



# Évolution du risque hydrologique lié aux événements pluvieux extrêmes: Application des données ClimEX (Québec-Bavière)

Rapport final  
Avril 2023

# Évolution du risque hydrologique lié aux événements pluvieux extrêmes: Application des données ClimEX (Québec-Bavière)

**Rapport final**  
**Mai 2023**

## **ÉQUIPE DE RÉALISATION :**

François Brissette, École de technologie supérieure

Richard Arsenault, École de technologie supérieure

Martin Leduc, Ouranos

Annie Poulin, École de technologie supérieure

**Titre du projet Ouranos:** Évolution du risque hydrologique lié aux événements pluvieux extrêmes: Application des données ClimEX (Québec-Bavière)

**Numéro du projet Ouranos:** Projet 400049 (PSR-SIIRI-992)

**Citation suggérée :** Brissette, F., Arsenault, R., Boucher, MA., Braun, Huard, D., Leduc, M., Poulin, A., Turcotte, R., Évolution du risque hydrologique lié aux événements pluvieux extrêmes: Application des données ClimEX (Québec-Bavière). Rapport présenté Ouranos. Montréal. École de technologie supérieure. 61p. + annexes

---

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres. Toute utilisation ultérieure du document sera au seul risque de l'utilisateur sans la responsabilité ou la poursuite juridique des auteurs.

# REMERCIEMENTS

---

Ce projet a été rendu possible grâce à la collaboration de longue date entre le Québec et la Bavière – Quebec-Bavaria International Collaboration on Climate Change (QBIC<sup>3</sup>).

En particulier, les auteurs remercient le Consortium Ouranos ainsi que Richard Turcotte (ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs - MELCCFP) pour leur indéfectible soutien.

Les auteurs remercient aussi le coordonnateur Ouranos du projet et participant de longue date au projet QBIC<sup>3</sup> Marco Braun, ainsi que les membres du Comité de suivi : Isabelle Chartier (Hydro-Québec), Anne Frigon (Ouranos), et Jean-François Cyr (remplacé par Richard Turcotte et Charles Malenfant).

Un grand merci à Ralf Ludwig (Ludwig-Maximilians-Universität München) et à son équipe, sans qui ce projet aurait été impossible.

Les travaux effectués dans le cadre de ce projet sont basés sur le grand ensemble ClimEX (Leduc et al., 2019). La production de ClimEX a été financée dans le cadre du projet ClimEX par le ministère bavarois de l'environnement et de la protection des consommateurs. Le MRCC5 a été développé par le centre ESCER de l'Université du Québec à Montréal (UQAM; [www.escer.uqam.ca](http://www.escer.uqam.ca)) en collaboration avec Environnement et Changement climatique Canada. Nous remercions le Centre canadien de modélisation et d'analyse du climat d'Environnement et Changement climatique Canada pour avoir exécuté et rendu disponibles les simulations du Large Ensemble CanESM2. utilisées dans cette étude, et le Réseau canadien d'évolution de la glace de mer et de la neige pour avoir proposé les simulations. Les calculs effectués avec le MRCC5 pour le projet ClimEX ont été effectués sur le supercalculateur SuperMUC du Leibniz Supercomputing Centre (LRZ) de l'Académie bavaroise des sciences et des sciences humaines. Le fonctionnement de ce supercalculateur est financé via le Centre de supercalcul Gauss (GCS), par le ministère fédéral allemand de l'Éducation et le ministère bavarois de l'éducation, des sciences et des arts.



# RÉSUMÉ

---

Le Québec est influencé par deux grands types d'inondations: les inondations liées à la fonte du couvert neigeux au printemps, et celles liées aux précipitations extrêmes d'été-automne. Il est attendu que les premières iront vraisemblablement en diminuant dans un climat modifié au sud du Québec alors que les secondes verront leur fréquence et leur magnitude amplifiées. Les crues d'été automnes sont dues exclusivement à des extrêmes de précipitation liquide. Ces crues peuvent atteindre leur paroxysme sur des petits et moyens bassins versants (<500km<sup>2</sup>) là où les tailles du bassin et du système météorologique sont comparables.

Pour bien modéliser les crues sur de tels bassins, un pas de temps de calcul sous-journalier est nécessaire. Ceci présente des défis particuliers en regard des données sous-journalières disponibles et de l'importance de bien quantifier les pointes des crues et les facteurs de réduction de pointe aux différentes échelles temporelles. La longueur limitée des séries d'observations présente un défi supplémentaire pour l'estimation des crues ayant une longue période de retour. Ce projet présente une approche couplant divers modèles hydrologiques utilisés à des pas de temps sous-journaliers et avec différentes résolutions spatiales dans le cas des modèles distribués. Ces modèles ont utilisé des données météorologiques observées ainsi que des données provenant du grand ensemble ClimEX pour l'étude des crues liées aux précipitations extrêmes pour les bassins du sud du Québec, en climats actuel et futur. Ce projet a permis la mise en place de trois modèles hydrologiques (GR4J, Wasim, Hydrotel) à différentes résolutions spatiales et temporelles dans le cadre d'expériences sur des bases de données variant entre 6 et 339 bassins versants. Les principales conclusions de ce projet sont :

- Les cycles journaliers de précipitation et de température simulés par ClimEX sont biaisés. Ces biais résultent d'une combinaison d'erreurs d'observation, de la variabilité interne des précipitations et d'une représentation inadéquate des processus physiques conduisant aux précipitations par le modèle climatique.
- Ces biais ont été corrigés avec succès en utilisant une méthode de cartographie multivariée par quantile (*quantile mapping*). L'impact de la correction (ou non) du cycle diurne des précipitations et de la température a été évalué sur de petits (<500 km<sup>2</sup>), moyens et grands (>1000 km<sup>2</sup>) bassins versants. Les résultats indiquent que la correction du cycle diurne permet une meilleure simulation du débit, en particulier pour les petits bassins versants, qui ont un temps de réponse infra-quotidien.
- Il est donc recommandé de corriger ces biais pour les projets utilisant des données climatiques sous-journalières.
- La sélection d'un sous-ensemble réduit de simulations climatiques a été étudiée dans le but de diminuer l'effort de calcul tout en essayant de préserver la distribution future des projections hydrologiques. Les résultats indiquent clairement qu'une sélection représentative est théoriquement possible, mais dépend de nombreux facteurs (e.g. coordonnées géographiques, métriques à l'étude) de telle sorte qu'il est extrêmement difficile à priori de choisir un sous-ensemble représentatif étant donné les relations complexes entre les espaces des variables climatiques et hydrologiques. La représentation adéquate de la distribution future des métriques hydrologiques passe donc toujours par l'utilisation du plus grand nombre possible de simulations climatiques.

Les travaux de modélisation hydrologique ont permis d'établir les points principaux suivants:

- Une augmentation des précipitations et débits extrêmes entre la période de référence et la période future est observée dans tous les bassins versants, pour toutes les durées et périodes de retour.
- L'augmentation des extrêmes (précipitation et débit) est la plus importante dans les petits bassins versants ainsi que pour les grandes périodes de retour. Les augmentations relatives sont plus importantes pour le débit que pour les précipitations.
- Dans l'ensemble, les résultats indiquent que les changements futurs prévus dans les précipitations extrêmes affecteront de manière disproportionnée les petits bassins versants, et en particulier les zones urbaines, où les critères de conception de la gestion des inondations sont basés sur des précipitations de courte durée et de grande période de retour.
- L'utilisation d'un pas de temps de simulation plus court a systématiquement amélioré la simulation des débits de pointe pour toutes les tailles de bassins versants, et réduit les biais de simulations.

Spécifiquement quant à la modélisation distribuée, les points suivants peuvent être notés :

- Il n'y a pas de lien systématique entre la taille du bassin versant et l'incertitude correspondant à la simulation du débit. Les bassins versants de petite taille sont très sensibles à la résolution spatiale du modèle ce qui réfute l'hypothèse selon laquelle le changement de résolution spatiale affecte principalement les grands bassins versants.
- La résolution temporelle ne joue qu'un rôle mineur dans la modélisation distribuée, comparativement à l'incertitude liée à la résolution spatiale qui est beaucoup plus grande.
- La structure du modèle est un facteur important de l'incertitude liée à la résolution spatiale des simulations.
- Le choix du pas de temps de simulation est un déterminant important de la variabilité des projections futures des inondations, et ce même pour les petits bassins versants.
- Pour les bassins versants plus grands, la résolution spatiale ET la résolution temporelle impactent la variabilité des projections des crues futures.

Finalement, ce qui a trait à l'impact de la variabilité naturelle sur la détection des tendances des données de débit, on peut noter les points suivants:

- La plupart des bassins versants verront une diminution des débits futurs pour la majorité des quantiles de la distribution future des débits. Des augmentations sont prévues seulement pour les quantiles les plus élevés.
- L'intensité des inondations et des sécheresses augmentera systématiquement jusqu'à la fin du siècle. La taille des bassins versants a un impact significatif sur les augmentations projetées des signaux d'inondation et de sécheresse, les petits bassins versants connaissant des augmentations d'inondation significativement plus importantes et une augmentation plus faible des sécheresses extrêmes.
- Les projections futures de toutes les variables hydrologiques, au moins jusqu'au milieu du siècle, sont significativement influencées par la variabilité naturelle du climat.
- Le temps d'émergence le plus rapide est observé pour les quantiles centraux (Q10 à Q70). Le moment d'émergence des quantiles supérieurs et inférieurs est plus tardif, vers le milieu du siècle actuel dans la plupart des cas, et même vers la fin du siècle et le début du siècle suivant pour les petits bassins versants.
- Le moment de l'émergence des inondations et des sécheresses extrêmes est fortement influencé par la taille du bassin versant. Le signal pour les inondations extrêmes apparaît plus tôt pour les grands bassins, alors que le contraire est observé pour les sécheresses extrêmes.

# TABLE DES MATIÈRES

---

<b>Remerciements</b> .....	<b>ii</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>iii</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>v</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>vi</b>
<b>1. Introduction</b> .....	<b>1</b>
1.1 Description sommaire du projet.....	1
<b>2. Objectifs du projet</b> .....	<b>2</b>
2.1 objectifs initiaux du projets .....	2
2.1.1 Modification aux objectifs initiaux .....	3
<b>3. Structure du rapport</b> .....	<b>3</b>
<b>4. Résultats et discussion</b> .....	<b>4</b>
4.1 Cycles journaliers du modèle ClimEX (Objectifs B1 et B5).....	4
4.1.1 Analyse des cycles journaliers simulés par l'ensemble ClimEX .....	4
4.1.2 Correction des biais des cycles journaliers de ClimEX.....	6
4.2 Sélection des simulations optimisant la représentation des incertitudes climatiques variant dans le temps et l'espace (Objectif B4) .....	13
4.3 Modélisation hydrologique sous-journalière (Objectifs A1 et B1).....	16
4.3.1 Modélisation hydrologique multi-échelles à l'aide de modèles distribués .....	16
4.3.1.1 Méthodologie générale .....	17
4.3.1.2 Article 1 – <i>Spatio-temporal Discretization Uncertainty of Distributed Hydrological Models</i> .....	19
4.3.1.3 Article 2 – <i>Uncertainty from Spatio-temporal Resolution, Hydrological Model and Watershed Size on the Simulation of Future Summer-fall Floods</i> .....	23
4.3.1.4 Article 3 – <i>Regionalization of a Distributed Hydrology Model Using Random Forest</i> .....	26
4.3.1.5 Discussion générale des résultats de la thèse de Siavash Pouryousefi Markhali .....	31
4.3.2 Détermination de la résolution temporelle optimale pour la modélisation hydrologique .....	32
4.3.2.1 Approche méthodologique .....	33

4.3.2.2	Résultats principaux.....	35
4.3.3	Amplification spatiale and temporelle des précipitations extrêmes dans un climat plus chaud .....	40
4.3.3.1	Méthodologie .....	41
4.3.3.2	Résultats principaux.....	42
4.4	Impact de la variabilité naturelle sur l'hydrologie et les événements extrêmes (Objectif B2 et B3) .....	46
<b>5.</b>	<b>Discussion et conclusion.....</b>	<b>52</b>
	<b>Références .....</b>	<b>55</b>
	<b>Annexes.....</b>	<b>56</b>

## LISTE DES FIGURES

---

**Figure 4.1.1** Valeurs maximales du taux de précipitation horaire en été sur la région du sud du Québec pour les 50 membres de l'ensemble ClimEX (rose), la simulation MRCC5 pilotée par la réanalyse ERA-I (vert), la réanalyse ERA5 (rouge) et les stations d'ECCC (bleu).

**Figure 4.1.2** Valeurs maximum et minimum obtenues pour le calcul du 99<sup>e</sup> quantile du taux de précipitation horaire en été en fonction de l'heure du jour et de la taille de l'ensemble utilisé dans le calcul du quantile. Pour chaque taille d'ensemble, 1 à 50 membres sont pigés au hasard par une approche de bootstrap avec remplacement sur 200 itérations.

**Figure 4.1.3** Répartition des bassins versants à travers l'Amérique du Nord-Est. Les symboles carrés, ronds et triangles correspondent respectivement aux petits, moyens et grands bassins versants.

**Figure 4.1.4** Cycle diurne annuel de la température avant correction du biais (première colonne : A1 à A4) et après correction du biais (deuxième colonne : B1 à B4) pour le bassin versant 02143040. Chaque ligne correspond à une saison différente : DJF (décembre, janvier, février), MAM (mars, avril, mai), JJA (juin, juillet, août), SON (septembre, octobre, novembre). Le côté droit montre les deux méthodes de correction du biais : la correction du biais standard (SBC) et la correction du biais diurne (DBC). Les observations (ERA5) sont indiquées en rouge. Les données ClimEX brutes (non corrigées) sont en gris, SBC en bleu et DBC en vert. L'enveloppe définie par les 50 membres ClimEX est affichée dans les couleurs claires correspondantes, tandis que les lignes de couleur foncée affichent la moyenne de l'ensemble. L'heure est locale avec 24h correspondant à minuit.

**Figure 4.1.5** Cycle diurne annuel des précipitations avant correction du biais (première colonne : A1 à A4) et après correction du biais (deuxième colonne : B1 à B4) pour le bassin versant 02143040. Chaque ligne correspond à une saison différente : DJF (décembre, janvier, février), MAM (mars, avril, mai), JJA (juin, juillet, août), SON (septembre, octobre, novembre). Le côté droit montre les deux méthodes de correction du biais : la correction du biais standard (SBC) et la correction du biais diurne (DBC). Les observations (ERA5) sont indiquées en rouge. Les

données ClimEX brutes (non corrigées) sont en gris, SBC en bleu et DBC en vert. L'enveloppe définie par les 50 membres ClimEX est affichée dans les couleurs claires correspondantes, tandis que les lignes de couleur foncée affichent la moyenne de l'ensemble. L'heure est locale avec 24h correspondant à minuit.

**Figure 4.1.6** Comparaison de l'erreur relative du débit moyen avec la correction du biais du cycle diurne (DBC) et la correction du biais standard (SBC) dans trois catégories de taille de bassin

**Figure 4.2.1** Précipitation moyenne annuelle (mm) sur les 100 bassins versants utilisés dans cette partie de l'étude. 43 bassins sont au Canada et 57 se trouvent dans le nord des États-Unis.

**Figure 4.2.2** Meilleur prédicteur climatique de l'indicateur hydrologique du débit moyen pour les 100 bassins versants et pour diverses périodes (Annuel et les mois de juin, septembre et octobre). Les résultats sont classés en fonction de la superficie des bassins versants.

**Figure 4.2.3** Méthodologie de la 2<sup>e</sup> partie de l'étude, permettant d'analyser la capacité de sélectionner des simulations climatiques représentant ultimement la distribution des indicateurs hydrologiques désirés.

**Figure 1.3.1** Bassins versants pris en compte dans les articles a) 1 et 2; b) 3 de la thèse de Siavash Pouryousefi Markhali. Dans le panneau a), les six bassins versants montrés ont été étudiés dans l'article 1 alors que les quatre bassins encadrés en bleu ont été étudiés dans l'article 2. De plus, le tableau du panneau a) montre les trois classes de superficies qui ont été prise en compte, soit : « petits bassins » (moins de 500 km<sup>2</sup>), « moyens bassins » (entre 500 et 1000 km<sup>2</sup>) et « grands bassins » (plus de 1000 km<sup>2</sup>). Le panneau b) comporte 171 bassins.

**Figure 1.3.2** Illustration de la méthodologie qui a été suivie dans le cadre des travaux de l'article 1 de Siavash Pouryousefi Markhali. Dans cette figure, l'acronyme CD (*catchment descriptors*) réfère à l'information physiographique. Tous les détails se trouvent dans la version complète de l'article référencé à l'Annexe A.

**Figure 1.3.3** Variance calculée par ensemble de 16 simulations pour différents quantiles de débits. Chaque ensemble est associé à un modèle hydrologique, un bassin et un pas de temps de simulation. Les bassins sont présentés par ordre de superficie, du plus petit au plus grand. La colonne de gauche présente les résultats pour le pas de temps de 24h et celle de droite les résultats pour le pas de temps de 3h. NOTE : Deux versions d'Hydrotel ont été utilisées dans cet article; les détails à ce sujet se trouvent dans le lien vers l'article 1 présenté à l'Annexe A.

**Figure 1.3.4** Effet de la résolution spatiale de l'information physiographique en fonction de celui de la résolution spatiale utilisée pour l'obtention des paramètres de calage sur les débits de périodes de retour 5, 10, 20 et 50 ans simulés par WaSiM. Les bassins sont placés par ordre de catégorie de superficie, soit « grands » (1<sup>re</sup> ligne), « moyens » (2<sup>e</sup> ligne), « petits » (3<sup>e</sup> ligne). Les résultats sont montrés chaque fois pour les pas de temps de simulation de 24h et de 3h. La loi log-Pearson type III a été utilisée pour l'analyse fréquentielle.



**Figure 1.3.5** Impact des changements de résolutions spatiale de l'information physiographique (ligne) et de résolution spatiale utilisée pour l'obtention des paramètres de calage (colonne) sur la simulation du niveau de la nappe phréatique sous la surface, bassins Aux Brochets, modèle hydrologique WaSiM.

**Figure 1.3.6** Chaîne de modélisation utilisée dans le cadre des travaux de l'article 2 de Siavash Pouryousefi Markhali. La méthode de post-traitement utilisée est MBCn, telle que décrite dans les travaux de Mina Faghih. La dernière étape de la chaîne montre que les résultats de simulations à l'aide des 50 membres de ClimEX, tant pour la période de référence (1991-2010) que pour la période future (2081-2100) ont été rassemblés de manière à créer des séries de 1000 années. Ainsi, l'analyse des débits extrêmes s'est appuyée sur les distributions empiriques. T = température, P = précipitation, Tc = température corrigée, Pc = précipitation corrigée.

**Figure 1.3.7** Direction et amplitude relative du changement sur les débits projetés (rouge : augmentation; bleu : diminution) pour la période 2081-2100. Les résultats sont montrés par quantile (axe des abscisses), par bassin et par résolution spatiale utilisée pour la modélisation hydrologique (axe des ordonnées). Les résultats pour le modèle WaSiM sont présentés sur la première ligne, pour les pas des temps de simulation de 24h et 3h. Les résultats pour le modèle Hydrotel sont présentés sur la 2<sup>e</sup> ligne pour les pas de temps de simulation de 24h et 3h.

**Figure 1.3.8** Résultats de l'analyse de décomposition de la variance réalisée sur les débits extrêmes d'été-automne (QT50, QT90, QT95, QT99), via l'utilisation d'une approche ANOVA-n. Les couleurs verte, jaune et rouge montrent les résultats des interactions de premier ordre entre les trois éléments étudiés, soient le modèle hydrologique, la résolution spatiale et la résolution temporelle.

**Figure 1.3.9** Description de la méthodologie suivie pour la réalisation des travaux de l'article 3 de la thèse de Siavash Pouryousefi Markhali. Des commentaires ont été ajoutés afin d'en décrire les principales étapes.

**Figure 1.3.10** a) Comparaison des performances, en matière de KGE, entre le calage (Cal) et la régionalisation (RF) des paramètres du modèle Hydrotel, pour les pas de temps de simulation de 3h et de 24h. b) Comparaison des distributions des valeurs de paramètres obtenues en calage et en régionalisation, pour les pas de temps de simulation de 3h et de 24h.

**Figure 1.3.11** Valeurs des paramètres L1 et MTN estimées à l'aide de RF, à l'échelle des UHRH (a, c) et des six sous-bassins (b, d) pour le bassin versant de la rivière Yamaska. Les panneaux se trouvant à droite complètement montrent l'occupation du sol sur le territoire du bassin ainsi que sa topographie.

**Figure 1.3.12** Performances obtenues en régionalisation, exprimées à l'aide du KGE, lorsque le degré de spatialisation de l'information physiographique des bassins augmente. LP = aucune spatialisation, mêmes valeurs de l'information physiographique pour tout le bassin; SDP = représentation par sous-bassins; FDP = représentation la plus fine, reposant sur les UHRH. La colonne de gauche montre les résultats pour le pas de temps de simulation de 24h et la colonne

de droite montre les résultats pour le pas de temps de simulation de 3h. Les valeurs de KGE sont des valeurs moyennes calculées sur l'ensemble des sous-bassins imbriqués, dans chacun des trois bassins versants étudiés.

**Figure 4.3.13** Carte des bassins versants sélectionnés

**Figure 4.3.14** Scores de calibration NSE pour tous les bassins versants en fonction de la résolution temporelle. Les six sous-figures correspondent aux 6 classes de taille décrites dans le tableau 1.

