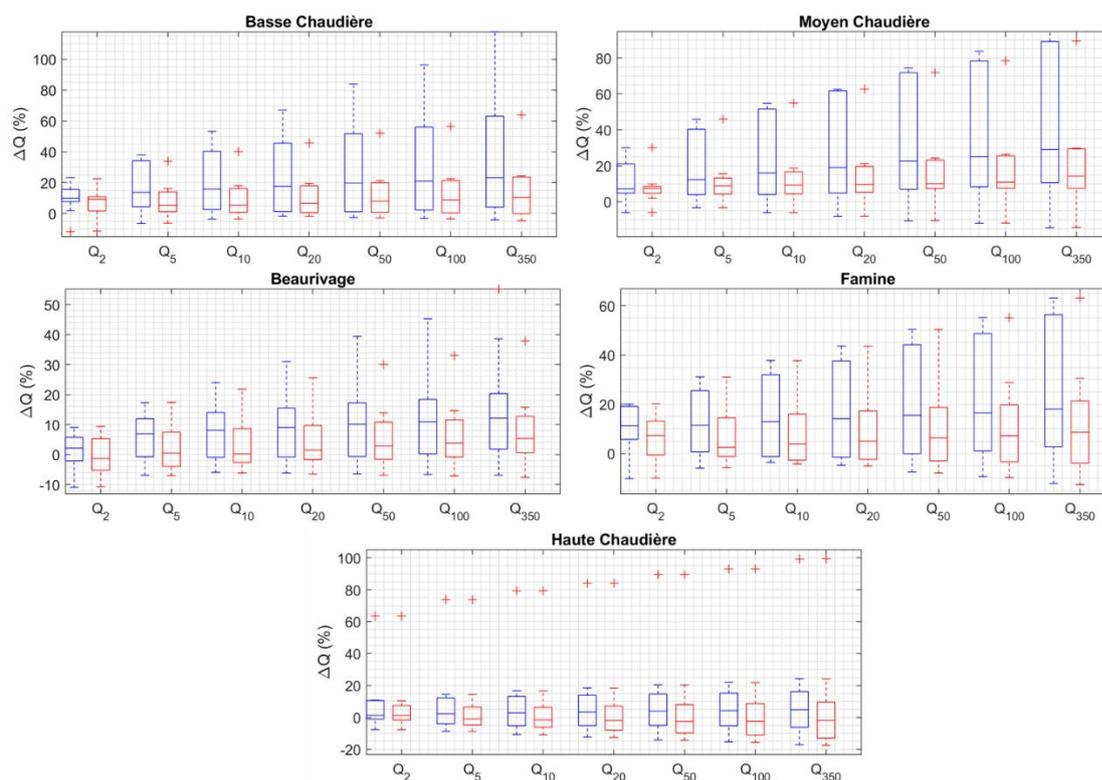


Figure 7-20. Variation de l'amplitude des débits des crues des pour les scénarios d'utilisation du territoire 2 (bleu) et 3 (rouge) pour l'horizon 2 (2041-2070) par rapport à la période de référence.

Pour le secteur Haute Chaudière, l'effet des changements climatiques sur les pics des crues est faible comparativement aux autres secteurs, atteignant jusqu'à 2% et 3% d'augmentation pour l'horizon 1 et 2 dépendamment des récurrences (2 à 350 ans). Le scénario 2 d'utilisation du territoire, qui prévoit une légère diminution de 0,4% des pics de crue pour l'ensemble des récurrences entre 2 et 350 ans en conditions actuelles de climat (Tableau 7-4 et Figure 7-19), amplifie l'effet du changement climatique et ce, pour les horizons 1 et 2. Tout comme pour les autres secteurs, cet effet est contre intuitif et provient possiblement de l'une ou l'autre des causes mentionnées plus haut. Le scénario 3 d'utilisation du territoire démontre son efficacité pour contrecarrer presque complètement l'augmentation prévue des changements climatiques, avec une réduction de l'effet de l'ordre de 1 à 2% à l'horizon 1, et jusqu'à 2 à 7% à l'horizon 2, dépendamment de la récurrence (2 à 350 ans). Par exemple, alors que l'augmentation prévue du Q50 est de 2% à l'horizon 2 avec le *Baseline*, l'introduction du scénario 3 prévoit une diminution du débit de 3% pour cet horizon. Cela montre que si le signal des changements climatiques est faible (pas beaucoup d'augmentation de la magnitude des pics des crues) le scénario d'utilisation du territoire 3 peut complètement annuler son effet négatif. Cependant, lorsque le signal est fort (par exemple pour les secteurs Moyenne et Basse Chaudière), le scénario d'utilisation du territoire 3 diminuera l'effet d'augmentation résultant des changements climatiques, sans toutefois pouvoir complètement compenser son effet.

L'analyse comparative présentée ci-dessus montre comment l'effet combiné de l'utilisation des terres et du changements climatiques influence les débits des crues. Tel que mentionné, les résultats faisant appel au scénario 2 d'utilisation du territoire comportent des incohérences.

Alors que les effets du scénario 2 sur les pics de crue de récurrence 2 à 350 ans sont globalement modestes, la combinaison de scénario avec les scénarios de changements climatiques a produit des résultats inattendus. Par exemple, la combinaison des deux effets qui, pris séparément, proposaient une augmentation des pics de crue, a amené à une amplification importante de l'effet combiné. Des causes possibles ont été identifiées, comme la procédure d'analyse fréquentielle employée pour obtenir les débits de récurrence 2 à 350 ans; le nombre relativement faible de projections climatiques utilisées dans les simulations, qui exerce une importante influence sur la distribution des débits de récurrence obtenue à partir de ces projections; ainsi que des interactions complexes climat-hydrologie-utilisation du territoire, qui nécessitent une analyse fine des résultats de simulation obtenus. La prudence est donc de mise quant à l'interprétation quantitative des résultats obtenus.

D'autre part, l'effet du scénario 3 d'utilisation du territoire étant plus fort que celui du scénario 2, la combinaison du scénario 3 avec le signal des changements climatiques a produit une réponse sur les débits de récurrence globalement en accord avec les effets séparés de ces deux perturbations anthropiques. Il en ressort que le scénario 3 d'utilisation du territoire se traduit par une réduction de l'effet des changements climatiques dans tous les sous-bassins versants sauf pour Beaurivage à l'horizon 2 et dans le bassin Famine pour les débits de récurrence supérieures à 20 ans à l'horizon 2. Les réductions ne sont cependant pas assez fortes pour contrebalancer l'effet des changements climatiques sauf pour la Haute Chaudière où le scénario 3 pourra neutraliser complètement l'effet à la hausse des pics de crues causé par les changements climatiques. Le Tableau 7-5 résume l'ensemble des résultats présentés concernant l'effet des changements climatiques et des scénarios d'utilisation du territoire sur l'ampleur des pics de crue. Les couleurs bleue, verte et orange représentent respectivement l'effet des changements climatiques seul, l'effet du scénario d'utilisation de territoire seul et l'effet combiné de l'utilisation de territoire et des changements climatiques sur l'ampleur des débits des crues.

Tableau 7-5. Résumé de l'effet du changements climatiques et de l'utilisation des terres sur l'ampleur des pics de crue des sous-bassins, couvrant les récurrences de 2 ans à 50 ans.