**Figure 4.3.15** Rapport d'amplitude des pointes de crues (simulés/observés) pour l'ensemble des bassins versants et des pas de temps de calcul. Chaque boxplot représente la distribution du ratio pour les 30 plus grandes pointes observés pour chacun des bassins versants dans chaque classe de taille.

**Figure 4.3.16** Médiane du rapport de magnitude de pic (ligne rouge horizontale de chaque boxplot de la figure 4.3.15).

**Figure 4.3.17** Différence horaire absolue entre l'heure d'occurrence du débit de pointe modélisé et l'heure d'occurrence observée pour tous les bassins versants et tous les pas de temps de calcul. Chaque boxplot représente la distribution de la différence de temps d'occurrence du pic de débit pour les 30 plus grands pics observés pour chacun des bassins versants dans chaque classe de taille.

**Figure 4.3.18** Médiane de la différence horaire absolue de temps (ligne rouge horizontale de chaque boxplot de la figure 4.3.17).

**Figure 4.3.19** Distribution du ratio de débit  $\left[\frac{(Q_{sim})}{(Q_{obs})} \times 100\right]$  de l'ensemble des 336 bassins versants pour chacun des 8 pas de temps de modélisation.

**Figure 4.3.20** Bassins versants retenus pour l'étude sur l'amplification des crues

**Figure 4.3.21** Augmentation des précipitations extrêmes (%) entre la période de référence (1980-2003) et la période future (2075-2099) en fonction de la durée des précipitations (6 sous-plots principaux) et de la période de retour (axe X). Les séries de trois boxplots représentent respectivement les classes de taille des petits (S), moyens (M) et grands (L) bassins versants.

**Figure 4.3.22** Côté droit : Période de retour future (axe X) des précipitations de la période de référence de 100 ans, en fonction de la classe de taille du bassin versant et de la durée des précipitations (axe Y). A gauche : Distribution géographique de la période de retour future pour 1, 24 et 72 heures.

**Figure 4.3.23** Augmentations extrêmes de débit (%) entre la période de référence (1980-2003) et la période future (2075-2099) en fonction de la durée du débit (6 sous-plots principaux) et de la période de retour du débit (axe X). Les séries de trois boxplots représentent respectivement les classes de taille des petits (S), moyens (M) et grands (L) bassins versants.

**Figure 4.3.24** Côté droit : Période de retour future (axe X) du débit de la période de référence de 100 ans, en fonction de la classe de taille du bassin versant et de la durée du débit (axe Y). Côté gauche : Distribution géographique de la période de retour future pour 1, 24 et 72 heures.

**Figure 4.4.1** Impact projeté du changement climatique anthropique pour différents quantiles de la distribution des débits (Q0.1, Q1, Q10, Q50, Q70, Q90, Q99 et Q99.9) Le changement est présenté comme la différence moyenne d'ensemble entre 9 périodes futures et la période de référence 1981-2010. Les trois colonnes correspondent à trois classes de taille de bassin versant : petit (à gauche), moyen (au milieu) et grand (à droite). Les bassins versants sont classés par leur latitude sur l'axe des ordonnées.

**Figure 4.4.2** Impact projeté du changement climatique anthropique pour les débits extrêmes élevés et faibles avec des périodes de retour de 2, 20, 100 et 300 ans. Le changement est présenté comme la différence moyenne d'ensemble entre 9 périodes futures et la période de référence 1981-2010. Les trois colonnes correspondent à trois classes de taille de bassin versant : petit (à gauche), moyen (au milieu) et grand (à droite). Les bassins versants sont classés par leur latitude sur l'axe des ordonnées.

**Figure 4.4.3** Diagrammes en boîte du temps d'émergence pour neuf quantiles de débit (Q 0,1, Q1, Q10, Q30, Q50, Q70, Q90, Q99 et Q99,9). Les trois rangées correspondent aux trois différentes approches utilisées pour estimer le temps d'émergence - test de KS, erreur standard de la moyenne (SME) (Leng et al.), rapport signal/bruit (SNR). Les plus petits bassins versants sont en rouge, les moyens en noir, et les plus grands en bleu. Chaque boxplot représente la distribution des quantiles TOE pour tous les bassins dans chaque classe de taille.

**Figure 4.4.4** Diagrammes en boîte du temps d'émergence pour les débits extrêmes élevés (trois rangées supérieures) et faibles (trois rangées inférieures) avec des périodes de retour comprises entre 2 et 300 ans. Pour les inondations et les sécheresses, les trois lignes correspondent aux trois différentes approches utilisées pour estimer le temps d'émergence - test KS, erreur standard de la moyenne (Leng et al.), rapport signal/bruit (SNR). Les plus petits bassins versants sont en rouge, les moyens en noir, et les plus grands en bleu. Chaque box plot représente la distribution du TOE des périodes de retour inondation/sécheresse pour tous les bassins versants dans chaque classe de taille.

# - INTRODUCTION

---

## DESCRIPTION SOMMAIRE DU PROJET

Le Québec et la Bavière sont influencés par deux grands types d'inondations: les inondations liées à la fonte du couvert neigeux au printemps, et celles liées aux précipitations extrêmes d'été-automne. Il est attendu que les premières iront vraisemblablement en diminuant dans un climat modifié alors que les secondes verront leur fréquence et leur magnitude amplifiées. Les crues d'été automnes sont dues exclusivement à des extrêmes de précipitation liquide. Ces crues peuvent atteindre leur paroxysme sur des petits et moyens bassins versants (<500km<sup>2</sup>) là où les tailles du bassin et du système météorologique sont comparables.

Pour bien modéliser les crues sur de tels bassins, un pas de temps de calcul sous-journalier est nécessaire. Ceci présente des défis particuliers en regard des données sous-journalières disponibles et de l'importance de bien quantifier les pointes des crues et les facteurs de réduction de pointe aux différentes échelles temporelles. La longueur limitée des séries d'observations présente un défi supplémentaire pour l'estimation des crues ayant une longue période de retour. En conséquence, ce rapport présente une approche couplant divers modèles hydrologiques utilisés à des pas de temps sous-journaliers. Ces modèles ont utilisé des données météorologiques observées ainsi que des données provenant du grand ensemble ClimEX pour l'étude des crues liées aux précipitations extrêmes pour les bassins du sud du Québec, en climats actuel et futur. Ce projet a permis de mieux comprendre la dynamique des crues extrêmes sur les petits bassins versants.

Ce projet a permis de continuer l'importante collaboration entre le Québec et la Bavière dans le cadre de la collaboration de recherche appliquée QBIC<sup>3</sup> (« Québec and Bavaria International Collaboration on Climate Change »). Cette collaboration existe depuis 2006 et a récemment culminé avec la production du grand ensemble ClimEX dont les hautes résolutions spatiale et temporelle ont rendu ce projet possible. Les principaux participants de QBic3 sont, pour la Bavière, l'Université Ludwig-Maximilians de Munich et l'Agence bavaroise de l'environnement (LFU) et, pour le Québec, le consortium Ouranos, le MDDELCC (CEHQ - DEH) appuyés selon les activités par des équipes universitaires québécoises dont le chef de file est l'ÉTS.

# - OBJECTIFS DU PROJET

---

L'objectif global du projet consiste à Quantifier l'évolution du risque hydrologique lié aux événements pluvieux extrêmes sur les bassins versants québécois et bavarois de petite et moyenne tailles (50 à 1000km<sup>2</sup>).

## OBJECTIFS INITIAUX DU PROJETS

La version originale du projet se déclinait en deux objectifs principaux (A et B) et sept objectifs spécifiques qui sont déclinés ici :

**OBJECTIF A :** Mettre en place une chaîne de modélisation hydrologique à l'échelle sous-journalière pour étudier les impacts du pas de temps de modélisation sur la reproduction des crues extrêmes d'été et d'automne

**A.1** Analyser et comparer la performance de modèles hydrologiques distribués et globaux sur des bassins de petite taille à des pas de temps sous-journaliers variables ;

**A.2** Établir des facteurs de réduction de pointe robustes applicables à différentes échelles temporelles en climats actuel et futur;

**OBJECTIF B :** Étudier l'impact de la variabilité naturelle et du changement climatique sur le risque hydrologique lié aux événements pluvieux extrêmes sur les bassins versants de petite taille en Bavière et au Québec

**B.1.** Valider les sorties à haute résolution spatiale et temporelle du grand ensemble ClimEX pour la modélisation hydrologique à un pas de temps sous-journalier;

**B.2.** Évaluer l'impact de la variabilité naturelle sur la détermination des crues de 20 et 100 ans sur ces bassins versants en climats actuel et futur;

**B.3.** Contraster l'incertitude liée à la variabilité naturelle avec celle liée à l'estimation statistique des périodes de retour;

**B.4.** Situer le grand ensemble ClimEX par rapport aux simulations climatiques existantes (e.g. CMIP5, CORDEX) et développer une méthode de sélection des simulations optimisant la représentation des incertitudes climatiques variant dans le temps et l'espace

**B.5.** Analyser, valider, sélectionner/développer une méthode de correction de biais à des pas de temps sous-journaliers qui soit robuste pour les extrêmes de précipitation.

## Modification aux objectifs initiaux

Comme c'est souvent le cas pour ce genre de projet, avec les inévitables délais entre la préparation des demandes de subvention et le début officiel des activités de recherche, certains des objectifs spécifiques ont été modifiés de concert avec l'ensemble des participants au projet. En conséquence, les objectifs spécifiques A.2. et B.4. ont été retirés du projet, non pas par manque de pertinence, mais simplement parce qu'ils ont entretemps été étudiés au sein d'autres projets de recherche menés au sein de la Direction de l'expertise hydrique et atmosphérique (Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs), qui est elle-même partenaire de ce projet.

## - STRUCTURE DU RAPPORT

---

La méthodologie de même que les résultats sont découpés sur la base des projets menés par les divers étudiants ayant participé au projet. Ces projets sont les suivants :

1. *Analyse des cycles journaliers du modèle ClimEX* : Ces travaux ont été menés par l'étudiante Anne-Marie Bégin (M.Sc.) sous la supervision de Martin Leduc et Annie Poulin. Ces travaux correspondent à l'objectif B1.
2. *Correction des biais des cycles journaliers de ClimEX* : Ces travaux ont été menés par l'étudiante Mina Faghih (Ph.D.) sous la supervision de François Brissette. Ces travaux correspondent à l'objectif B5.
3. *Sélection des simulations optimisant la représentation des incertitudes climatiques variant dans le temps et l'espace* : Ces travaux ont été menés par l'étudiante Magali Vandal (M.Sc.A.), sous la supervision de Richard Arsenault et David Huard. Ces travaux correspondent à l'objectif B4.
4. *Modélisation hydrologique sous-journalière* : Ces travaux ont été menés par Siavash Pouryousefi Markhali (Ph.D) sous la direction de Annie Poulin et Marie-Amélie Poulin, ainsi que par Parham Sabeti (M.Sc.A) et Mina Faghih (Ph.D), tous deux supervisés par François Brissette. Ces travaux couvrent les objectifs A1 et B1.
5. *Impact de la variabilité naturelle sur l'hydrologie et les événements extrêmes* : Ces travaux ont été menés par l'étudiante Mina Faghih (Ph.D.) sous la supervision de François Brissette et couvrent les objectifs B2 et B3.

La structure du Chapitre 4 suit les projets énoncés ici-haut.

# - RÉSULTATS ET DISCUSSION

---

Les résultats sont découpés sur la base des travaux de étudiants gradués ayant travaillé sur le projet.

## **CYCLES JOURNALIERS DU MODÈLE CLIMEX (OBJECTIFS B1 ET B5)**

### **Analyse des cycles journaliers simulés par l'ensemble ClimEX**

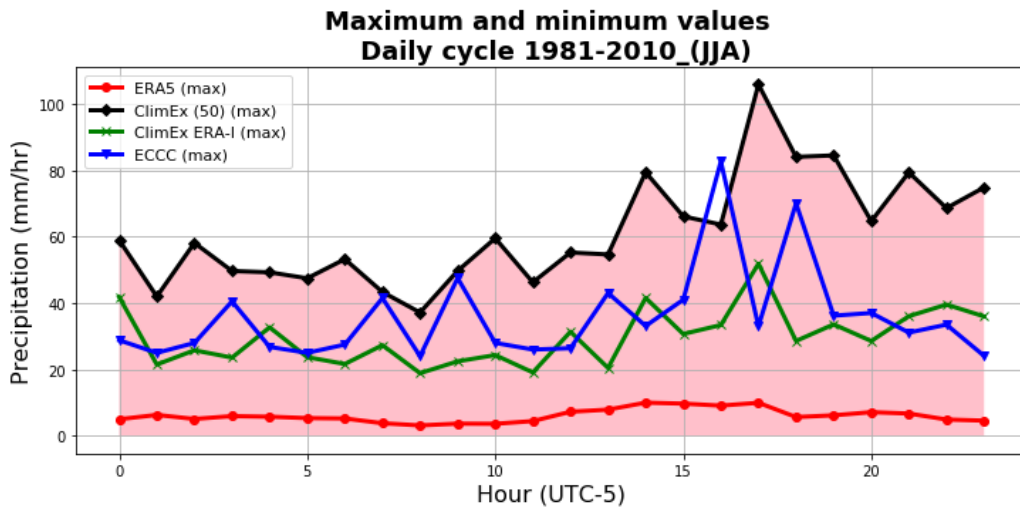
Le sous-objectif B.1 a été abordé dans le cadre du projet de maîtrise d'Anne-Marie Bégin au Centre ESCER du département des sciences de la Terre et de l'atmosphère de l'Université du Québec à Montréal. Ce projet a été co-supervisé par Martin Leduc (UQAM/Ouranos) et Annie Poulin (ÉTS). L'Annexe A fournit une liste de liens vers les travaux plus détaillés décrits dans cette section.

Les simulations du grand ensemble ClimEX ont été évaluées à l'échelle sous-journalière sur le domaine du Québec. Les variables étudiées sont la précipitation horaire et la température aux 3h pour les saisons d'été et automne. Le cycle journalier a été calculé pour différentes statistiques, soit le cycle moyen, les 95, 97 et 99e quantiles, les valeurs minimales et maximales. Les principales caractéristiques des cycles (phase et amplitude) ont été comparées avec deux jeux de données de références, soit des données provenant de stations d'Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) et de la réanalyse ERA5. L'étude s'est concentrée sur une douzaine de stations distribuées dans la vallée du Saint-Laurent et au nord du 50e parallèle. Les simulations de l'ensemble ClimEX et de la réanalyse ERA5 ont été comparées au point de grille le plus proche de chaque station.

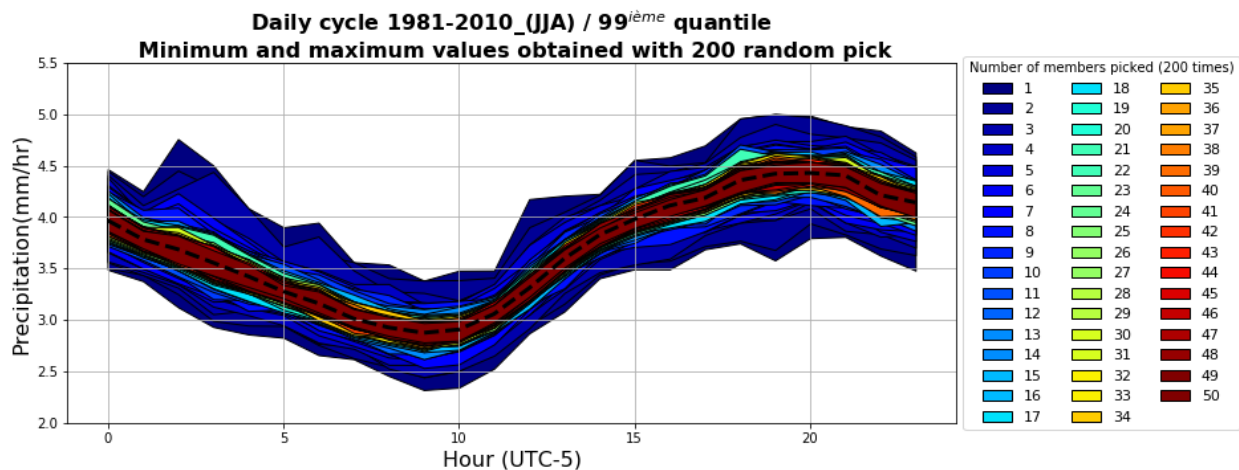
Pour le cycle journalier moyen des précipitations, les résultats montrent que ses caractéristiques principales sont difficilement reproduites par l'ensemble ClimEX, notamment au niveau de l'heure du maximum quotidien souvent décalée. Pour la température, les résultats sont beaucoup mieux reproduits autant pour la forme et la phase du cycle que de son amplitude. Il est à noter toutefois la présence de biais chauds et froids (tout dépendant de la région) s'appliquant aux cycles de la température. L'étude des valeurs maximum de précipitation et de température a montré que ces derniers sont surestimés par l'ensemble ClimEX, tandis qu'ils étaient sous-estimés par la réanalyse ERA5. Les cycles maximums obtenus pour les observations et la simulations MRCC5 pilotée par une réanalyse étaient généralement entre ceux de ClimEX et de la réanalyse ERA5. Une grande partie de l'incertitude reliée à l'évaluation des cycles journaliers des précipitations était due à des incertitudes soit dans les observations provenant de stations (où un contrôle de qualité a été nécessaire), soit dans la performance limitée d'ERA5 à simuler les maximums de manière réaliste. Ce projet démontre l'importance d'utiliser plusieurs jeux de données de références pour évaluer les cycles associés aux précipitations horaires.

Un second volet à l'étude était d'évaluer la taille de l'ensemble requis afin d'évaluer convenablement les différentes caractéristiques du cycle journalier. Ce volet aura permis, entre autres, d'évaluer indirectement l'incertitude statistique pouvant affecter une série d'observations

qui correspond à une seule réalisation du système climatique. Il a été démontré que plus d'une quinzaine de membres sont souvent nécessaires pour évaluer le cycle associé à la précipitation avec une erreur d'échantillonnage inférieure à 5%, tandis que 1 à 8 membres sont généralement suffisant pour estimer le cycle de la température avec une erreur inférieure à 0.5°.



**Figure 4.1.1** Valeurs maximales du taux de précipitation horaire en été sur l'ensemble des points de la région du sud du Québec pour les 50 membres de l'ensemble ClimEX (rose), la simulation MRCC5 pilotée par la réanalyse ERA-I (vert), la réanalyse ERA5 (rouge) et les stations d'ECCC (bleu).



**Figure 4.1.2** Valeurs maximum et minimum obtenues pour le calcul du 99<sup>e</sup> quantile du taux de précipitation horaire en été en fonction de l'heure du jour et de la taille de l'ensemble utilisé dans le calcul du quantile. Pour chaque taille d'ensemble, 1 à 50 membres sont pigés au hasard par une approche de bootstrap avec remplacement sur 200 itérations.