Secteur	Scénario d'utilisation de territoire/ horizon climatique							
	SQ		SQ → SC2			SQ → SC3		
	Horizon climatique		Horizon climatique			Horizon climatique		
	H1 : 2021-2050	H2 :2041-2070	Actuel	H1:2021-2050	H2:2041-2070	Actuel	H1:2021-2050	H2:2041-2070
<b>Basse Chaudière</b>	10% à 12% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000)	3% à 12% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000)	0,4 à 2,4% diminution de débits des crues par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	10% à 20% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000) Effet LU: jusqu'à 8% augmentation par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	7% à 19% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000) Effet LU: 4% à 7% augmentation par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	4,1% à 5,7% diminution de débits des crues par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	5% à 10% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000) Effet LU: jusqu'à 5% diminution par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	1% à 11% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000) Effet LU: 2% à 5% diminution par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline
<b>Moyen Chaudière</b>	8% à 15% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000)	8% à 10% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000)	0,1 à 0,4% augmentation de débits des crues par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	8% à 23% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000) Effet LU: jusqu'à 8% augmentation par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	10% à 13% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000) Effet LU: 3% à 4% augmentation par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	0,2% à 0,4% augmentation de débits des crues par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	8% à 10% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000) Effet LU: jusqu'à 5% diminution par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	5% à 10% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000) Effet LU: jusqu'à 3% diminution par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline
<b>Haute Chaudière</b>	1% diminution à 2% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000)	jusqu'à 2% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000)	0,4% diminution de débits des crues par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	jusqu'à 4% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000) Effet LU: jusqu'à 5% augmentation par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	jusqu'à 3% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000) Effet LU: jusqu'à 3% augmentation par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	0,6% à 0,8% diminution de débits des crues par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	3% diminution à 1% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000) Effet LU: neutraliser l'augmentation causé par changement climatique	2% à 3% diminution de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000) Effet LU: neutraliser l'augmentation causé par changement climatique
<b>Beaurivage</b>	jusqu'à 4% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000)	4% diminution à 3% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000)	7,7% augmentation à 1,7% diminution de débits des crues par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	2% à 12% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000) Effet LU: 2% à 6% augmentation par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	jusqu'à 8% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000) Effet LU: 2% à 5% augmentation par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	5,9% à 7,6% diminution de débits des crues par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	jusqu'à 3% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000) Effet LU: jusqu'à 2% diminution par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	2% à 6% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000) Effet LU: jusqu'à 8% augmentation par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline
<b>Famine</b>	6% à 7% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000)	3% à 16% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000)	1,8% diminution à 0,6% augmentation de débits des crues par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	11% à 15% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000) Effet LU: 4% à 8% augmentation par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	5% à 20% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000) Effet LU: 2% à 4% augmentation par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	2,6% à 16,9% augmentation de débits des crues par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	3% à 7% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000) Effet LU: jusqu'à 3% diminution par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline	3% à 17% augmentation de débits des crues par apport à la période de référence (1971-2000) Effet LU: jusqu'à 3% augmentation par apport au scénario d'utilisation de territoire Baseline

## 8. Conclusion et recommandations

Les milieux humides, en tant qu'«hotspot» de la biodiversité dans nos systèmes environnementaux, offrent une large gamme d'avantages hydro-écologiques tels que l'atténuation des charges de contaminants / sédiments transportés dans le réseau hydrographique, le stockage des eaux de ruissellement et l'atténuation des crues et l'augmentation des débits d'étiage pendant la période estivale. Cette recherche visait à examiner la capacité des milieux humides du bassin versant de la Chaudière pour atténuer les crues à l'aide d'une version révisée du modèle hydrologique SWAT pour y inclure une représentation distincte des milieux humides isolés et riverains. Alors que dans la structure originale du modèle, aucune interaction entre les milieux humides isolés et riverains et entre les milieux humides isolés eux-mêmes n'est définie, dans la version révisée, les unités de réponses hydrologiques (URH) se drainant vers les milieux humides isolés sont identifiées et l'interaction entre les milieux humides isolés et les milieux humides riverains est prise en compte. Ces modifications ont permis de mieux comprendre l'interaction entre les milieux humides et le territoire environnant, ce qui est stratégiquement important pour COBARIC et les MRC dans l'élaboration de leurs futurs plans d'utilisation du territoire. Afin de représenter les milieux humides riverains reliés aux réseaux hydriques en amont ainsi que ceux reliés au chenal principal, le bassin versant de la rivière Chaudière a été subdivisé en 1064 sous-bassins, chacun étant ensuite divisé en plusieurs URH qui sont les éléments de calcul du modèle hydrologique.

Compte tenu des caractéristiques pédologiques, topographiques et d'utilisation du sol qui sont hétérogènes à l'échelle du bassin versant, un calage et une validation distincts ont été effectués sur cinq secteurs (ou sous-bassins) du bassin versant, soit les sous-bassins Haute Chaudière, Moyenne Chaudière, Basse Chaudière, Famine et Beurivage, pour lesquels les observations du débit sont disponibles.