## Correction des biais des cycles journaliers de ClimEX

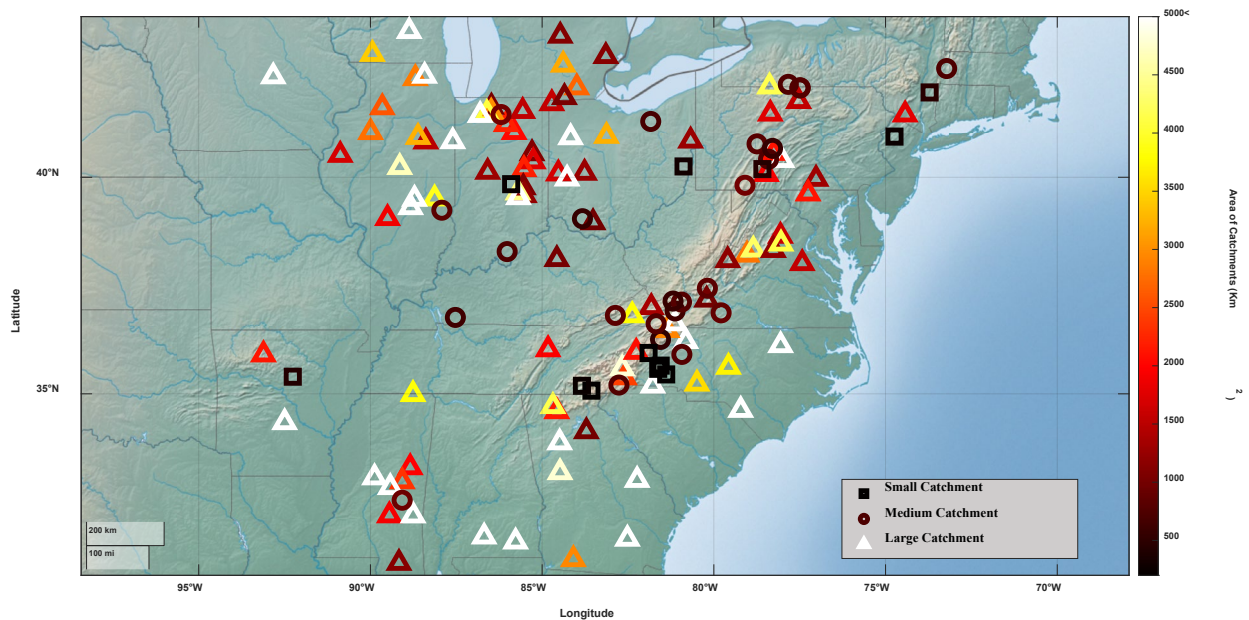
Cette section présente une partie des travaux de la Thèse de doctorat de Mina Faghih. L'Annexe A fournit une liste de liens vers les travaux plus détaillés décrits dans cette section. L'analyse précédente ayant démontré des biais clairs dans les cycles journaliers de ClimEX pour les précipitations et les températures, il est de mise de se poser la question si ces billets devraient être corrigés. Toutes les sorties de modèles climatiques mondiaux et régionaux sont biaisées dans une certaine mesure lorsqu'elles sont comparées aux observations sur un horizon de référence commun. Ces biais ont une structure spatiale et temporelle complexe (Chen et al., 2013b ; Maraun, 2016 ; Ashfaq et al., 2010 ; Wang et al., 2014). Par conséquent, une étape de correction des biais est considérée comme un prérequis pour la plupart des études d'évaluation de l'impact du changement climatique. Il existe un large éventail de techniques de correction des biais, allant de simples méthodes de mise à l'échelle à des approches plus avancées de cartographie de distribution multivariée préservant les tendances. Il existe une importante littérature sur les méthodes de correction des biais et plusieurs études comparatives ont été publiées (Fang et al., 2015 ; Lafon et al., 2013 ; Chen et al., 2013b ; Maraun, 2016 ; Ajaaj et al., 2016 ; Bárdossy et Pegram, 2011). Cependant, cela n'est plus vrai depuis que les sorties des modèles climatiques sont de plus en plus disponibles à des pas de temps infra-journaliers. Un nombre très limité d'études s'est penché sur la correction du biais des sorties infraquotidiennes des modèles climatiques, mais l'accent a été mis sur la correction des valeurs maximales annuelles infraquotidiennes (par exemple, Li et al., 2017 ; Requena et al., 2021). Les valeurs maximales annuelles sont importantes car elles sont utilisées pour déterminer la période de retour des événements extrêmes pour la conception technique. Par exemple, Li et al. (2017) ont montré que la correction du biais des précipitations maximales annuelles horaires était recommandée. Il est bien connu que les biais des modèles climatiques ne sont pas constants dans le temps, et par conséquent, différents facteurs de correction sont généralement calculés pour chaque mois, ou en utilisant une fenêtre mobile sur une année civile. Il est également connu que les modèles climatiques à haute résolution sont également biaisés dans la reproduction du cycle diurne de nombreuses variables (Scaff et al., 2019 ; Bannister et al., 2019). Alors que les modèles climatiques poursuivent lentement leur marche vers une résolution d'archivage infraquotidienne, de leurs données des questions de recherche intéressantes doivent être abordées. Devrions-nous corriger les cycles diurnes des sorties des modèles climatiques ? Si oui, comment ? Disposons-nous d'ensembles de données de référence fiables à l'échelle infraquotidienne ? Cela influencera-t-il même les résultats des études d'impact ?

Pour répondre à ces questions, cette partie du projet examine l'impact de la correction des biais du cycle diurne sur l'hydrologie de plusieurs bassins versants nord-américains. Il examine également comment l'échelle spatiale influence la réponse dynamique des bassins versants aux précipitations extrêmes. En général, les petits bassins versants sont plus sensibles aux tempêtes intenses de courte durée, alors que les débits des bassins versants plus importants sont quelque peu lissés par le processus de routage de la propagation des ondes de crue. Par conséquent, en principe, une représentation précise du cycle diurne devrait être plus critique pour les petits bassins versants. Pour approfondir cette question, une large gamme de tailles de bassins versants a été sélectionnée tel que montré à la Figure 4.1.3.

Ces résultats ont été publiés dans la revue HESS et une copie de l'article se retrouve à l'Appendice E. Les références citées dans cette section s'y retrouvent.

Cette étude a été menée sur l'est des États-Unis dans une région rectangulaire située dans le domaine de calcul ClimEX. 133 bassins versants MOPEX ont été sélectionnés sur la base du critère de disposer de données hydrométriques et météorologiques observées avec moins de 5%

de données manquantes sur une période de référence commune de 24 ans. Ces bassins versants sont dispersés dans 4 zones climatiques de la classification climatique de Köppen. L'impact de la taille du bassin versant est examiné dans cette étude en classant les bassins versants en trois groupes : moins de 500 km<sup>2</sup>, entre 500 et 1000 km<sup>2</sup> et plus de 1000 km<sup>2</sup>. Les bassins versants de moins de 500 km<sup>2</sup> devraient avoir une réponse temporelle hydrologique infra-quotidienne claire par rapport aux bassins versants plus grands. La figure 4.1.3 présente l'emplacement du centroïde et la taille relative de chaque bassin versant.



**Figure 4.1.3** Répartition des bassins versants à travers l'Amérique du Nord-Est. Les symboles carrés, ronds et triangles correspondent respectivement aux petits, moyens et grands bassins versants.

Tous les membres du grand ensemble ClimEX ont été regroupés pour calculer les facteurs de correction des biais pour les précipitations et les températures. Les facteurs de correction ont ensuite été appliqués à tous les membres de l'ensemble ClimEX. Comme l'ont expliqué Ayar et al. (2021) et Chen et al. (2019), cette méthode préserve la variabilité interne de l'ensemble. Cet article n'est pas directement concerné par l'étude de la variabilité interne, mais l'utilisation d'un grand ensemble permet le calcul empirique précis d'événements extrêmes avec de très grandes périodes de retour (Martel et al., 2020). Les biais des modèles climatiques n'étant pas constants sur le cycle annuel, différents facteurs de correction ont été calculés pour chaque mois de l'année. Dans le respect de l'objectif principal de la présente étude, la méthode de correction des biais MBCn (Canon, 2018) a été appliquée de deux manières différentes :

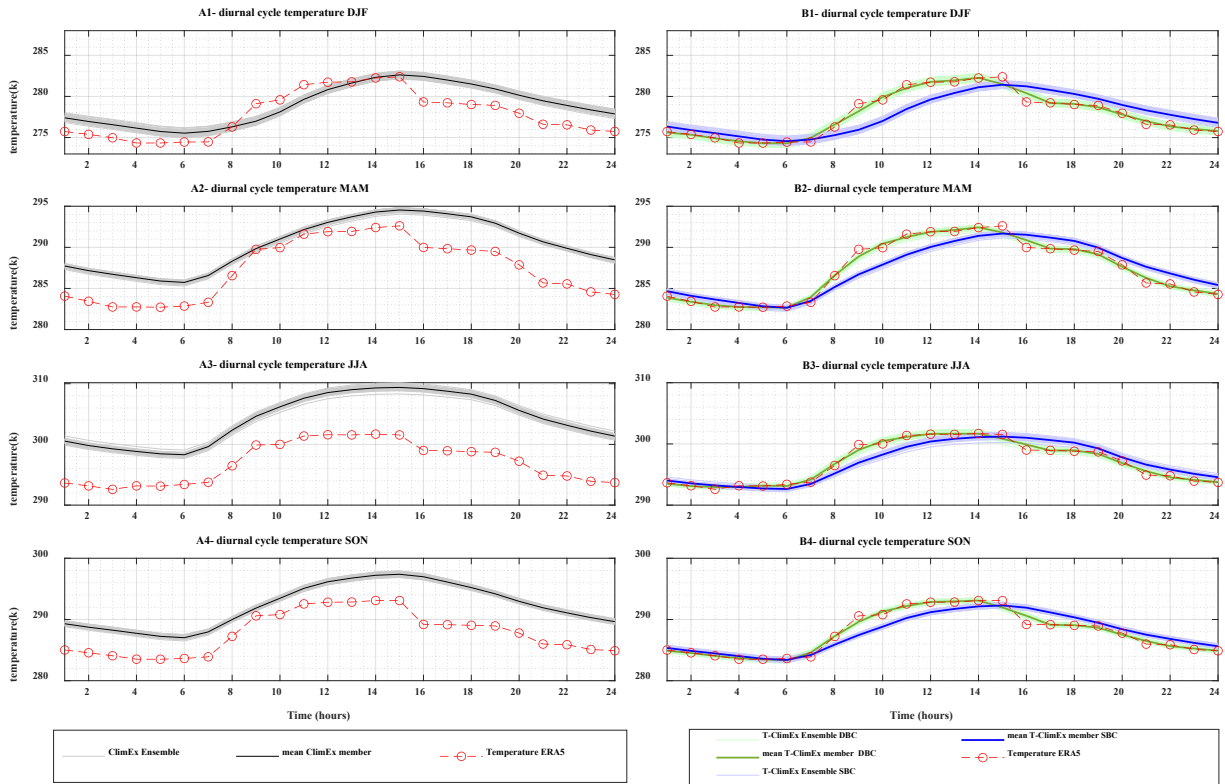
1. Correction du biais standard (SBC) : Pour chaque mois civil, un seul ensemble de facteurs de correction quantile a été appliqué à toutes les données horaires. Cette approche suppose que tous les biais du modèle climatique sont constants sur l'ensemble du cycle diurne. Dans cette variante, pour chaque mois, il y a un seul

ensemble de facteurs de correction de quantile et toutes les valeurs horaires sont corrigées en utilisant cet ensemble.

2. Correction du biais diurne (DBC) : Cette variante reconnaît spécifiquement que les biais des modèles climatiques ne sont pas constants tout au long du cycle diurne (par exemple, les biais de la lumière du jour peuvent différer des biais de la nuit). Les corrections de biais ont donc été calculées pour chaque heure, en utilisant une fenêtre mobile de 3 heures pour regrouper toutes les valeurs horaires d'un mois donné avant d'utiliser l'algorithme MBCn. Cette opération a été effectuée pour lisser le cycle diurne des observations, et donc éliminer une partie du bruit d'échantillonnage dans les données observées. Dans cette variante, pour chaque mois, il y a 24 ensembles de facteurs de correction quantile (un pour chaque heure).

La figure 4.1.4 présente les cycles diurnes de température observés et simulés par ClimEX d'un bassin versant sélectionné pour les quatre saisons (côté gauche), ainsi que les résultats des deux approches de correction des biais (côté droit). Les 50 membres de l'ensemble ClimEX sont présentés sous forme d'enveloppe ombrée, la moyenne de l'ensemble étant représentée par une ligne continue. Dans ce document, le temps se réfère à l'heure locale du bassin versant. Le côté gauche montre que ClimEX simule un bon cycle diurne de température, qui est assez proche de ceux observés et pour toutes les saisons. Sur ce bassin versant, ClimEX présente un biais chaud, surtout au printemps, en été et en automne. Le biais chaud a tendance à être plus important pendant la nuit. Tous les membres de l'ensemble ClimEX sont très proches les uns des autres, avec une différence d'environ 1 degré seulement entre les membres les plus froids et les plus chauds. Le cycle diurne de la température est à peine affecté par la variabilité climatique interne.

La partie droite de la figure (B1 à B4)) présente les performances de la correction de biais multivariée (MBC) de Cannon (2018) avec la correction de biais du cycle diurne (DBC en vert) et la correction de biais standard (SBC en bleu). La mise en commun de tous les membres de ClimEX pour dériver un ensemble unique de facteurs de correction de biais préserve la signature de la variabilité interne, comme le montre la largeur des enveloppes bleue et verte par rapport à celles de l'enveloppe grise des valeurs ClimEX non corrigées (A1 à A4). Avec la correction de biais standard (SBC), toutes les valeurs horaires sont corrigées en utilisant des facteurs de correction communs pour chaque mois. La correction de biais se réduit alors à une simple mise à l'échelle verticale, qui ramène le biais quotidien moyen à zéro. Cependant, des biais horaires subsistent : ces biais sont négatifs de 06h00 à 14h00, et positifs de 14h00 à minuit. Pour les courbes vertes, l'utilisation d'une fenêtre mobile de 3 heures donne un cycle diurne plus lisse que celui observé. Ce choix méthodologique a été fait afin de filtrer la variabilité des observations, résultant probablement d'erreurs d'échantillonnage. Sans la fenêtre de lissage, le cycle diurne corrigé du biais aurait correspondu exactement à celui des observations.

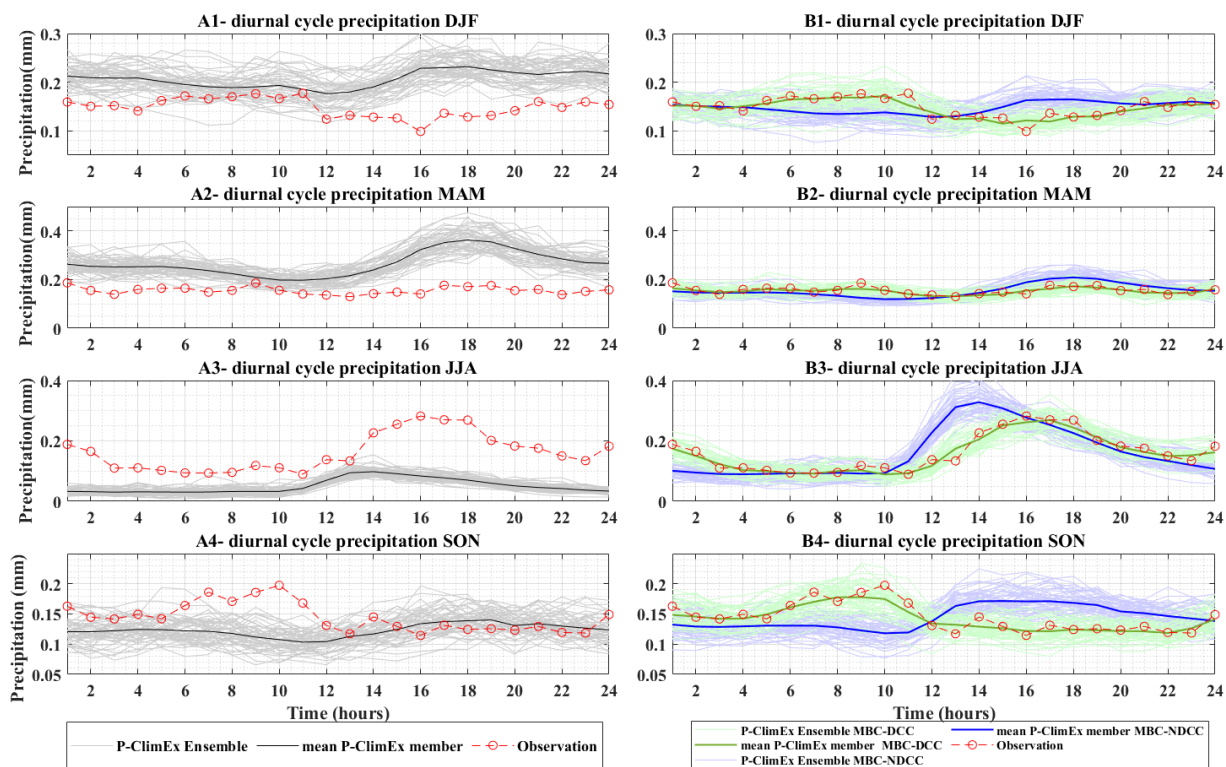


**Figure 4.1.4** Cycle diurne annuel de la température avant correction du biais (première colonne : A1 à A4) et après correction du biais (deuxième colonne : B1 à B4) pour le bassin versant 02143040. Chaque ligne correspond à une saison différente : DJF (décembre, janvier, février) , MAM (mars, avril, mai), JJA (juin, juillet, août), SON (septembre, octobre, novembre). Le côté droit montre les deux méthodes de correction du biais : la correction du biais standard (SBC) et la correction du biais diurne (DBC). Les observations (ERA5) sont indiquées en rouge. Les données ClimEX brutes (non corrigées) sont en gris, SBC en bleu et DBC en vert. L'enveloppe définie par les 50 membres ClimEX est affichée dans les couleurs claires correspondantes, tandis que les lignes de couleur foncée affichent la moyenne de l'ensemble. L'heure est locale avec 24h correspondant à minuit.

La figure 4.1.5 présente les cycles diurnes des précipitations observées et simulées par ClimEX pour le même bassin versant. La disposition de la figure 4.1.5 est la même que pour la température (figure 4.1.4). Par rapport à la température, la variabilité interne simulée des précipitations est beaucoup plus importante, comme le montre la largeur de l'enveloppe grise sur le côté gauche. La variabilité interne est la plus importante en hiver et en automne, et la plus faible en été. Les différences de précipitations entre les membres peuvent atteindre jusqu'à 100 %, selon la saison et l'heure, ce qui souligne le rôle clé de la variabilité interne dans la variabilité des précipitations. Sur ce bassin versant, les précipitations ClimEX sont positivement biaisées en hiver et au printemps et négativement biaisées en été. Globalement, il existe de grandes différences entre les précipitations observées et simulées, et ces différences s'étendent au cycle diurne. L'été est la seule saison où les observations et ClimEX ont un cycle diurne similaire malgré un décalage de 3-4 heures entre les pics des deux cycles. ClimEX présente un fort cycle diurne au printemps, qui est cependant absent des observations. L'hiver et l'automne ne présentent pas de cycles diurnes clairs, tant dans les observations que dans ClimEX. Les grandes différences entre les observations et les sorties de ClimEX témoignent de la nécessité de corriger les biais

avant d'utiliser les sorties des modèles climatiques dans les modèles hydrologiques (ou d'autres modèles d'impact).

Tout comme dans la figure 4.1.4, la partie droite de la figure 4.1.5 présente les performances de la correction de biais multivariée (MBC) avec la correction de biais du cycle diurne (DBC en vert) et la correction de biais standard (SBC en bleu). Comme précédemment, la SBC (en bleu) met simplement à l'échelle les précipitations pour corriger les biais quotidiens moyens, sans impact sur la forme du cycle modélisé. DBC (en vert), par contre, corrige les distributions horaires de telle sorte que le cycle diurne corrigé des biais de ClimEX corresponde à celui observé. Comme la correction des précipitations est multiplicative, l'enveloppe de variabilité interne semble être plus petite en hiver et au printemps car ClimEX est positivement biaisé pour ces saisons. L'inverse est observé pour la saison estivale, où ClimEX est biaisé négativement. La variabilité interne relative (autour de la moyenne d'ensemble) reste la même avant et après correction.

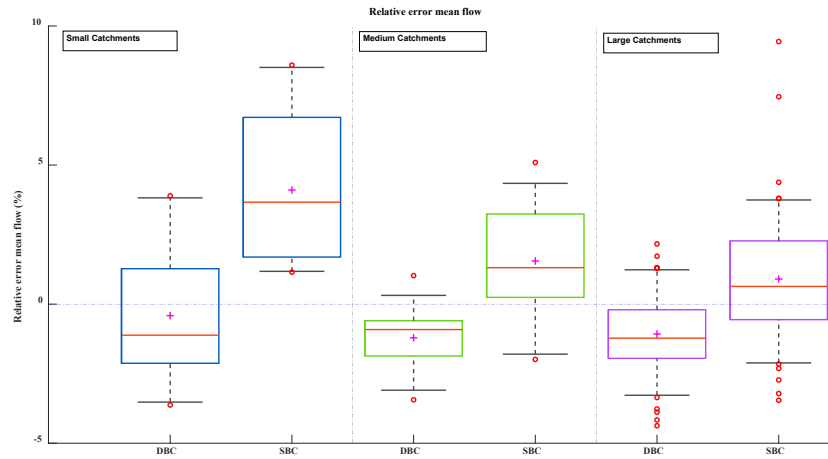


**Figure 4.1.5** Cycle diurne annuel des précipitations avant correction du biais (première colonne : A1 à A4) et après correction du biais (deuxième colonne : B1 à B4) pour le bassin versant 02143040. Chaque ligne correspond à une saison différente : DJF (décembre, janvier, février), MAM (mars, avril, mai), JJA (juin, juillet, août), SON (septembre, octobre, novembre). Le côté droit montre les deux méthodes de correction du biais : la correction de biais standard (SBC) et la correction de biais diurne (DBC). Les observations (ERA5) sont indiquées en rouge. Les données ClimEX brutes (non corrigées) sont en gris, SBC en bleu et DBC en vert. L'enveloppe définie par les 50 membres ClimEX est affichée dans les couleurs claires correspondantes, tandis que les lignes de couleur foncée affichent la moyenne de l'ensemble. L'heure est locale avec 24h correspondant à minuit.

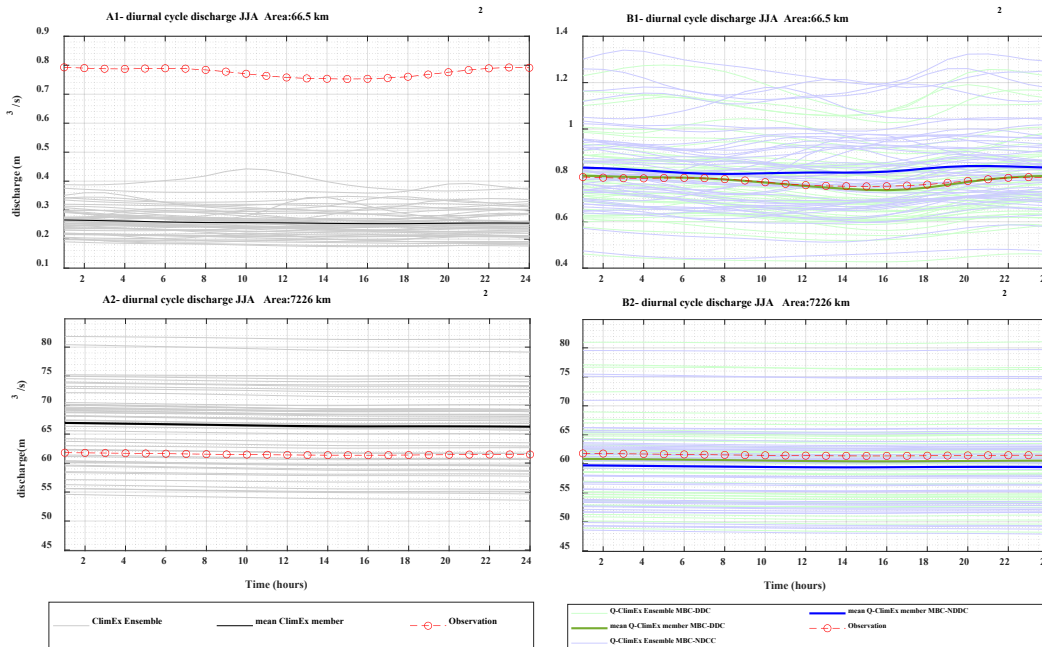
Dans l'ensemble, les deux méthodes de correction du biais font efficacement ce pour quoi elles ont été conçues. La transformation des enveloppes grises en enveloppes vertes souligne la force de ces approches de cartographie de distribution. Le fait qu'elles puissent transformer des distributions gravement biaisées en distributions complètement différentes soulève également d'importantes questions quant à leur utilisation.

La figure 4.1.6 montre des boxplots du biais relatif du débit annuel moyen, avec et sans (DBC et SBC) correction du cycle diurne moyen, pour les trois catégories de taille de bassin versant. Les résultats ne sont pas présentés pour les simulations de débit sans correction du biais, car les erreurs sont jusqu'à deux ordres de grandeur plus grandes que pour les simulations corrigées du biais. Chaque boxplot représente la distribution du biais relatif moyen du débit pour les 133 bassins versants. La boîte centrale affiche les quantiles 25, 50 (médiane) et 75 de la distribution, tandis que les moustaches inférieures et supérieures montrent les quantiles 5 et 95. Les valeurs inférieures et supérieures aux 5<sup>ème</sup> et 95<sup>ème</sup> quantiles sont représentées par des cercles rouges et les moyennes des distributions sont représentées par des croix violettes. Dans l'ensemble, les biais relatifs sont relativement faibles, ce qui indique que la méthode de correction des biais permet de préserver les principales caractéristiques des précipitations et des températures observées, du moins en termes de modélisation hydrologique. Les résultats montrent que la prise en compte des biais des cycles diurnes a un impact important sur la représentation du débit annuel moyen. La correction du cycle diurne réduit le biais relatif et diminue la dispersion des estimations du biais. Les biais relatifs sont principalement positifs avec la correction du biais standard, et tendent à être légèrement négatifs avec la correction du biais diurne. L'impact est particulièrement clair pour les petits et moyens bassins versants. Pour les grands bassins versants, la valeur absolue du biais médian reste similaire (passe de positif à négatif), mais l'écart est plus faible lors de la correction du cycle diurne. Ceci est particulièrement clair pour la boîte centrale (25<sup>ème</sup> à 75<sup>ème</sup> quantiles). Comme le montre la figure 4.1.4, le cycle diurne des températures du modèle climatique est plus plat que celui des observations. La correction du cycle diurne entraîne une température quotidienne moyenne plus élevée, ce qui entraîne une augmentation de l'évapotranspiration et une diminution des valeurs de débit, expliquant probablement les résultats observés. Les résultats pour d'autres métriques sont présentés dans l'article de recherche complet (Appendice E).

Les résultats de la modélisation hydrologique indiquent une augmentation relativement modeste mais constante de la performance de la modélisation hydrologique pour tous les paramètres (à l'exception des faibles débits) lorsque le cycle diurne des précipitations et de la température est corrigé. L'augmentation des performances était clairement plus importante pour les petits bassins versants, mais des améliorations ont également été constatées pour les classes de taille moyenne et grande. Les raisons de cette amélioration ne sont pas faciles à cerner. La correction du cycle diurne de la température assure une représentation plus réaliste du cycle quotidien de l'évapotranspiration, ce qui peut expliquer la meilleure représentation du débit annuel moyen. Nous pouvons obtenir quelques informations en examinant le cycle diurne du débit pour l'été (JJA) pour un petit et un grand bassin versant, comme le montre la Figure 4.1.7. Les petits bassins versants sont connus pour avoir un tel cycle, où l'augmentation de l'évapotranspiration dans l'après-midi (résultant du fort cycle diurne de température) conduit à une réduction correspondante du débit. On peut voir que le cycle du débit est très bien modélisé pour le petit bassin versant lorsque le cycle diurne des deux variables est corrigé. Pour le bassin versant de grande taille, le cycle diurne du débit est plat pour le débit observé et simulé.



**Figure 4.1.6** Comparaison de l'erreur relative du débit moyen avec la correction du biais du cycle diurne (DBC) et la correction du biais standard (SBC) dans trois catégories de taille de bassin

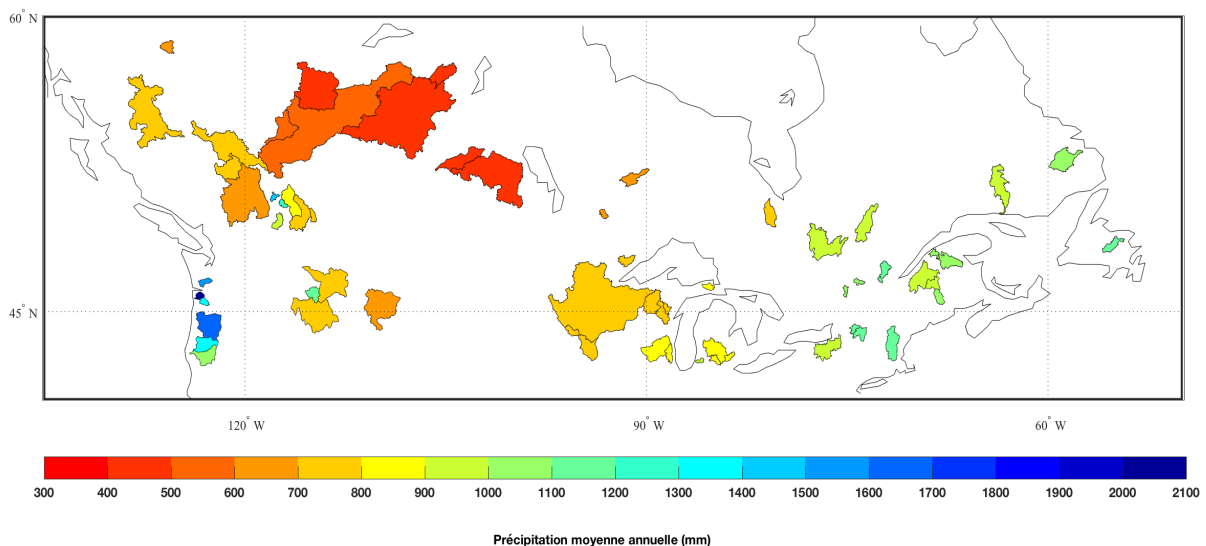


**Figure 4.1.7** Cycle diurne annuel de débit à JJA (juin, juillet, août) avant correction du biais (première colonne : A1 et A2) et après correction du biais (deuxième colonne : B1 et B2) pour deux bassins versants sélectionnés. La première rangée est pour le bassin versant 02143040 (classification de petite taille) et la deuxième rangée est pour le bassin versant 02156500 (classification de grande taille). Les observations sont indiquées en rouge. Les simulations d'écoulement utilisant des éléments ClimEX non corrigés sont affichées en gris clair et la moyenne d'ensemble est en noir. Les simulations utilisant des données corrigées du biais sont en bleu clair (SBC) et vert clair (DBC) avec les couleurs sombres correspondantes montrant la moyenne de l'ensemble. L'heure est locale avec 24h correspondant à minuit.

## SÉLECTION DES SIMULATIONS OPTIMISANT LA REPRÉSENTATION DES INCERTITUDES CLIMATIQUES VARIANT DANS LE TEMPS ET L'ESPACE (OBJECTIF B4)

Cette section présente les travaux du mémoire de maîtrise de Magali Vandal. L'Annexe A fournit une liste de liens vers les travaux plus détaillés décrits dans cette section. Cet objectif visait à développer une méthodologie permettant de sélectionner des membres de simulations climatiques qui représentent la distribution de l'ensemble en termes d'incertitude dans le temps et dans l'espace. L'idée derrière cette partie de l'étude a été de se baser sur une analyse des relations entre les caractéristiques des membres disponibles et des indicateurs hydrologiques d'intérêt. Cela aurait eu pour résultat d'obtenir des règles à appliquer afin de sélectionner des membres uniquement par rapport à leurs caractéristiques climatiques sans devoir effectuer des simulations hydrologiques pour en estimer la distribution des indicateurs hydrologiques.

Pour y arriver, une série de 100 bassins versants Canadiens et du nord des États-Unis a été utilisée, tel que démontré à la figure 4.2.1, qui montre du même coup la précipitation annuelle moyenne des bassins versants. Il est possible de constater que la sélection couvre un large éventail de conditions hydroclimatologiques.



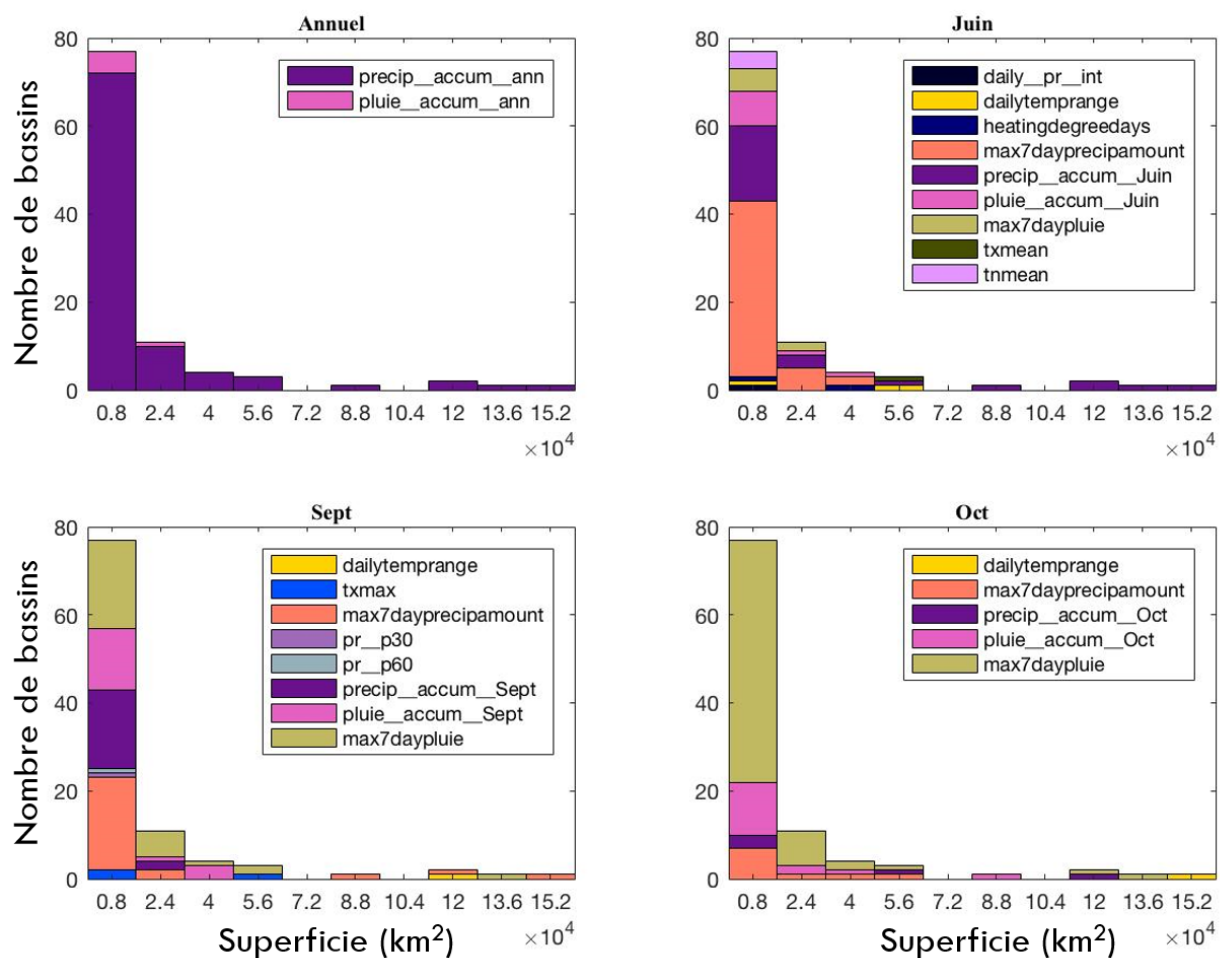
**Figure 4.2.1** Précipitation moyenne annuelle (mm) sur les 100 bassins versants utilisés dans cette partie de l'étude. 43 bassins sont au Canada et 57 se trouvent dans le nord des États-Unis.

Pour cette étude, plusieurs simulations climatiques ont été analysées : 41 GCM de CMIP6, 16 RCM de CORDEX-NA et 50 membres de l'ensemble ClimEX ont contribué à l'ensemble disponible pour l'étude. Les données ont toutes été analysées sur la période de référence de 1971-2000. L'analyse est basée sur un pas de temps journalier. Les données sous-journalières ont donc été agrégées au pas de temps journalier et moyennées sur la superficie de chaque bassin versant. Elles ont toutes également été post-traitées par la suite avec l'algorithme de post-traitement DBC, puis ont servi d'entrée à 3 modèles hydrologiques globaux (GR4J, HMETS et MOHYSE), qui ont été préalablement calibrés sur chacun des 100 bassins versants. Puis, 79



indicateurs climatiques ont été calculés avec l'outil « xclim » et 34 indicateurs hydrologiques ont été calculés sur les débits simulés résultants de la modélisation hydrologique (alimentée par les projections climatiques corrigées). Les séries ont finalement été traitées sur diverses périodes pour tenter d'identifier des corrélations conditionnelles (soit les indicateurs à l'échelle annuelle, saisonnière ou mensuelle). Finalement, des essais ont été effectués pour établir des corrélations entre les indicateurs climatiques et les indicateurs hydrologiques pour tenter d'établir des relations permettant d'estimer la distribution des indicateurs hydrologiques à partir des indicateurs climatiques, plus simples à estimer.

Plusieurs résultats intéressants ont été démontrés dans cette étude. Premièrement, les meilleurs prédicteurs de certains indicateurs hydrologiques ont été surprenants dans plusieurs cas, tel que démontré à la figure 4.2.2, qui présente le meilleur prédicteur climatologique du débit moyen pour chacun des bassins versants de l'étude (la somme des barres est de 100). De plus, les résultats sont présentés en fonction de la taille du bassin versant:



**Figure 4.2.2** Meilleur prédicteur climatique de l'indicateur hydrologique du débit moyen pour les 100 bassins versants et pour diverses périodes (Annuel et les mois de juin, septembre et octobre). Les résultats sont classés en fonction de la superficie des bassins versants.

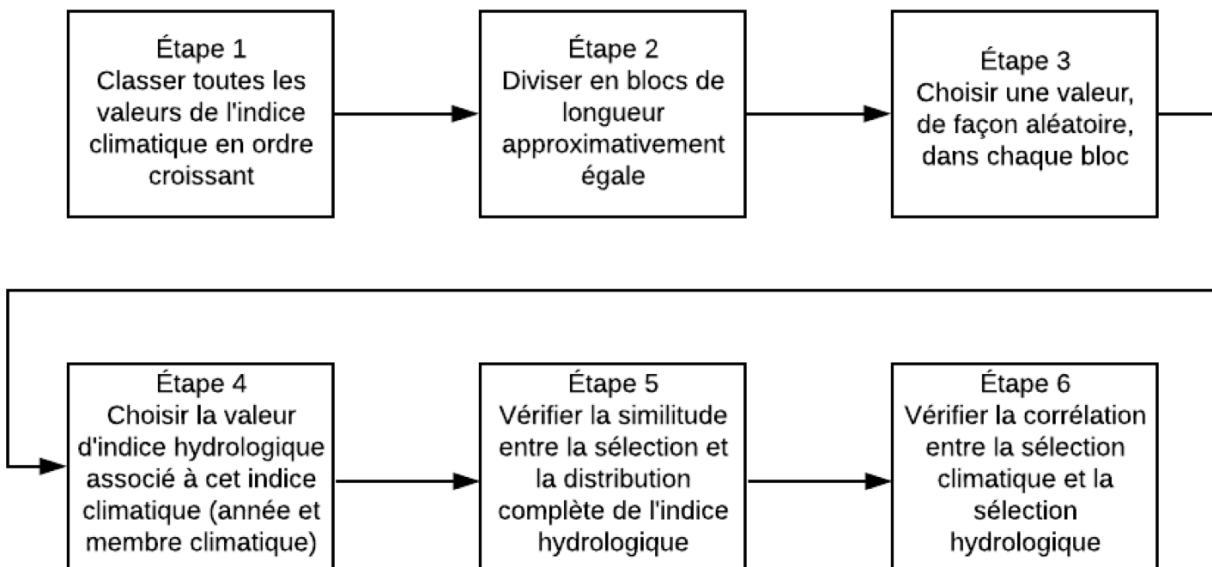
Il est possible de constater que certains résultats sont plus surprenants que d'autres. Par exemple, à l'échelle annuelle, l'indicateur dominant est la précipitation annuelle, ce qui est raisonnable. Par contre, pour Juin et Septembre, plusieurs bassins versants ont l'indicateur de « précipitation maximale sur 7 jours » comme meilleur prédicteur, alors que l'indicateur

hydrologique est le débit moyen et (et non maximal). D'autres tels cas peuvent être remarqués à la figure 4.2.2 ainsi que dans le mémoire de Magali Vandal (voir lien à l'Annexe A).

Malheureusement, ces résultats varient grandement d'un bassin versant à l'autre en fonction du modèle hydrologique utilisé. Ceci signifie que les hydrogrammes simulés comportent suffisamment de variance entre les modèles et que les meilleurs indicateurs climatiques varient en fonction du modèle hydrologique et de l'indicateur hydrologique désiré.

La deuxième étape de l'étude a été d'essayer de prévoir la distribution des indicateurs hydrologiques en se basant sur l'indicateur climatique modal, c'est-à-dire celui qui était présent le plus souvent dans l'analyse précédente. Ceci a été effectué car en mode prédictif, il ne serait pas possible de connaître à priori le meilleur indicateur climatique, alors le choix le plus robuste est de sélectionner celui qui est le plus représenté dans l'analyse. De plus, l'indicateur modal pourrait être le 2<sup>e</sup> meilleur pour plusieurs bassins, ce qui contient tout de même beaucoup de valeur.

La mise en œuvre de cette deuxième partie a utilisé le schéma de la figure 4.2.3 :



**Figure 4.2.3** Méthodologie de la 2<sup>e</sup> partie de l'étude, permettant d'analyser la capacité de sélectionner des simulations climatiques représentant ultimement la distribution des indicateurs hydrologiques désirés.

En résumé, pour un indicateur hydrologique souhaité, les résultats de la phase 1 permettent de trouver l'indicateur climatique le plus approprié. Toutes les simulations climatiques sont ensuite classées en ordre croissant de cet indicateur climatique. La distribution est échantillonnée de manière semi-aléatoire, où une valeur aléatoire est sélectionnée dans un sous-ensemble systématique de la distribution complète. Puis, la distribution des indicateurs hydrologiques associés à ces simulations climatiques est évaluée. La distribution ainsi échantillonnée peut finalement être comparée à la distribution de la population des indicateurs hydrologiques pour évaluer la qualité de l'échantillonnage.

Les résultats détaillés de cette analyse sont présentés dans le mémoire de Magali Vandal (lien à l'Annexe A), mais les conclusions principales sont les suivants :

- 1- Le choix du modèle hydrologique influence la qualité des distributions obtenues;
- 2- Le choix de l'indicateur modal performe légèrement mieux que l'échantillonnage aléatoire dans la distribution des modèles climatiques pour la plupart des indicateurs et pour la plupart des périodes;
- 3- Les membres à sélectionner sont très dépendants de l'indicateur hydrologique à représenter.

Ceci signifie que si le débit moyen annuel est d'intérêt, les modèles climatiques à sélectionner sont très différents de si la cible était le débit moyen d'automne, ou celui de juin, etc. Ceci est également valide pour les autres indicateurs, par exemple le débit moyen demande une sélection de membres très différente de ce qui serait requis pour bien modéliser le débit de pointe.

Ultimement, cette étude aura permis de mieux comprendre la complexité de la variabilité des simulations climatiques, des modèles hydrologiques et des indicateurs climatiques et hydrologiques. La recommandation est donc d'utiliser l'ensemble des simulations lorsque possible car il s'agit de la méthode la plus robuste de couvrir la plage d'incertitude et de variabilité, et ce peu importe l'indicateur hydrologique à représenter.

## **MODÉLISATION HYDROLOGIQUE SOUS-JOURNALIÈRE (OBJECTIFS A1 ET B1)**

### **Modélisation hydrologique multi-échelles à l'aide de modèles distribués**

Dans cette section sont présentés les travaux de la thèse de doctorat de Siavash Pouryousefi Markhali. L'Annexe A fournit une liste de liens vers les travaux plus détaillés décrits dans cette section. Cette dernière s'intéresse plus particulièrement à la modélisation hydrologique distribuée et à son utilisation pour la modélisation à une échelle temporelle sous-journalière, tant en climat historique qu'en climat futur. Dans ce contexte, il convient d'étudier les effets des changements d'échelles spatiale et temporelle sur les résultats de modélisation, et d'explorer la transférabilité des valeurs des paramètres des modèles hydrologiques depuis des échelles plus grossières vers des échelles plus fines.