Pour déterminer la limite maximale jusqu'à laquelle les milieux humides peuvent réduire les débits des crues, une série de scénarios hypothétiques de suppression de milieux humides a été conçue sur deux secteurs ayant une couverture importante de milieux humides, c'est-à-dire les sous-bassins Famine et Beurivage. Ces scénarios sont: la suppression de tous les milieux humides isolés, la suppression de tous les milieux humides riverains et la suppression complète des milieux humides. Dans chacun des scénarios, on a supposé que les milieux humides enlevés étaient remplacés par des terres agricoles, illustrant les conséquences des activités agricoles extensives de la région. La comparaison de l'ampleur des débits des crues issus de ces scénarios avec celle résultant de l'utilisation actuelle d'utilisation du territoire sur le bassin versant (scénario *Baseline*) a montré que la dégradation complète des milieux humides peut augmenter les débits de crue de 31% (pour  $Q_2$ ) à 33% (pour  $Q_{100}$ ) dans le cas de Beurivage et de 42% (pour  $Q_2$ ) à 53% (pour  $Q_{100}$ ) pour Famine. Cela montre l'effet significatif des milieux humides sur les débits sortants de ces sous bassins. De plus, l'élimination des milieux humides riverains a eu un effet beaucoup plus marqué sur l'augmentation du débit que les milieux humides isolés, ce qui indique l'importance de leur conservation dans le plan futur d'utilisation du territoire du bassin versant. Les scénarios d'élimination des milieux humides ont ensuite été utilisés pour comprendre comment la dégradation des milieux humides affecte les débits mensuels par rapport au régime de débit actuel du bassin versant. Les résultats ont révélé que, sauf au printemps, le retrait des milieux humides isolés peut modifier les régimes de débits mensuels beaucoup plus fortement que le retrait des milieux humides riverains. Par exemple,

dans le cas du sous-bassin Beurivage, le retrait des milieux humides isolés a réduit le débit hivernal (décembre à février) entre 28 et 35 % alors que la réduction due au retrait des milieux humides riverains est d'environ 5 %. Pendant l'été (juin à août), la suppression des milieux humides riverains a entraîné en moyenne une augmentation de près de 10 % des débits mensuels, tandis que la suppression des milieux humides isolés a entraîné une diminution d'environ 10 % des débits moyens mensuels. La comparaison des variations des débits mensuels de Famine et Beurivage a également montré que le bassin versant forestier (Famine) est plus résilient que le bassin agricole (Beurivage) en réponse au retrait des milieux humides.

Le module amélioré des milieux humides du modèle SWAT a permis d'identifier la typologie optimale des milieux humides avec une efficacité significative de réduction des crues. À cette fin, les milieux humides isolés ont été classés en amont et aval en fonction de leur proximité relative avec le réseau hydrographique, et les milieux humides riverains ont été regroupés en fonction de leur connexion à l'ordre de *Strahler* du segment de rivière correspondant. La méthodologie a été appliquée au sous-bassin de Famine où les milieux humides riverains et isolés couvrent respectivement 13 % et 5,3 % de la superficie du bassin versant. Les résultats de la simulation ont ensuite été normalisés pour calculer la réduction attendue d'une unité de surface (km<sup>2</sup>) du milieu humide. Les résultats ont montré que 1 km<sup>2</sup> de milieu humide riverain connecté au chenal principal réduisait mieux les débits des crues que toute autre combinaison typologie-emplacement de milieu humide. Le deuxième milieu humide le plus efficace était les milieux humides isolés situés en amont des sous-bassins.

L'évaluation des régimes de débits à l'exutoire des cinq grands sous-bassins de la Chaudière dans le contexte du changements climatiques a fait l'objet de la cinquième partie de cette recherche. Les précipitations quotidiennes ainsi que la température maximale et minimale quotidienne issues de 10 projections climatiques de CORDEX avec différentes résolutions spatiales et scénarios d'émission de gaz à effet de serre ont été utilisées pour simuler le modèle hydrologique sur les horizons futurs 2021-2050 (horizon 1) et 2041-2070 (horizon 2). Les résultats de la simulation ont montré une augmentation des débits hivernaux et un devancement de la période de crues printanières pour l'ensemble des sous-bassins. Aussi, l'analyse de fréquence des crues a révélé une augmentation des pics de crues par rapport à la période de référence, 1971-2000, pour tous les sous-bassins étudiés. Par exemple, l'augmentation attendue du débit maximal de récurrences 20 et 50 ans à l'horizon 2020-2050 varie respectivement de 8 à 20 % et de 3 à 21 % selon le sous-bassin étudié, en moyennant la réponse hydrologique pour l'ensemble des modèles climatiques étudiés. Les augmentations attendues à des récurrences plus élevées doivent cependant être interprétées avec circonspection étant donné l'extrapolation inhérente au processus d'analyse fréquentielle des crues aux récurrences dépassant le nombre d'années (ici 30) considérées dans l'étude.