Ainsi, l'objectif principal des travaux qui ont été menés est le suivant :

« Évaluer l'impact des résolutions spatiale et temporelle des modèles hydrologiques distribués (et à bases physiques) sur la simulation des débits, en particulier des crues d'été-automne ».

À partir de cet objectif général, trois principaux thèmes ont été explorés à travers trois articles, soit :

1. [ARTICLE 1] : Pour différentes superficies de bassins versants, l'étude de l'effet de (1) la résolution temporelle de la simulation, (2) la résolution spatiale des paramètres et des descripteurs des bassins, (3) la structure du modèle hydrologique. *Markhali, S. P., Poulin, A., & Boucher, M. A. (2022). Spatio-temporal discretization uncertainty of distributed hydrological models. Hydrological Processes, 36(6), e14635.*
2. [ARTICLE 2] : L'étude du rôle de la résolution spatio-temporelle des simulations, du choix du modèle hydrologique et de la taille du bassin versant dans la détermination de l'évolution des débits extrêmes d'été-automne sous l'effet du changement climatique (soumis en janvier 2023 à *Water Resources Research*).
3. [ARTICLE 3] : L'utilisation de forêts aléatoires pour la régionalisation des paramètres des modèles hydrologiques distribués, et leur transfert d'échelles plus grossières vers des échelles plus fines (soumis en décembre 2022 à *Journal of Hydrological Sciences*).

Les textes complets des articles 2 et 3 se trouvent aux liens présentés à l'Annexe A. Les sections qui suivent présentent (1) la méthodologie générale ; (2) un aperçu général des travaux qui ont été réalisés, par article, en mettant l'accent sur les principales conclusions.

### Méthodologie générale

Tous les travaux ont été réalisés en utilisant les modèles Hydrotel et WaSiM. Ils sont tous les deux distribués et à bases plus physiques que les autres modèles (globaux et conceptuels) utilisés dans le cadre du projet qui est présenté dans ce rapport. Le Tableau 4.1 donne un aperçu des principales caractéristiques des deux modèles qui sont d'intérêt dans le cadre des travaux de la thèse de Siavash.

**Tableau 4.1** : Description et caractéristiques des modèles hydrologiques Hydrotel et WaSiM tels qu'utilisés dans le cadre de la thèse de doctorat de Siavash Pouryousefi Markhali.

Modèle	Représentation spatialisée	Résolutions spatiales testées (m) *	Résolutions temporelles testées (h)	Sous-modèles utilisés
Hydrotel	Sous-bassins versants élémentaires	100, 250, 500, 1000	3, 24	Interpolation des données météo. : polygones de Thiessen  Accumulation et fonte de neige : approche mixte bilan d'énergie/degrés jours  ETP : Hydro-Québec  Modèle de sol : BV3C  ETR : suivant BV3C  Écoulement réseau hydrographique : onde cinématique
WaSiM	Grille (pixels)	100, 250, 500, 1000	3, 24	Interpolation des données météo. : polygones de Thiessen

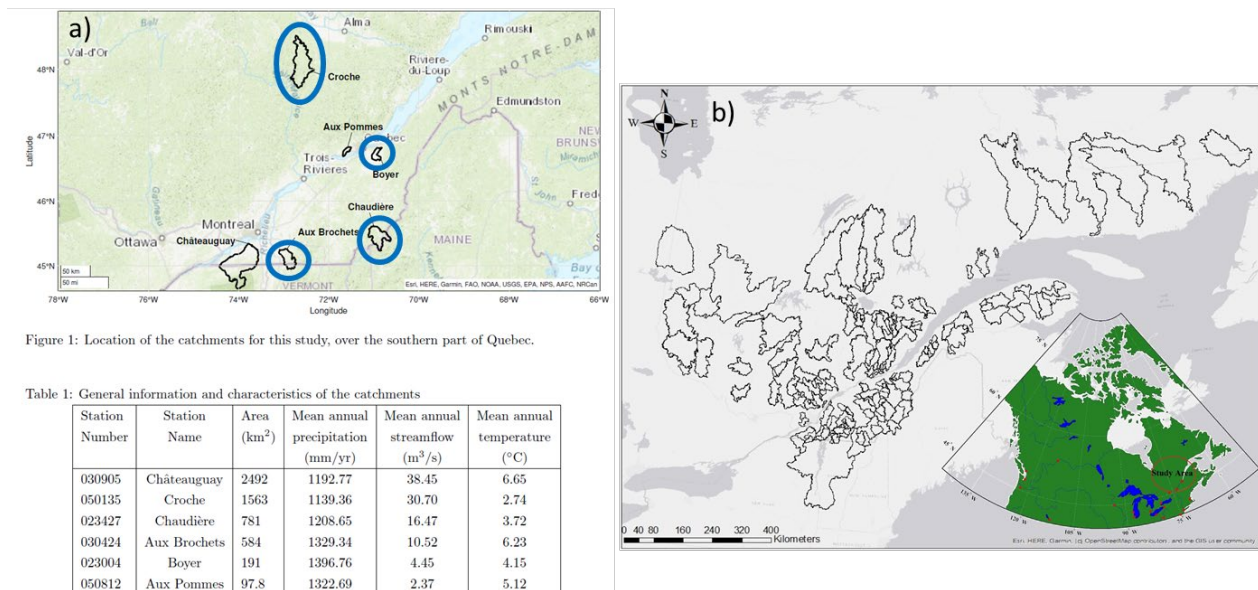
				Accumulation et fonte de neige : degrés jours  ETP : Hammon  Modèle de sol : équation de Richards  ETR : suivant l'équation de Richards  Écoulement réseau hydrographique : onde cinématique
--	--	--	--	---

\* Il s'agit des résolutions de l'information physiographique fournie aux modèles hydrologiques (modèle numérique d'élévation – MNE, occupation du sol, types de sols). Dans le cas d'Hydrotel, les pixels sont agrégés afin de former les sous-bassins versants élémentaires ou unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH). ETP = évapotranspiration potentielle. ETR = évapotranspiration réelle.

La Figure 4.3.1 montre les bassins versants qui ont été étudiés, par article.

Les données hydroclimatiques qui ont été utilisées sont les suivantes :

- Calage et validation des modèles hydrologiques, post-traitement des sorties de modèles climatiques : précipitations et températures d'ERA5, débits de la plateforme du MELCCFP ;
- Sorties de modèles climatiques : précipitations et températures de l'ensemble ClimEX.



**Figure 4.3.13** Bassins versants pris en compte dans les articles a) 1 et 2; b) 3 de la thèse de Siavash Pouryousefi Markhali. Dans le panneau a), les six bassins versants montrés ont été étudiés dans l'article 1 alors que les quatre bassins encerclés en bleu ont été étudiés dans l'article

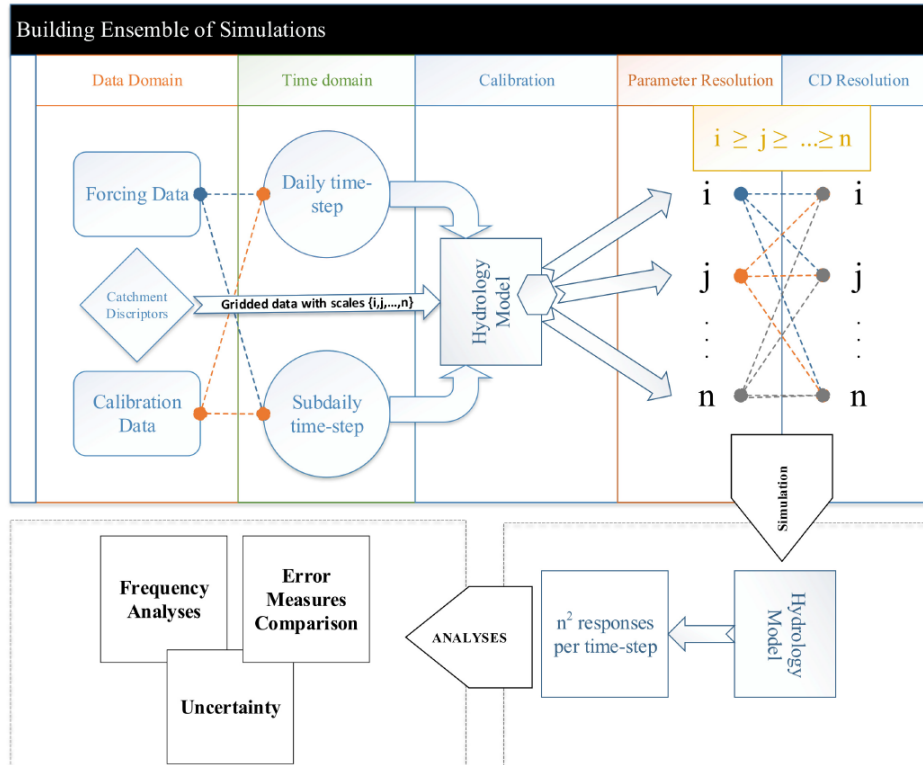
2. De plus, le tableau du panneau a) montre les trois classes de superficies qui ont été prise en compte, soit : « petits bassins » (moins de 500 km<sup>2</sup>), « moyens bassins » (entre 500 et 1000 km<sup>2</sup>) et « grands bassins » (plus de 1000 km<sup>2</sup>). Le panneau b) comporte 171 bassins.

### *Article 1 – Spatio-temporal Discretization Uncertainty of Distributed Hydrological Models*

Dans cet article, les quatre hypothèses suivantes ont été examinées :

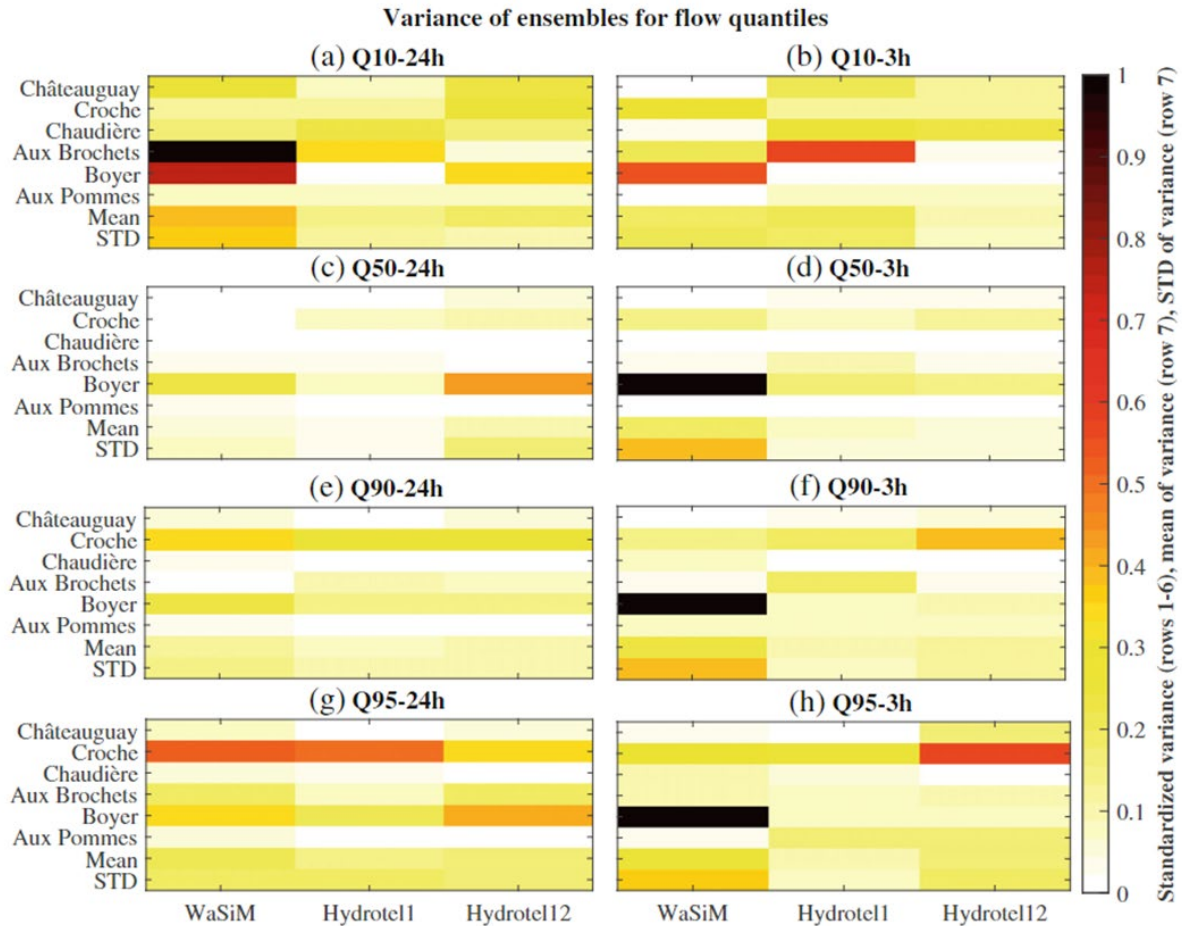
- Les bassins versants plus grands sont susceptibles de présenter des incertitudes plus importantes dans la simulation du débit, lorsque l'on fait varier la résolution spatiale de leurs caractéristiques physiographiques. (H1)
- Des pas de temps plus fins introduisent un plus haut degré de variabilité dans la simulation, ce qui conduit à une plus grande incertitude dans la simulation du débit. (H2)
- Plus un modèle est finement distribué et physiquement réaliste, plus il est sensible aux changements de résolution spatiale. (H3)
- L'incertitude liée aux paramètres du modèle est plus grande que celle des données physiographiques (résolution MNE, occupation du sol, type de sol). (H4)

Afin de vérifier (ou non) ces hypothèses, un ensemble de 16 simulations, par modèle hydrologique et par bassin, ont été réalisées et ce tant pour le pas de temps de 24h que pour le pas de temps de 3h. Les ensembles de 16 simulations ont été obtenus à partir de toutes les combinaisons possibles entre les quatre résolutions spatiales montrées au Tableau 4.1 pour l'information géographique fournie aux modèles et les quatre mêmes résolutions spatiales suivant lesquelles les paramètres des modèles ont été calibrés. Un total de 192 simulations hydrologiques (16 x 2 x 6) a donc été réalisé pour chacun des deux modèles. La méthodologie suivie pour cet article est montrée à la Figure 4.3.2.



**Figure 4.3.14** Illustration de la méthodologie qui a été suivie dans le cadre des travaux de l'article 1 de Siavash Pouryousefi Markhali. Dans cette figure, l'acronyme CD (*catchment descriptors*) réfère à l'information physiographique. Tous les détails se trouvent dans la version complète de l'article référencé à l'Annexe A.

Les Figure 4.3.3, Figure 4.3.4 et Figure 4.3.5 illustrent les principales conclusions obtenues en lien avec les quatre hypothèses qui ont été posées au départ. La Figure 4.3.3 montre, pour différents quantiles de débit, qu'il n'existe pas de lien entre la superficie des bassins versants et l'impact du changement de résolution spatiale, et ce tant pour le pas de temps de simulation de 24h que pour celui de 3h. Cette absence de patron dans les variances des quantiles de débit en fonction de la superficie des bassins ne permet donc pas de vérifier l'hypothèse H1. La même figure montre par ailleurs que la variance tend à augmenter, en général, entre le pas de temps de 24h et celui de 3h lorsque le modèle WaSiM est utilisé (voir entre autres les valeurs de variance moyenne et de variance de la variance). L'application du test statistique de Student et du test des rangs signés de Wilcoxon montre toutefois que la différence sur les variances, entre les pas des temps de 24h et de 3h, n'est pas statistiquement significative. À la lumière de ces résultats, l'hypothèse H2 n'est que partiellement vérifiée. Enfin, WaSiM tend à montrer une plus grande variance qu'Hydrotel, ce qui supporte la vérification de l'hypothèse H3.

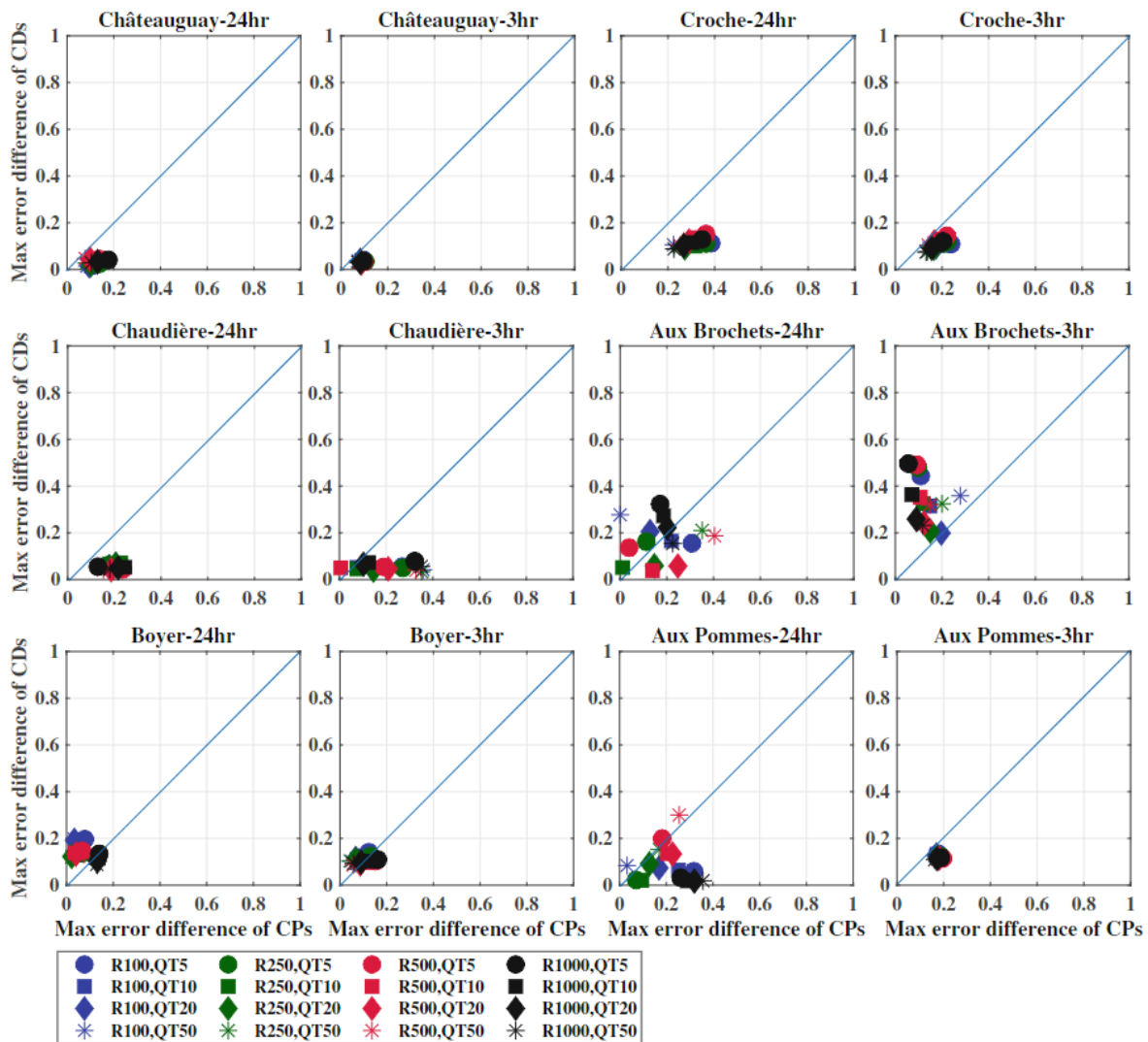


**Figure 4.3.15** Variance calculée par ensemble de 16 simulations pour différents quantiles de débits. Chaque ensemble est associé à un modèle hydrologique, un bassin et un pas de temps de simulation. Les bassins sont présentés par ordre de superficie, du plus petit au plus grand. La colonne de gauche présente les résultats pour le pas de temps de 24h et celle de droite les résultats pour le pas de temps de 3h. NOTE : Deux versions d’Hydrotel ont été utilisées dans cet article; les détails à ce sujet se trouvent dans l’article 1 référencé à l’Annexe A.

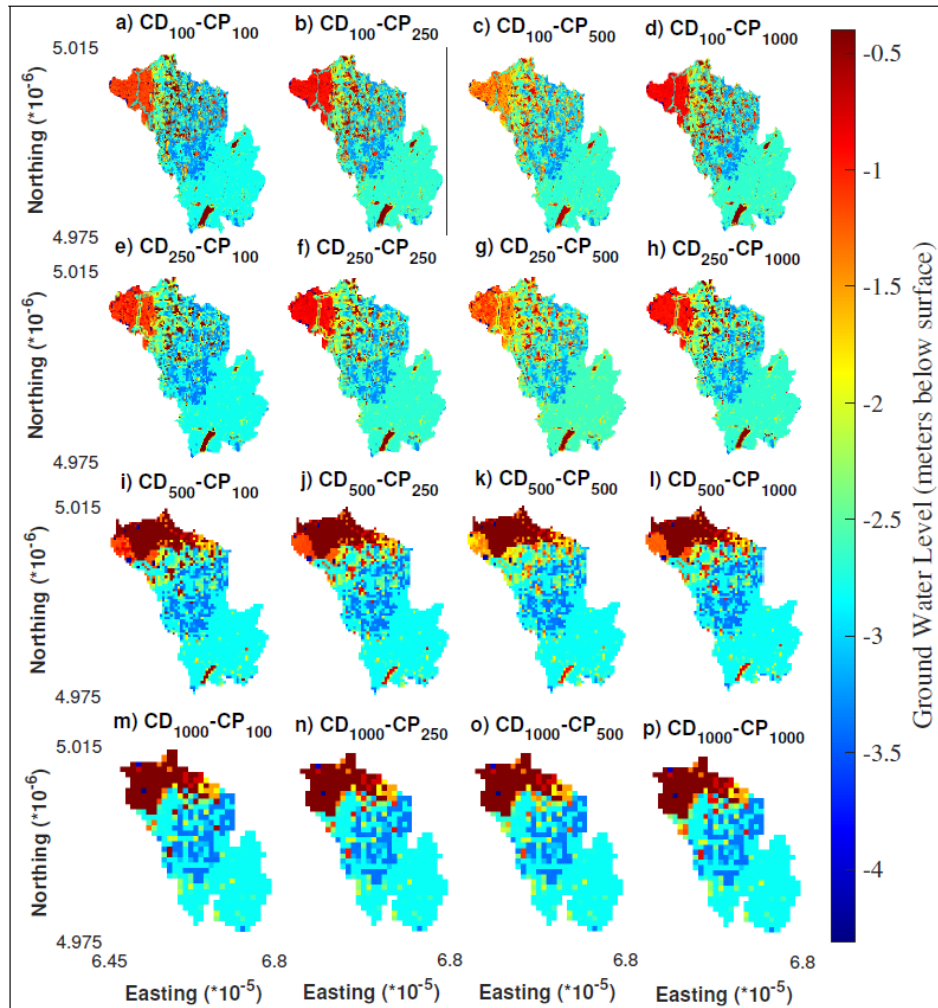
La Figure 4.3.4 montre que l’effet de la résolution spatiale de l’information physiographique utilisée pour les simulations domine généralement celui de la résolution spatiale prise en compte pour l’obtention des paramètres de calage (la majeure partie des points, sur les graphiques, se trouve sous la droite de pente unitaire, en bleu), et ce tant pour les pas de temps de simulation de 24h et de 3h que pour les bassins de toutes classes de superficies. Ces résultats, obtenus à l’aide du modèle WaSiM, supportent la vérification de l’hypothèse H4. Par contre, tel qu’il est possible de le remarquer, il existe des exceptions (bassins Aux Brochets et Boyer, notamment). La Figure 4.3.5 fournit plus d’explications, pour le bassin de la rivière Aux Brochets, à ce sujet. En effet, cette figure montre que, dans la partie nord-ouest du bassin (soit à l’exutoire), le changement de résolution spatiale de l’information physiographique influence fortement le niveau de la nappe phréatique par rapport à la surface. Plus la résolution de l’information physiographique est grossière (lignes, du haut vers le bas), plus le niveau de la nappe se rapproche de la surface ce qui est essentiellement dû à des modifications de la pente du bassin. Étant donné que la zone touchée se trouve tout près de l’exutoire du bassin, l’impact sur les



débites simulés est grand et domine celui de la résolution spatiale prise en compte pour l'obtention des paramètres de calage.



**Figure 4.3.16** Effet de la résolution spatiale de l'information physiographique en fonction de celui de la résolution spatiale utilisée pour l'obtention des paramètres de calage sur les débits de périodes de retour 5, 10, 20 et 50 ans simulés par WaSiM. Les bassins sont placés par ordre de catégorie de superficie, soit « grands » (1<sup>re</sup> ligne), « moyens » (2<sup>e</sup> ligne), « petits » (3<sup>e</sup> ligne). Les résultats sont montrés chaque fois pour les pas de temps de simulation de 24h et de 3h. La loi log-Pearson type III a été utilisée pour l'analyse fréquentielle.



**Figure 4.3.17** Impact des changements de résolutions spatiales de l'information physiographique (ligne) et de résolution spatiale utilisée pour l'obtention des paramètres de calage (colonne) sur la simulation du niveau de la nappe phréatique sous la surface, bassins Aux Brochets, modèle hydrologique WaSiM.

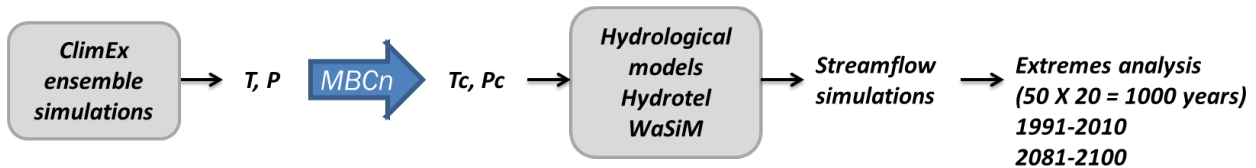
*Article 2 – Uncertainty from Spatio-temporal Resolution, Hydrological Model and Watershed Size on the Simulation of Future Summer-fall Floods*

Ce second article se trouve dans la suite logique du précédent, en s'intéressant cette fois aux débits et crues d'été-automne projetés dans le futur. Dans cet article, les deux hypothèses suivantes ont été examinées, en lien avec le fait que le changement de l'échelle spatio-temporelle de la modélisation entraîne une variabilité dans la projection des débits extrêmes :

- Pour les petits bassins versants, prédominance de l'impact de la résolution temporelle pour la simulation des débits extrêmes d'été-automne en période future. (H1)

- En augmentant la taille du bassin versant, la contribution du choix du modèle hydrologique et de l'échelle spatiale dans cette variabilité augmente et celle de l'échelle temporelle diminue. (H2)

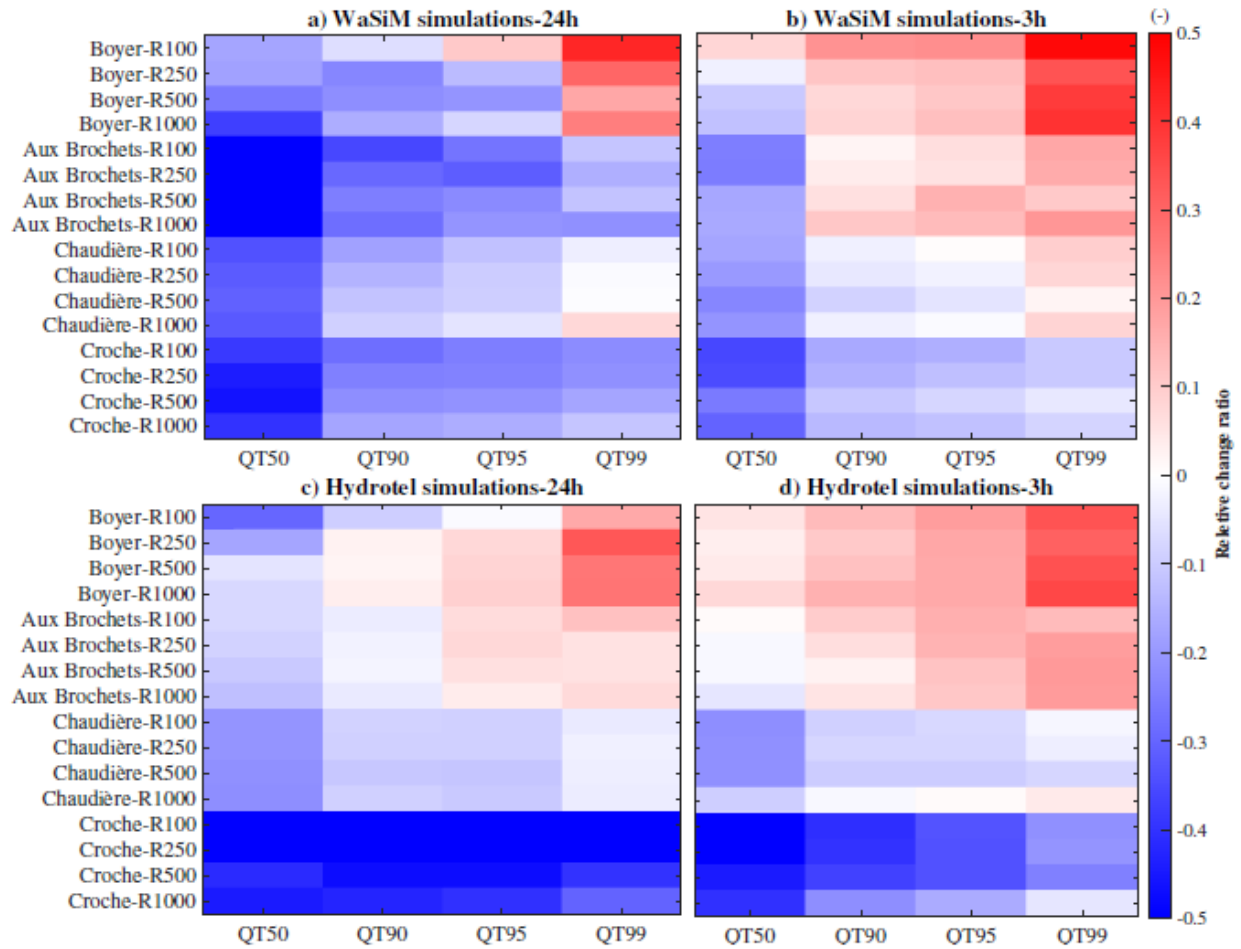
La chaîne de modélisation hydroclimatique qui a été utilisée est montrée à la Figure 4.3.6. Cette dernière a permis la production de séries de 1000 années de débits tant pour la période de référence (1991-2010) que pour la période future (2081-2100) étudiées. Encore une fois, la résolution spatiale de l'information physiographique utilisée pour construire les modèles Hydrotel et WaSiM a été variée de 100 m à 250 m, 500 m, et 1000 m, pour les quatre bassins encerclés en bleu à la Figure 4.3.1. Les quantiles de débits associés aux probabilités de dépassement de 0,5 (temps de retour 2 ans, QT50), 0,1 (temps de retour 10 ans, QT90), 0,05 (temps de retour 20 ans, QT95) et 0,01 (temps de retour 100 ans, QT99) ont été étudiés.



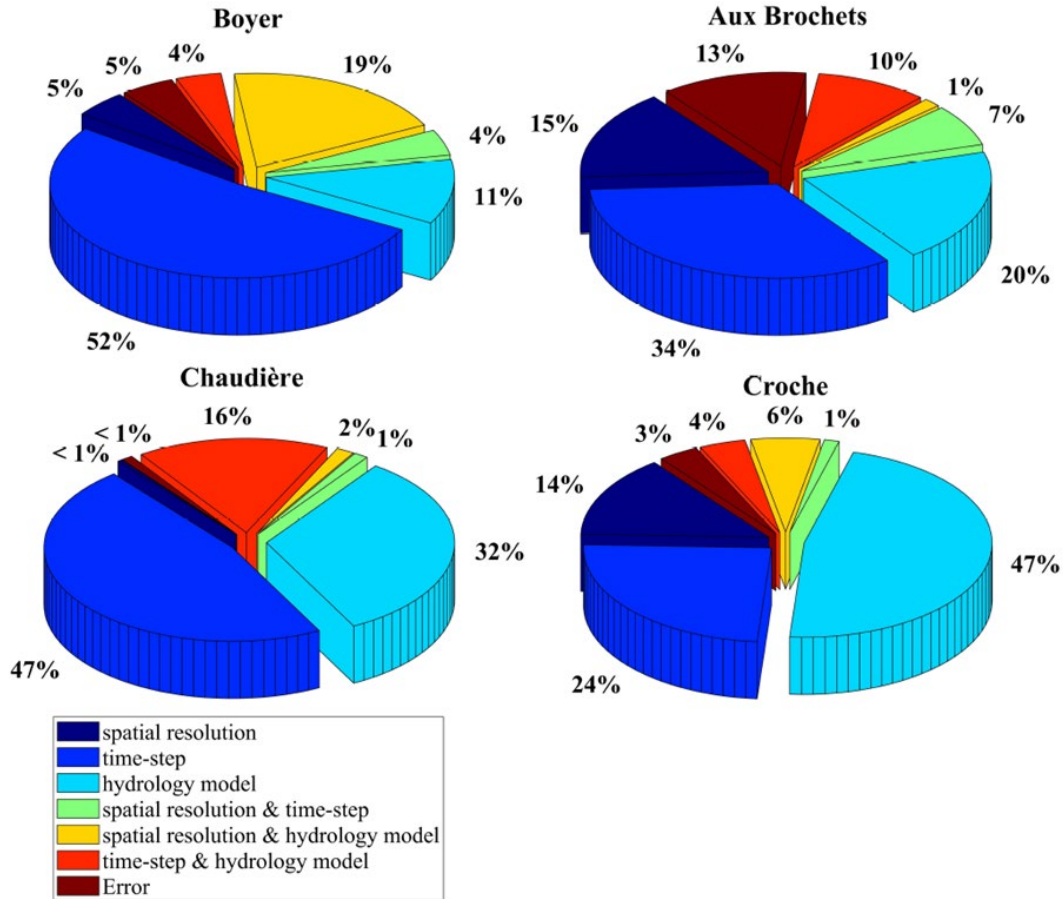
**Figure 4.3.18** Chaîne de modélisation utilisée dans le cadre des travaux de l'article 2 de Siavash Pouryousefi Markhali. La méthode de post-traitement utilisée est MBCn, telle que décrite dans les travaux de Mina Faghieh. La dernière étape de la chaîne montre que les résultats de simulations à l'aide des 50 membres de ClimEX, tant pour la période de référence (1991-2010) que pour la période future (2081-2100) ont été rassemblés de manière à créer des séries de 1000 années. Ainsi, l'analyse des débits extrêmes s'est appuyée sur les distributions empiriques. T = température, P = précipitation, Tc = température corrigée, Pc = précipitation corrigée.

Les principales conclusions de l'article sont supportées par les résultats montrés aux Figure 4.3.7 et Figure 4.3.8. En ce qui concerne l'hypothèse H1, la Figure 4.3.7 montre que, tant pour le modèle WaSiM (première ligne) que pour le modèle Hydrotel (2<sup>e</sup> ligne), les débits simulés au pas de temps de 3h (colonne de droite) augmenteront dans le futur (couleur rouge) pour les plus petits bassins versants étudiés (Boyer et Aux Brochets) comparativement aux plus grands (Chaudière et Croche). Cela est en accord avec l'hypothèse H1 qui avait été posée au départ. Par ailleurs, tel qu'il est possible de le remarquer sur la Figure 4.3.8, le pas de temps de simulation (en bleu royal) constitue un déterminant majeur de la variabilité de la projection des crues pour les petits bassins versants, plus que pour les grands.

Si l'on s'intéresse aux QT95 et QT99 pour le bassin Boyer, les résultats de la Figure 4.3.7 montrent que, pour le pas de temps de simulation de 24h, il est probable que la résolution spatiale change la direction du changement du débit projeté. De plus, les résultats de la Figure 4.3.8 montrent que le choix du modèle hydrologique (en turquoise) est important à la fois pour les plus petits bassins versant (1<sup>re</sup> ligne) et pour les plus grands (2<sup>e</sup> ligne). Enfin, même pour les grands bassins, la résolution spatiale de la simulation (en indigo) demeure moins importante que la résolution temporelle. Les termes d'interaction de 1<sup>er</sup> ordre montrent aussi l'importance du modèle hydrologique (rouge et jaune) et du pas de temps de simulation (rouge). Ces résultats ne permettent pas de valider l'hypothèse H2.



**Figure 4.3.19** Direction et amplitude relative du changement sur les débits projetés (rouge : augmentation; bleu : diminution) pour la période 2081-2100. Les résultats sont montrés par quantile (axe des abscisses), par bassin et par résolution spatiale utilisée pour la modélisation hydrologique (axe des ordonnées). Les résultats pour le modèle WaSiM sont présentés sur la première ligne, pour les pas des temps de simulation de 24h et 3h. Les résultats pour le modèle Hydrotel sont présentés sur la 2<sup>e</sup> ligne pour les pas de temps de simulation de 24h et 3h.



**Figure 4.3.20** Résultats de l'analyse de décomposition de la variance réalisée sur les débits extrêmes d'été-automne (QT50, QT90, QT95, QT99), via l'utilisation d'une approche ANOVA-n. Les couleurs verte, jaune et rouge montrent les résultats des interactions de premier ordre entre les trois éléments étudiés, soient le modèle hydrologique, la résolution spatiale et la résolution temporelle.

### Article 3 – Regionalization of a Distributed Hydrology Model Using Random Forest

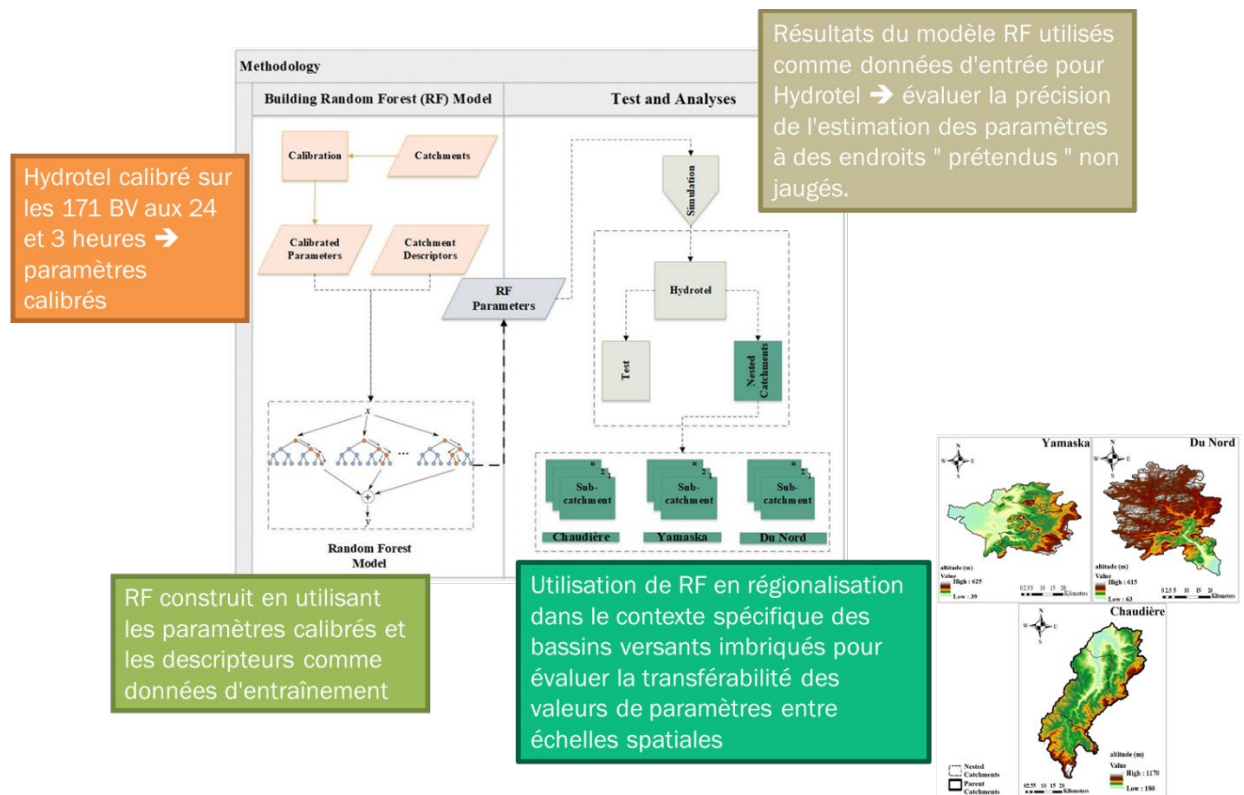
Ce troisième article se trouve dans le prolongement de l'article 1, en ce sens où ce dernier a montré l'importance de considérer les effets des différentes résolutions temporelles et leur interaction avec la résolution spatiale en modélisation hydrologique distribuée. L'impact des résolutions spatiale et temporelle en modélisation distribuée sur les valeurs des paramètres de ces modèles à travers un schéma de régionalisation n'a, à notre connaissance, jamais été étudié. L'article 3 de la thèse s'intéresse à cette question en utilisant une méthode d'apprentissage automatique, *Random Forest* (RF), qui permet de tenir compte des relations non-linéaires entre les paramètres des modèles hydrologiques et les prédicteurs (météorologiques, physiographiques) utilisés en régionalisation.

Les travaux réalisés ont visé à valider ou rejeter les trois hypothèses suivantes :

- Un pas de temps plus fin ajoute plus d'informations aux paramètres calibrés et améliore l'efficacité du modèle de régionalisation. (H1)

- Les paramètres approximatifs par RF sont spatialement cohérents et donc transférables à travers les échelles spatiales (du sous-bassin à l'unité de simulation hydrologique ou UHRH). (H2)
- L'utilisation de prédicteurs plus représentatifs spatialement (c'est-à-dire en affinant leur résolution spatiale) pour refléter l'hétérogénéité du bassin versant améliorera la performance de la régionalisation à l'exutoire et aux emplacements internes non jaugés. (H3)

La Figure 4.3.9 montre la méthodologie qui a été suivie pour la réalisation des travaux de cet article. Seul le modèle hydrologique Hydrotel a été utilisé et les bassins versants pris en compte pour la régionalisation, au nombre de 171, sont montrés dans le panneau b) de la Figure 4.3.1. Des commentaires accompagnent la Figure 4.3.9 et montrent que les travaux ont été réalisés en quatre étapes principales, soit : (1) en orange, la calibration du modèle Hydrotel sur les 171 bassins, aux pas de temps de 24h et de 3h; (2) en vert en bas à gauche, la construction du modèle RF entre les paramètres calibrés et les descripteurs utilisés dans le cadre de cette étude (au nombre de 28, ils appartiennent aux catégories météorologique, topographique, occupation du sol et type de sol – les détails sont donnés dans l'article dont la version intégrale se trouve aux liens présentés à l'Annexe A; (3) en beige, en haut à droite, l'évaluation du modèle RF en considérant, un à un, chacun des 171 bassins comme pseudo-non-jaugés; (4) en vert plus foncé, en bas à droite, l'évaluation de la transférabilité des paramètres estimés via RF, lors de changement d'échelles spatiales, utilisant les trois groupes de bassins versants imbriqués montrés sur la figure.