L'analyse de la variation de l'ampleur des débits des crues dans différents scénarios d'utilisation du territoire sans et avec l'effet du changements climatiques a fait l'objet de la dernière section du chapitre 7. Les résultats comparatifs ont montré que la modification de l'utilisation du territoire dans le scénario 2, soit le scénario du 'zéro perte nette' en milieux humides, peut diminuer les pics des crues de la Basse Chaudière (jusqu'à 2,4 %) et de la Haute Chaudière (moins de 1 %). Cependant, on s'attend à ce que les autres secteurs aient des pics des crues plus élevés que le scénario d'utilisation du territoire *Baseline*. Cela montre que la conservation et la réorganisation des milieux humides dans le scénario 2 n'amélioreraient pas les risques d'inondation de tous les sous-bassins. En effet, suivant ce scénario, la réorganisation de la

couverture des milieux humides peut entraîner une réduction de la superficie des milieux humides dans certains secteurs (comme la Famine) qui peuvent par conséquent augmenter leurs débits de crue. De plus, comme indiqué précédemment, l'efficacité de la réduction des crues par les milieux humides n'est pas seulement affectée par leur superficie et leur typologie, mais aussi par leur interaction avec d'autres éléments du paysage. Par exemple, si le milieu humide ajouté est situé en aval d'une zone urbanisée, il peut stocker plus efficacement le ruissellement en amont qu'un cas où il y a moins d'interaction entre le milieu humide ajouté et les terres entourées. Dans le scénario 3, l'ampleur des débits est réduite pour la Basse Chaudière (4 % à 6 %), Beaurivage (6 % à 8 %) et la Haute Chaudière (moins de 1 %) et, de manière inattendue, augmentée pour la Famine (jusqu'à 17 %) et Moyenne Chaudière (0,3 %) indiquant une différence dans la réponse du sous-bassin à une direction similaire dans les changements d'utilisation des terres (voir le Tableau 6-9). Ces résultats illustrent les interactions complexes entre la couverture territoriale et l'écoulement dans les bassins versants. Ils indiquent aussi qu'il faut user de prudence dans l'interprétation des résultats obtenus, car un modèle hydrologique, aussi sophistiqué soit-il, demeure une représentation simplifiée de la réalité physique. Des incertitudes existent dans la structure même du modèle et dans la chaîne de calculs, incertitudes qui peuvent être réduites notamment grâce à davantage d'observations pour parfaire le calage du modèle.

Tel que mentionné, l'effet du scénario 2 pris seul suggère que son influence sur les débits maximum annuels sera modeste pour l'ensemble des secteurs de la rivière Chaudière, à l'exception du sous-bassin Beaurivage, où une augmentation importante des pics de crue est attendue pour les faibles récurrences, alors qu'une diminution des pics est obtenue pour des récurrences de 50 années et plus. On doit donc s'attendre à un effet en général modeste de ce scénario lorsque combiné au signal des changements climatiques. Or, ce comportement attendu ne s'est pas matérialisé à la lumière des résultats obtenus. Quelques éléments ont été mis en cause, notamment la procédure d'analyse fréquentielle employée pour obtenir les débits de récurrence 2 à 350 ans; le nombre relativement faible de projections climatiques utilisées dans les simulations, qui exerce une importante influence sur la distribution des débits de récurrence obtenue à partir de ces projections; ainsi que des interactions complexes climat-hydrologie-utilisation du territoire, qui nécessitent une analyse fine des résultats de simulation obtenus. On peut également penser que le choix du débit de récurrence médian comme métrique pour caractériser l'influence combinée du signal du changement territorial avec les changements climatiques n'est pas optimal et qu'une analyse de la distribution des débits de récurrence serait plus appropriée. D'autre part, l'effet du scénario 3 d'utilisation du territoire étant plus fort que celui du scénario 2, la combinaison du scénario 3 avec le signal des changements climatiques a produit une réponse sur les débits de récurrence globalement en accord avec les effets séparés de ces deux perturbations anthropiques. Plus particulièrement, tous les sous-bassins versants montrent une diminution de l'ampleur des débits des crues (par rapport à l'utilisation des terres de *Baseline*). Le gain est plus attendu pour Haute Chaudière où le scénario d'utilisation du territoire 3 est capable de neutraliser les pics des crues augmentés par les changements climatiques.