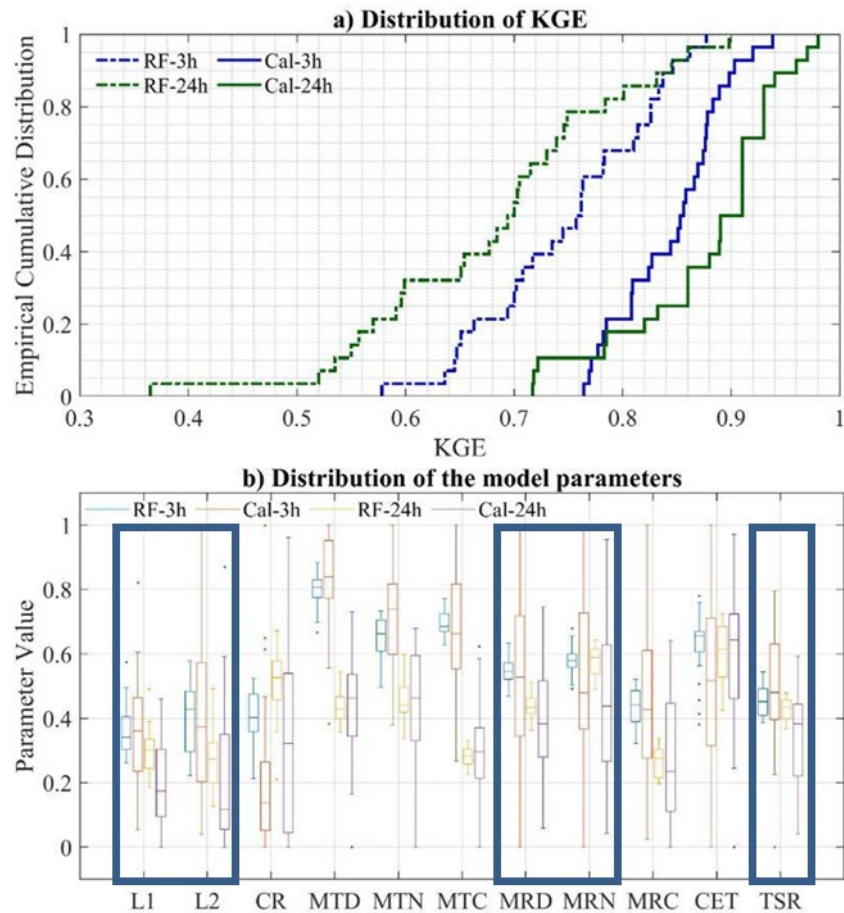


**Figure 4.3.21** Description de la méthodologie suivie pour la réalisation des travaux de l'article 3 de la thèse de Siavash Pouryousefi Markhali. Des commentaires ont été ajoutés afin d'en décrire les principales étapes.

Les résultats présentés à la Figure 4.3.10 montrent deux éléments importants qui sont en faveur de l'hypothèse H1 :

- (1) Panneau a) : L'affinement du pas de temps de modélisation constitue un avantage dans le calcul de la perte d'efficacité en régionalisation par rapport au calage des paramètres du modèle hydrologique. En effet, la perte d'efficacité est plus faible pour le pas de temps de 3h (écart entre les courbes en bleu) que pour le pas de temps de 24h (écart entre les courbes en vert). L'application du test statistique de Student montre toutefois que cette différence, entre les résultats pour les deux pas de temps, n'est pas statistiquement significative.
- (2) Panneau b) : Les paramètres RF-3h tendent à générer une meilleure approximation des paramètres Cal-3h (médiane) que dans le cas du pas de temps de 24h (voir en particulier les paramètres identifiés par les boîtes en bleu foncé, qui sont liés aux épaisseurs de couches du sous-modèle BV3C, à la fonte de la neige et au seuil de température entre les phases de précipitation; les détails se trouvent dans l'article dont le lien est présenté à l'Annexe A.

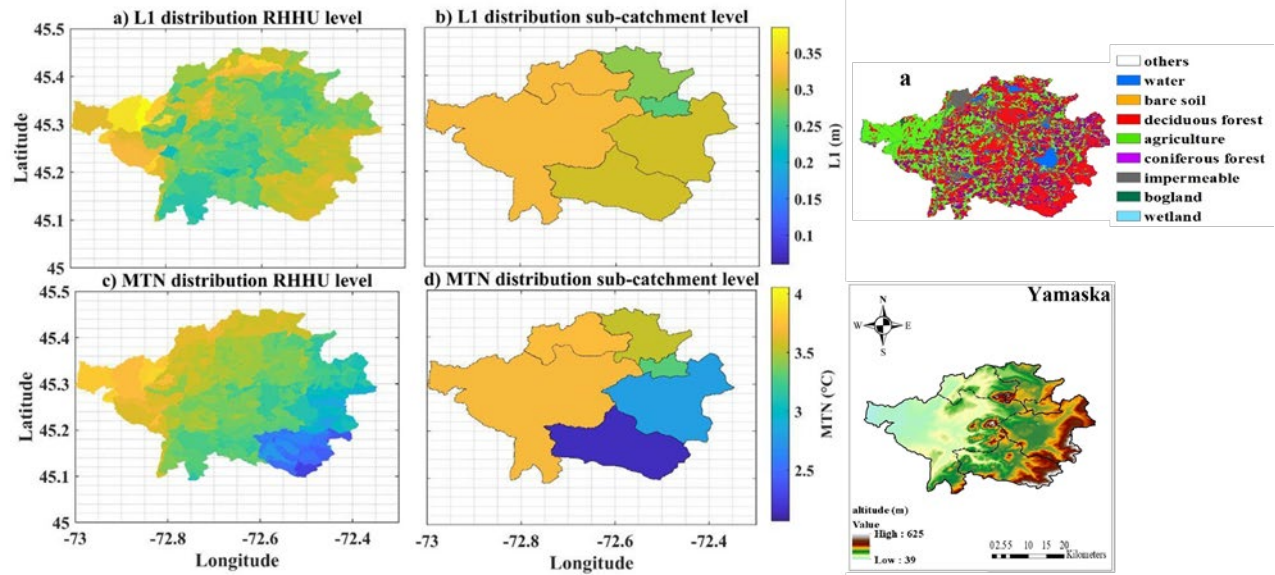
Dans les deux cas, les distributions représentent l'ensemble des bassins versants. Les boîtes à moustache de la Figure 4.3.10b représentent les quantiles principaux de la distribution. Les extrémités de la boîte représentent les quantiles 0.25 et 0.75, avec la médiane au centre. Les moustaches représentent les extrêmes de la distribution.



**Figure 4.3.22** a) Comparaison des performances, en matière de KGE, entre le calage (Cal) et la régionalisation (RF) des paramètres du modèle Hydrotel, pour les pas de temps de simulation de 3h et de 24h. b) Comparaison des distributions des valeurs de paramètres obtenues en calage et en régionalisation, pour les pas de temps de simulation de 3h et de 24h.

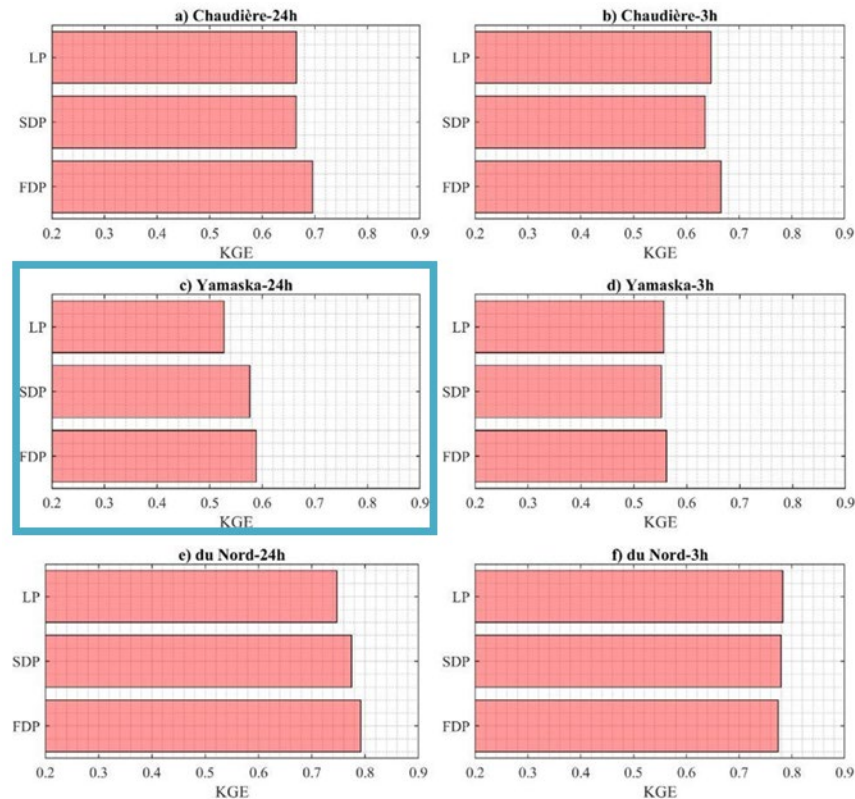
La Figure 4.3.11 montre que RF maintient la corrélation spatiale entre les descripteurs et les paramètres à travers différents niveaux de spatialisation, soit des UHRH (panneaux a et c) aux sous-bassins (panneaux b et d). Deux exemples de paramètres (L1 et MTN) sont montrés pour le bassin versant de la rivière Yamaska et ses six sous-bassins. Ces paramètres sont liés à l'épaisseur des couches de sol du sous-modèle BV3C (L1) et à la fonte de la neige (MTN). Les résultats montrent par ailleurs qu'il existe un lien avec les caractéristiques topographiques et l'occupation du sol du bassin (ajouts à droite des panneaux b et d, sur la figure). Ces résultats sont en accord avec l'hypothèse H2 posée au départ.





**Figure 4.3.23** Valeurs des paramètres L1 et MTN estimées à l'aide de RF, à l'échelle des UHRH (a, c) et des six sous-bassins (b, d) pour le bassin versant de la rivière Yamaska. Les panneaux se trouvant à droite complètement montrent l'occupation du sol sur le territoire du bassin ainsi que sa topographie.

En ce qui concerne l'hypothèse H3, la Figure 4.3.12 montre qu'aucune conclusion claire ne peut être tirée en ce qui a trait à l'amélioration de la performance (KGE) de la régionalisation avec des descripteurs raffinés spatialement, au pas de temps de simulation de 3h. Par contre, une amélioration est notée au pas de temps de 24h. Le gain en performance le plus important est obtenu pour le bassin versant le plus hétérogène spatialement, soit celui de la rivière Yamaska (panneau c, encadré en turquoise). Ces résultats, pour le pas de temps de 24h à tout le moins, vérifient l'hypothèse H3.



**Figure 4.3.24** Performances obtenues en régionalisation, exprimées à l'aide du KGE, lorsque le degré de spatialisation de l'information physiographique des bassins augmente. LP = aucune spatialisation, mêmes valeurs de l'information physiographique pour tout le bassin; SDP = représentation par sous-bassins; FDP = représentation la plus fine, reposant sur les UHRH. La colonne de gauche montre les résultats pour le pas de temps de simulation de 24h et la colonne de droite montre les résultats pour le pas de temps de simulation de 3h. Les valeurs de KGE sont des valeurs moyennes calculées sur l'ensemble des sous-bassins imbriqués, dans chacun des trois bassins versants étudiés.

### Discussion générale des résultats de la thèse de Siavash Pouryousefi Markhali

Le principal point fort, qu'il est important de retenir des travaux de cette thèse, est qu'elle a permis de bonifier les connaissances rattachées à la modélisation hydrologique distribuée (et à bases physiques). Il existe, bien sûr, de la littérature scientifique sur le sujet mais elle demeure, à ce jour, beaucoup plus limitée en quantité que la littérature traitant de l'utilisation de modèles hydrologiques globaux et conceptuels. Par ailleurs, la littérature en général sur la modélisation hydrologique à des pas de temps sous-journaliers commence à connaître une croissance en raison de la disponibilité des données qui augmente, ceci dit dès lors que l'on s'intéresse aux questions d'échelles, en modélisation distribuée, il nous apparaissait important que la composante spatiale soit aussi étudiée. Il semble logique *a priori* que le raffinement d'échelle temporelle s'accompagne du raffinement d'échelle spatiale. Les présents travaux démontrent, jusqu'à un certain point, qu'il existe une interaction entre les échelles temporelle et spatiale mais ce point devrait être étudié davantage. Ce qui fait surtout la différence, dans les résultats obtenus, c'est l'échelle temporelle (pas de temps de simulation) et le choix du modèle hydrologique.

Les travaux réalisés comportent un certain nombre de limites dont les principales sont exposées ci-après et lesquelles peuvent donner des pistes à explorer dans le cadre de travaux futurs :

- Nombre et localisation des bassins : il pourrait être intéressant d'étendre les études réalisées dans le cadre des articles 1 et 2 à un plus grand nombre de bassins versants, situés dans des régions aux conditions hydroclimatiques diversifiées afin de permettre de d'étendre la portée des conclusions obtenues. Ceci dit, le temps requis pour le traitement des données physiographiques et la mise en place de modèles tels que Hydrotel et WaSiM n'est pas à négliger. Le temps de calcul lié aux calages multiples de ces modèles peut, aussi, rapidement devenir important.
- Choix des modèles hydrologiques : les modèles distribués retenus pour ces travaux sont ceux qui sont utilisés par les principaux partenaires du projet, soit le MELCCFP au Québec (Hydrotel) et les collègues de LMU en Bavière (WaSiM). Chacun des deux modèles est de type « à tiroirs » et comporte diverses options pour la modélisation des processus hydrologiques. Bien que WaSiM utilise à son plein potentiel l'information physiographique fournie sous la forme de grilles et qu'il comporte des options de modélisation à bases plus physiques que le modèle Hydrotel, les informations fournies dans le Tableau 4.1 montrent que les structures de modèles qui ont été retenues pour les présents travaux ne sont pas si différentes l'une de l'autre. Ainsi, afin d'étendre encore une fois la portée des conclusions, il aurait pu être intéressant d'inclure d'autres modèles ou encore des formes diversifiées d'Hydrotel et de WaSiM en considérant des options de modélisation différentes. N'oublions pas, toutefois, que plus les options de modélisation sélectionnées se rapprochent de la physique des processus, plus elles ont tendance à nécessiter des données d'entrée diversifiées.
- Base de données pour l'application de RF : C'est un fait connu et démontré dans la littérature, la performance des méthodes par apprentissage automatique telles que RF est directement liée à la taille de la base de données à disposition. Les 171 bassins qui ont été utilisés pour l'étude en régionalisation avec RF proviennent d'un ensemble de plus de 400 bassins versants situés dans le sud du Québec. Plusieurs ont dû être retirés pour des raisons principalement liées à la longueur des séries temporelles de données disponibles et à la qualité des résultats en calage. L'accès à une base de données comportant un plus grand nombre de bassins versants serait certainement un avantage pour l'application d'une méthode telle que RF. L'ajout de bassins versants demanderait probablement d'étendre la zone d'étude compte tenu des contraintes énoncées ici-haut.

## **Détermination de la résolution temporelle optimale pour la modélisation hydrologique**

Cette section présente les travaux du mémoire de maîtrise de Parham Sabeti. L'Annexe A fournit une liste de liens vers les travaux plus détaillés décrits dans cette section. Une emphase importante a été mise sur l'utilisation de modèles conceptuels dans le cadre de cette section. L'utilisation de modèles conceptuels, à cause de leur efficacité en calibration et simulation, permet de faire des études sur de larges ensembles de bassins versants. Cette section décrit les efforts déployés dans cette étude à ce niveau.

## Approche méthodologique

Une première étape était de faire une sélection de bassins versants de tailles diverses et pour lesquels des données fiables étaient disponibles au pas de temps horaire. La base de données MOPEX a été utilisée à cette fin. L'expérience MOPEX (Model Parameter Estimation Experiment) est un projet international qui s'intéresse à l'identification des paramètres des modèles (Duan et al., 2006), et l'un de ses objectifs était de fournir un grand nombre de données hydrologiques de haute qualité pour un large éventail de bassins versants. Trois cent trente-neuf (339) bassins versants ont été extraits de la base de données MOPEX. La taille des bassins versants sélectionnés varie de 65 à 10 000 kilomètres carrés. Tous les bassins versants sélectionnés disposent de données horaires continues sur les précipitations sur une période commune de 14 ans, de 1990 à 2004. Les plus petits bassins versants ont un temps de réponse infra-quotidien clair alors que les plus grands ont un temps de concentration journalier à pluri-journalier clair. On pense généralement que la transition de la réponse infraquotidienne à la réponse quotidienne se situe dans la gamme des 500 à 1000 kilomètres carrés (Faghih et al., 2022 ; J. E. Reynolds et al., 2015). Les données horaires sur les précipitations ont été extraites directement de la base de données MOPEX et les données horaires correspondantes sur le débit des cours d'eau ont été extraites de la base de données de l'US Geological Survey (USGS). La base de données MOPEX ne fournit pas de température horaire, mais elle contient les températures minimales et maximales quotidiennes. Deux approches ont été testées pour obtenir la température horaire. Dans la première approche, une méthode d'interpolation spline par morceaux a été utilisée pour ajuster les températures quotidiennes minimales et maximales, qui ont été supposées se produire respectivement à 4 heures du matin et à 4 heures du soir. Dans une deuxième approche, la température horaire de la réanalyse ERA5 (Hersbach et al., 2020) a été utilisée comme substitut de la température horaire observée. Les deux approches ont fourni de bons résultats de modélisation hydrologique. Cependant, la première a donné des résultats de modélisation légèrement, mais systématiquement meilleurs (résultats non montrés), et a donc été choisie pour ce travail. A partir des valeurs horaires, toutes les données ont ensuite été agrégées à des intervalles de 2, 3, 4, 6, 8, 12 et 24 heures. Les valeurs instantanées de débit ont été utilisées à la fin de chaque intervalle, tandis que les précipitations cumulées ont été additionnées sur le pas de temps précédent. Les températures minimales et maximales sur le même intervalle de temps précédent ont été enregistrées. L'évapotranspiration a été calculée à l'aide de la formule d'Oudin (Oudin et al., 2005).

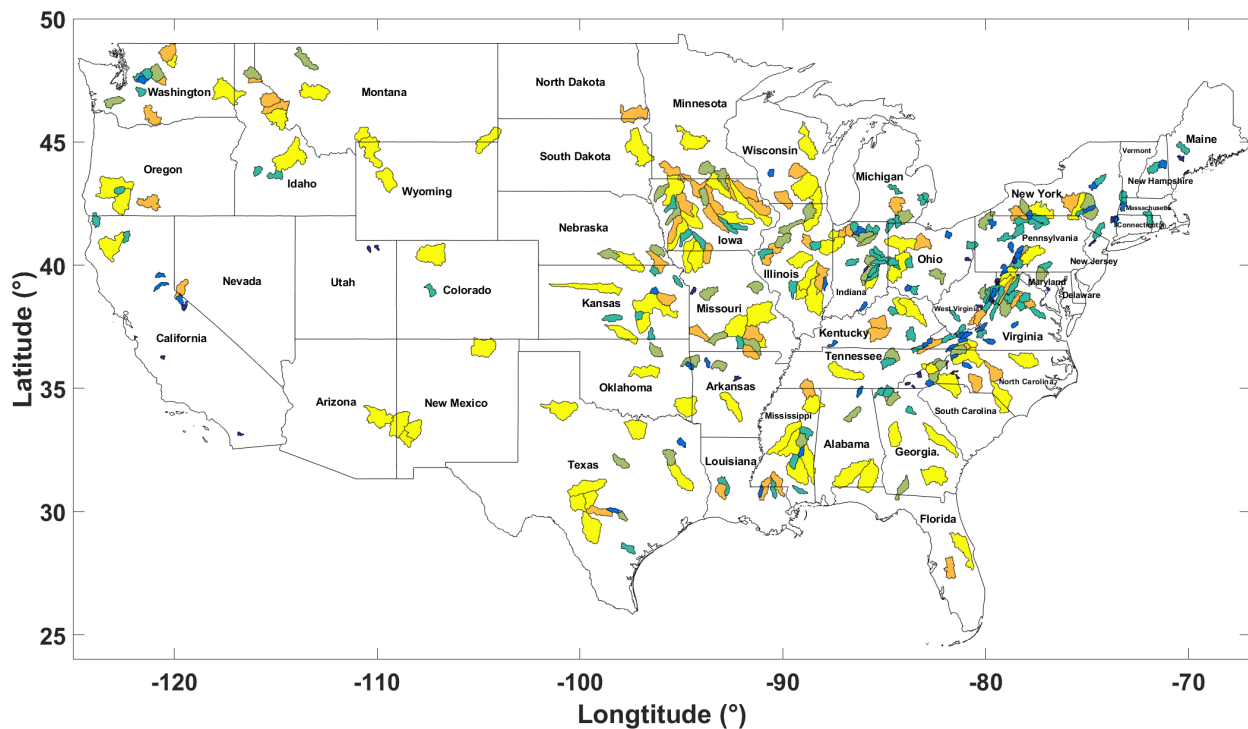
Pour étudier l'impact de la taille du bassin versant, tous les bassins versants ont été regroupés en 6 classes de taille comme présenté dans le tableau 1. La classification par taille est quelque peu arbitraire et a été conçue pour inclure un nombre relativement similaire de captages dans chaque classe. La taille du captage est une approximation du temps de concentration, qui est vraiment la variable clé qui représente le mieux le temps de réponse, mais qui est plus complexe à calculer.