Il est important de noter que les résultats de cette recherche font l'objet de nombreuses hypothèses dans la représentation du système hydrologique. Par exemple, l'échange bilatéral de l'écoulement entre les milieux humides riverains reliés aux canaux principaux n'était pas représenté dans le modèle. De plus, en raison d'une représentation simplifiée du comportement

des eaux souterraines dans le modèle hydrologique, les interactions entre l'aquifère et les milieux humides ont été modélisée avec une approche conceptuelle des écoulements, dans laquelle la nappe aquifère est représentée par une approche dite 'à réservoirs'. Une approche de modélisation hydrologique basée physique, telle que le modèle intégré des eaux de surface et des eaux souterraines, pourrait mieux représenter cette dynamique. On rappelle que le bassin versant de la rivière Chaudière a fait l'objet d'un calage et d'une validation uniquement à l'exutoire de ses principaux sous-bassins. Une validation fine du modèle hydrologique, à l'échelle des petits sous-bassins lesquels renferment des milieux humides, n'a pu être réalisée faute d'observations à cette échelle. Il en résulte que les paramètres du modèle définissant le comportement des nombreux milieux humides parsemant le bassin versant n'ont pu être déterminés avec toute la précision souhaitée. Les résultats des modélisations offrent tout de même une performance acceptable, mais qui gagneraient en précision avec des observations de l'écoulement à l'échelle locale. Les résultats doivent donc être interprétés avec prudence, par exemple en considérant les tendances observées dans le comportement hydrologique simulé, plutôt que par une interprétation stricte des résultats quantitatifs tirés des simulations. Enfin, en ce qui concerne les résultats du changements climatiques, des simulations additionnelles incluant des projections climatiques supplémentaires permettraient de mieux cerner les incertitudes associées aux variations attendues des pics de crues.

## 9. Références

- Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J., Zobrist, J., & Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333(2), 413–430.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.09.014>
- Agriculture et Agroalimentaire Canada,. (2020). *Base Nationale de Données sur les sols (BNDS)*. <http://sis.agr.gc.ca/siscan/nsdb/index.html>
- Anderson, T. W., & Darling, D. A. (1952). Asymptotic Theory of Certain “Goodness of Fit” Criteria Based on Stochastic Processes. *Annals of Mathematical Statistics*, 23(2), 193–212. <https://doi.org/10.1214/aoms/1177729437>
- Bedinger, M. S. (1981). Paper 5—Hydrology of Bottomland Hardwood Forests of the Mississippi Embayment. *Developments in Agricultural and Managed Forest Ecology*, 11, 161–176. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42020-6.50013-5>
- Bissonnette, J., Demers, A., & Lavoie, S. (2016). *Utilisation du territoire—Utilisation du territoire 2016—Données Québec*. Développement durable, de l’Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC).  
<https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/utilisation-du-territoire/ressource/50c5fbc1-68c4-4c46-a663-f806a4515031>
- Bullock, A., & Acreman, M. (2003). The role of wetlands in the hydrological cycle. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 7(3), 358–389.
- Carrier, A. B., Nastev, M., Roy, M., Beaudoin, E., Giguère, P., & Bouffard, P. (2015). *Atlas des eaux souterraines du bassin versant de la rivière Chaudière, secteurs de la Basse-Chaudière et de la Moyenne-Chaudière* (Open File No. 7284; p. 202). Geological Survey of Canada.  
<https://geoscan.nrcan.gc.ca/starweb/geoscan/servlet.starweb?path=geoscan/fulle.web&search1=R=292860>
- EPA. (2006). *Wetlands: Protecting Life and Property from Flooding* (No. 843F06001). U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water.
- Evenson, G. R., Golden, H. E., Lane, C. R., & D’Amico, E. (2016). An improved representation of geographically isolated wetlands in a watershed-scale hydrologic model. *Hydrological Processes*, 30(22), 4168–4184.  
<https://doi.org/10.1002/hyp.10930>
- Fossey, M., & Rousseau, A. N. (2016). Can isolated and riparian wetlands mitigate the impact of climate change on watershed hydrology? A case study approach. *Journal of Environmental Management*, 184, 327–339.  
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.043>
- Fossey, M., Rousseau, A. N., & Savary, S. (2016). Assessment of the impact of spatio-temporal attributes of wetlands on stream flows using a hydrological modelling framework: A theoretical case study of a watershed under temperate climatic conditions. *Hydrological Processes*, 30(11), 1768–1781.  
<https://doi.org/10.1002/hyp.10750>
- Fossey, Maxime, Rousseau, A. N., Bensalma, F., Savary, S., & Royer, A. (2015). Integrating isolated and riparian wetland modules in the PHYSITEL/HYDROTEL modelling

- platform: Model performance and diagnosis. *Hydrological Processes*, 29(22), 4683–4702. <https://doi.org/10.1002/hyp.10534>
- Garneau, M., & Van Bellen, S. (2016). *SYNTHÈSE DE LA VALEUR ET LA RÉPARTITION DU STOCK DE CARBONE TERRESTRE AU QUÉBEC* (p. 60). Ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques du Québec.
- Gerardin, V., & McKenney, D. (2001). *Une classification climatique du Québec à partir de modèles de distribution spatiale de données climatiques mensuelles: Vers une définition des bioclimats du Québec*. Direction du patrimoine écologique et du développement durable, ministère de l'Environnement, Québec.  
<http://www.environnement.gouv.qc.ca/changements/classification/index.htm>
- Hey, D. L., & Philippi, N. S. (1995). Flood Reduction through Wetland Restoration: The Upper Mississippi River Basin as a Case History. *Restoration Ecology*, 3(1), 4–17. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.1995.tb00070.x>
- Hillman, G. R. (1998). Flood wave attenuation by a wetland following a beaver dam failure on a second order boreal stream. *Wetlands*, 18(1), 21–34.
- Holden, J., & Burt, T. P. (2003). Hydrological studies on blanket peat: The significance of the acrotelm-catotelm model. *Journal of Ecology*, 91(1), 86–102. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2745.2003.00748.x>
- Johnson, Rex. R. (1997). *The Vermillion River: Managing the Watershed to Reduce Flooding focused on wetland restoration and protection as a way of reducing the impacts of flooding in the Vermillion River basin*. Clay Conservation District.
- Loi concernant la conservation des milieux humides et hydriques, no. 132 (2017).  
<http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/milieux-humides/loi.htm>
- Lee, S., Yeo, I.-Y., Lang, M. W., McCarty, G. W., Sadeghi, A. M., Sharifi, A., Jin, H., & Liu, Y. (2019). Improving the catchment scale wetland modeling using remotely sensed data. *Environmental Modelling & Software*, 122, 104069. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.11.001>
- Lee, S., Yeo, I.-Y., Lang, M. W., Sadeghi, A. M., McCarty, G. W., Moglen, G. E., & Evenson, G. R. (2018). Assessing the cumulative impacts of geographically isolated wetlands on watershed hydrology using the SWAT model coupled with improved wetland modules. *Journal of Environmental Management*, 223, 37–48. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.006>
- Liu, Y., Yang, W., & Wang, X. (2008). Development of a SWAT extension module to simulate riparian wetland hydrologic processes at a watershed scale. *Hydrological Processes*, 22(16), 2901–2915. <https://doi.org/10.1002/hyp.6874>
- Malcolm, J. M. (1979). *The relationship of wetland drainage to flooding and water quality problems and its impacts on the J. Clark Salyer National Wildlife Refuge* (p. 83). U.S. Fish and Wildlife Service, J. Clark Salyer National Wildlife Refuge.
- Martinez-Martinez, E., Nejadhashemi, A. P., Woznicki, S. A., & Love, B. J. (2014). Modeling the hydrological significance of wetland restoration scenarios. *Journal of Environmental Management*, 133, 121–134. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.11.046>

- McCartney, M. P. (2000). The water budget of a headwater catchment containing a dambo. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 25(7), 611–616. [https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(00\)00073-3](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(00)00073-3)
- MELCC. (2019). *Milieux humides potentiels—Milieux humides potentiels 2019—Données Québec*. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/milieux-humides-potentiels/resource/2331ee09-4cad-4d0e-81c2-b8ccc70732c9>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2019). *Milieux humides potentiels—Milieux humides potentiels 2019—Données Québec* [Map]. Gouvernement du Québec. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/dataset/milieux-humides-potentiels/resource/976c1fc7-737b-486a-aa2b-f9da142eccc>
- Moriassi, 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*, 50(3), 885–900.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011a). *Soil and Water Assessment Tool, Theoretical Documentation version 2009* (No. 406; p. 647). Texas Water Resources Institute.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011b). *Soil and Water Assessment Tool, Theoretical Documentation Version 2009* (Technical Report No. 406; p. 647). Texas Water Resources Institute.
- Nkiaka, E., Nawaz, N. R., & Lovett, J. C. (2018). Effect of single and multi-site calibration techniques on hydrological model performance, parameter estimation and predictive uncertainty: A case study in the Logone catchment, Lake Chad basin. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 32(6), 1665–1682. <https://doi.org/10.1007/s00477-017-1466-0>
- Novitzki, R. P. (1978). Hydrologic characteristics of Wisconsin's wetlands and their influence on floods, stream flow, and sediment. *Wetland Functions and Values: The State of Our Understanding*.
- Pellerin, S., & Poulin, M. (2013). *Analyse de la situation des milieux humides au Québec et recommandations à des fins de conservation et de gestion durable* (p. 104) [Rapport Final]. Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs. <https://www.google.com/search?q=Analyse+de+la+situation+des+milieux+humides+au+Qu%C3%A9bec+et+recommandations+%C3%A0+des+fins+de+conservation+et+de+gestion+durable&oq=Analyse+de+la+situation+des+milieux+humides+au+Qu%C3%A9bec+et+recommandations+%C3%A0+des+fins+de+conservation+et+de+gestion+durable&aqs=chrome..69i57j69i59.942j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>
- Pomeroy, J. W., Shook, K., Fang, X., Dumanski, C., & Westbrook, T. B. (2014). *Improving and testing the prairie hydrological Model at Smith Creek* (No. 14; p. University of Saskatchewan). Centre for Hydrology. [https://scholar.google.com/scholar\\_lookup?title=Improving%20and%20testing%20the%20prairie%20hydrological%20model%20at%20Smith%20Creek%20Research%20Basin&author=J.W.%20Pomeroy&publication\\_year=2014](https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Improving%20and%20testing%20the%20prairie%20hydrological%20model%20at%20Smith%20Creek%20Research%20Basin&author=J.W.%20Pomeroy&publication_year=2014)

- Shook, K., Pomeroy, J. W., Spence, C., & Boychuk, L. (2013). Storage dynamics simulations in prairie wetland hydrology models: Evaluation and parameterization. *Hydrological Processes*, 27(13), 1875–1889. <https://doi.org/10.1002/hyp.9867>
- Simonovic, S. P., & Juliano, K. M. (2001). The Role of Wetlands during Low Frequency Flooding Events in the Red River Basin. *Canadian Water Resources Journal / Revue Canadienne Des Ressources Hydriques*, 26(3), 377–397. <https://doi.org/10.4296/cwrj2603377>
- US Corps of Engineers. (1972). *Charles River, Massachusetts. Water Resources Development Plan Charles River Watershed.*
- Walton, R., Chapman, R. S., & Davis, J. E. (1996). Development and application of the wetlands Dynamic Water Budget Model. *Wetlands*, 16(3), 347–357. <https://doi.org/10.1007/BF03161325>
- Yang, W., Wang, X., Liu, Y., Gabor, S., Boychuk, L., & Badiou, P. (2010). Simulated environmental effects of wetland restoration scenarios in a typical Canadian prairie watershed. *Wetlands Ecology and Management*, 18(3), 269–279. <https://doi.org/10.1007/s11273-009-9168-0>