**Tableau 1.** Classification des bassins versants en fonction de la taille

Groupe de taille	Dimension des bassins	Nombre de bassins
1	Area < 500 KM <sup>2</sup>	23
2	Area between 500 KM <sup>2</sup> and 1000 KM <sup>2</sup>	46

3	Area between 1000 KM <sup>2</sup> and 2000 KM <sup>2</sup>	84
4	Area between 2000 KM <sup>2</sup> and 3000 KM <sup>2</sup>	46
5	Area between 3000 KM <sup>2</sup> and 4500 KM <sup>2</sup>	56
6	Area > 4500 KM <sup>2</sup>	84

La Figure 4.3.13 montre les bassins versants sélectionnés.



**Figure 4.3.13** Carte des bassins versants sélectionnés. Les couleurs représentent les tailles de bassins versants.

Dans cette étude, en raison du grand nombre de bassins versants et de résolutions temporelles ( $339 \times 8 = 2712$ ), un modèle global ayant fait ses preuves a été sélectionné. De nombreuses études ont montré que les modèles globaux sont aussi performants que les modèles distribués lorsqu'il s'agit de simuler les débits à la sortie d'un bassin versant (par exemple, dos Santos et al., 2018 ; Reed et al., 2004 ; Smith et al., 2004). Le modèle GR4H, version horaire du modèle hydrologique journalier GR4J (Perrin et al., 2003) a été choisi pour ce travail. Il s'agit d'un modèle pluie-découlement à 4 paramètres qui peut être utilisé avec un pas de temps quotidien ou infra-quotidien. Il s'agit d'un modèle simple, parcimonieux, mais très performant comparé à de nombreux autres modèles conceptuels globaux. (de Boer-Euser et al., 2017 ; Ficchi et al., 2019 ; Mouelhi et al., 2013 ; Tegegne et al., 2017).

Le modèle GR4H calcule le débit de sortie pour tout bassin versant en utilisant les précipitations et l'évapotranspiration potentielle (PET), ainsi que la surface du bassin versant, comme seules entrées. Le modèle utilise deux réservoirs de stockage (production et routage) et deux hydrogrammes unitaires pour générer le débit résultant d'un événement de précipitation. Il possède quatre paramètres qui doivent être calibrés : X1 (capacité maximale du réservoir de production - mm), X2 (coefficient d'échange d'eau - mm), X3 (capacité maximale du réservoir de routage - mm) et X4 (temps de base de l'hydrogramme unitaire - heures).

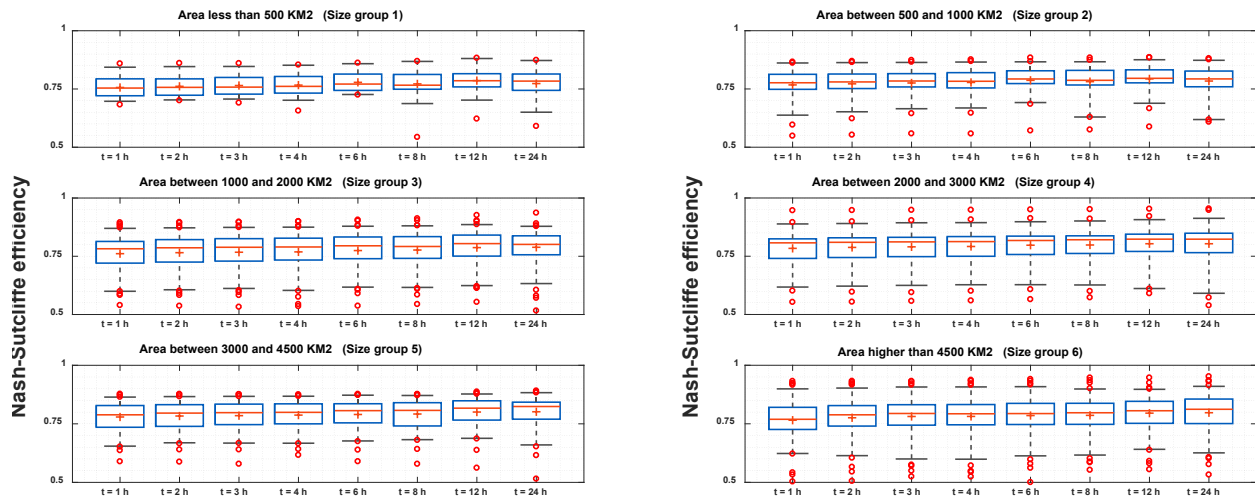
Parce que de nombreux bassins versants sélectionnés dans cette étude sont situés dans des régions où il y a des accumulations de neige, le modèle GR4H est lié au module neige de CemaNeige, qui a été spécifiquement développé pour être utilisé avec GR4H (Valéry et al., 2014). Le modèle final est donc un modèle à 6 paramètres. Les 2 paramètres supplémentaires sont X5 (facteur de fonte de neige par degré-jour) et X6 (facteur d'inertie du manteau neigeux). Le modèle GR4H/J a été utilisé dans de nombreuses études et s'est avéré très performant dans un large éventail de conditions (Arsenault et al., 2015 ; Perrin et al., 2003 ; Raimonet et al., 2017 ; Riboust et al., 2019 ; Tarek et al., 2020 ; H.-M. Wang et al., 2019).

La calibration du modèle hydrologique a été réalisée pour l'ensemble des 339 bassins versants et indépendamment pour chacun des 8 pas de temps (1-2-3-4-6-8-12 et 24 heures), puisque des études précédentes ont montré une dépendance des paramètres du modèle hydrologique à la résolution temporelle (par exemple, Cullmann et al., 2006 ; Ficchi et al., 2019). Cela revient à un total de 2712 (339 x 8) calibrations de modèles. Un algorithme de calibration automatique a donc été utilisé. L'algorithme Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) (Duan et al., 1992, 1994) a été choisi pour cette tâche. L'algorithme SCE-UA a été largement utilisé pour la calibration de modèles hydrologiques et s'est constamment révélé être parmi les algorithmes les plus performants (Jeon et al., 2014), notamment pour les modèles de complexité paramétrique réduite (Arsenault et al., 2014).

## Résultats principaux

Cette section présente les résultats principaux de cette étude. Un lien vers les résultats complets est présenté à l'Annexe A.

La figure 4.3.14 présente les principaux résultats de la calibration pour les 339 bassins versants et les 8 pas de temps. Les bassins versants sont regroupés en six classes selon le tableau 1. Les boxplots représentent la distribution des valeurs de NSE dans chaque classe de taille. Les résultats indiquent que les résultats de la modélisation sont très bons, avec des valeurs médianes NSE supérieures à 0,75 pour tous les pas de temps et toutes les classes de taille. Les résultats montrent que, quelle que soit la taille du bassin versant, les valeurs NSE présentent une légère tendance à la baisse avec une résolution temporelle croissante (pas de temps décroissant). Ceci ne doit pas être interprété comme une indication d'une diminution des performances du modèle, car les valeurs NSE ne sont pas strictement comparables entre les différents pas de temps. La dispersion des valeurs NSE, représentée par l'écart interquartile (hauteur de la boîte bleue) ou par les moustaches (90 % de toutes les valeurs), tend à augmenter légèrement pour les classes de taille plus importantes, mais sinon, les résultats sont très similaires.



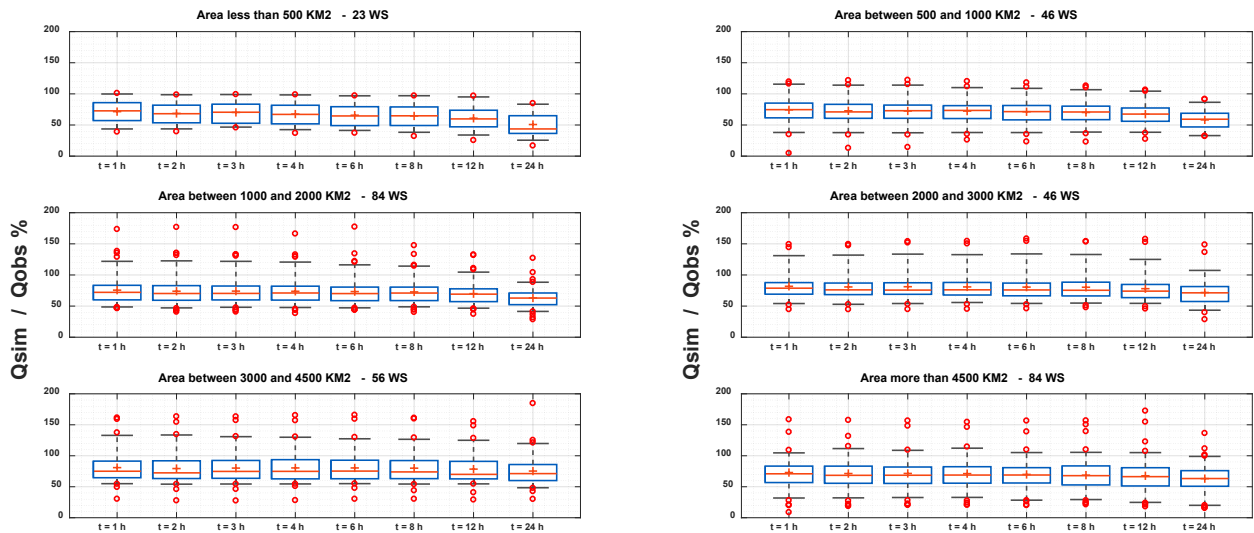
**Figure 4.3.14** Scores de calibration NSE pour tous les bassins versants en fonction de la résolution temporelle. Les six sous-figures correspondent aux 6 classes de taille décrites dans le tableau 1.

La simulation précise des débits de pointe est l'un des principaux objectifs de la modélisation hydrologique. Un débit de pointe bien simulé doit avoir une magnitude et un temps d'occurrence proches de ceux observés. En fonction de la taille du bassin versant, les débits de pointe peuvent se produire pendant ou peu après les événements pluvieux pour les petits bassins versants, et peuvent prendre jusqu'à plusieurs heures et jours pour les plus grands. Pour l'analyse des pics de ruissellement, les 30 plus grands pics indépendants ont été sélectionnés à partir de l'enregistrement d'observation pour chaque bassin versant. Ils ont été sélectionnés entre le 1er juin et le 31 octobre (pour exclure les pics liés à la fonte des neiges ou à des événements de précipitations mixtes) au cours des 14 années de données disponibles (1990 à 2003). La sélection des pics était basée sur deux critères : des pics consécutifs devaient être espacés d'au moins 24 heures et le débit minimum entre deux pics consécutifs devait être inférieur à 40 % de la valeur du pic le plus petit. L'occurrence horaire et la valeur du débit de pointe de chaque pic enregistré ont été extraites. Les mêmes valeurs ont été extraites du débit simulé pour les 8 échelles de modélisation temporelle. Pour chaque pic observé, le décalage temporel (différence absolue en heures entre les pics observés et simulés) et le rapport de magnitude (valeur du débit de pic simulé divisée par celle observée) ont été notés.

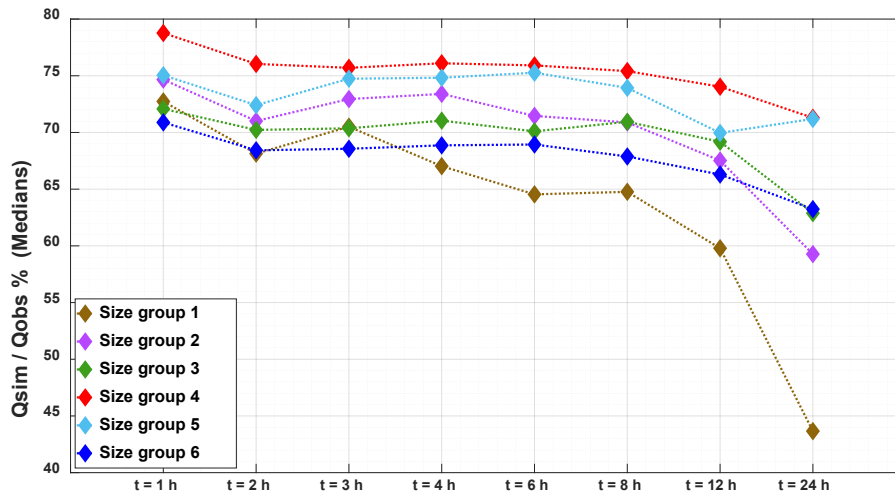
La figure 4.3.15 présente les ratios de magnitude des pics (simulés/observés) pour tous les bassins versants et tous les pas de temps de calcul. Chaque boxplot présente la distribution du ratio pour les 30 plus grands pics observés pour tous les bassins versants. Par exemple, pour la première classe de taille (< 500 km<sup>2</sup>), les boxplots sont composés de 690 valeurs correspondant aux 30 plus grands pics pour chacun des 23 bassins versants (30 x 23). La figure 4.3.16 ci-jointe présente la médiane des boxplots présentés dans la figure 4.3.15.

Ces résultats montrent que le modèle hydrologique sous-estime la magnitude du pic (ratio inférieur à 100%) dans la plupart des cas. Dans tous les groupes de taille, la représentation de la taille du pic s'améliore progressivement lorsque le pas de temps passe de quotidien à horaire. L'amélioration est rapide lorsque l'on passe à l'échelle infra-journalière, mais se stabilise lorsque l'on passe à des échelles de temps plus fines. La plus grande partie de l'amélioration est obtenue en passant du pas de temps de 24 heures à celui de 6 heures, à l'exception des deux plus petites

classes de taille, qui voient des améliorations supplémentaires avec un pas de temps plus fin. Les deux plus petites classes de bassins versants bénéficient le plus de l'échelle de temps plus fine, mais même la plus grande classe de taille (> 4500 km<sup>2</sup>), où de nombreux bassins versants ont une réponse temporelle de plusieurs jours, voit une augmentation notable de la représentation de l'ampleur du pic jusqu'à un pas de temps de 6 heures. Cette métrique suggère qu'un pas de temps de 6 heures semble optimal pour les bassins versants de plus de 1000 km<sup>2</sup>, alors qu'un pas de temps de 3 heures est préférable pour les plus petits bassins versants.



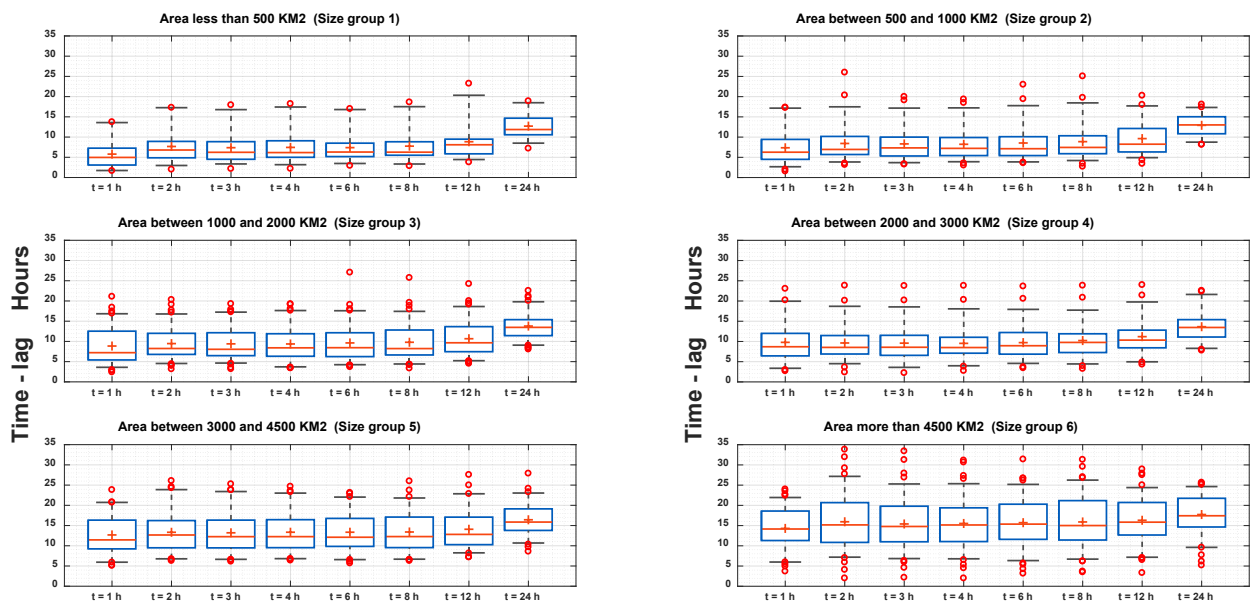
**Figure 4.3.15** Rapport d'amplitude des pointes de crues (simulés/observés) pour l'ensemble des bassins versants et des pas de temps de calcul. Chaque boxplot représente la distribution du ratio pour les 30 plus grandes pointes observés pour chacun des bassins versants dans chaque classe de taille.



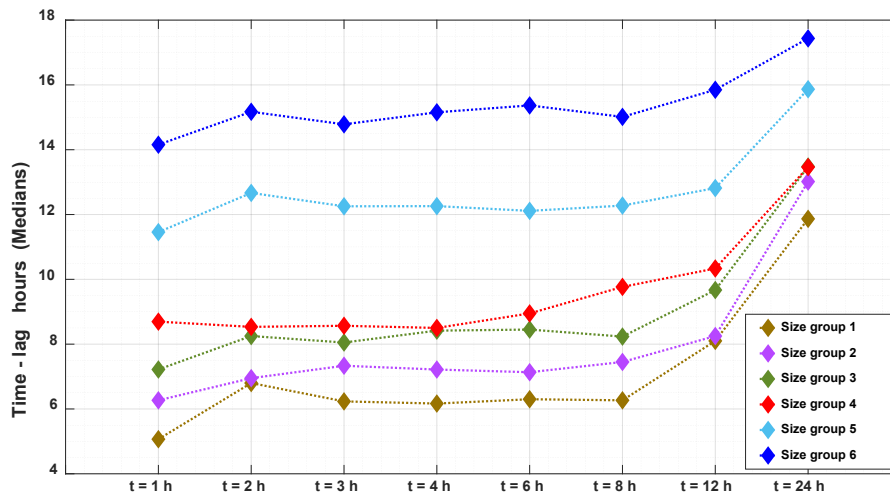
**Figure 4.3.16** Médiane du rapport de magnitude de pic (ligne rouge horizontale de chaque boxplot de la figure 4.3.15).



Les figures 4.3.17 et 4.3.18 présentent les résultats sous le même format que les figures 4.3.15 et 4.3.16, mais pour la différence horaire absolue entre le moment modélisé et le moment observé de l'apparition du débit de pointe. Comme c'était le cas pour l'amplitude du pic, il y a une amélioration rapide de la simulation du moment des débits de pointe, en particulier pour les petits bassins versants. Il y a un rendement décroissant au fur et à mesure que le pas de temps devient plus petit. La plupart de l'amélioration est obtenue avec un pas de temps de 8 heures pour toutes les classes de taille de bassin versant, bien que des améliorations mineures soient observées avec le pas de temps horaire. Il y a un biais clair dans la capacité du modèle hydrologique à représenter le moment des pics. Pour les pas de temps plus importants, une partie de ce biais est liée à l'attribution de l'occurrence de pointe modélisée au milieu du pas de temps (par exemple, 12 heures pour le pas de temps quotidien), mais même au pas de temps horaire, il y a un décalage médian de 5 heures entre l'occurrence de pointe observée et modélisée.

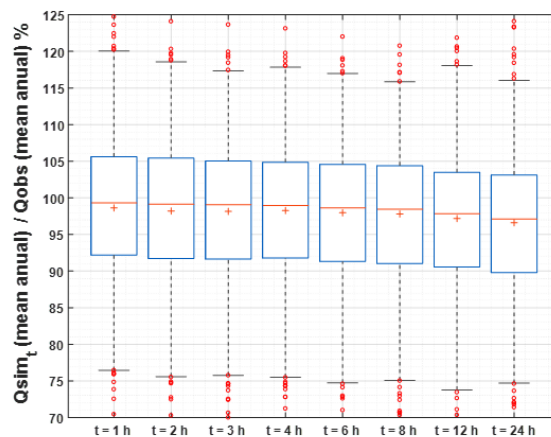


**Figure 4.3.17** Différence horaire absolue entre l'heure d'occurrence du débit de pointe modélisé et l'heure d'occurrence observée pour tous les bassins versants et tous les pas de temps de calcul. Chaque boxplot représente la distribution de la différence de temps d'occurrence du pic de débit pour les 30 plus grands pics observés pour chacun des bassins versants dans chaque classe de taille.



**Figure 4.3.18** Médiane de la différence horaire absolue de temps (ligne rouge horizontale de chaque boxplot de la figure 4.3.17).

La figure 4.3.19 présente le ratio des débits moyens  $\left[\frac{Q_{sim}}{Q_{obs}} \times 100\right]$  pour les 339 bassins versants. Tous les bassins sont regroupés en un seul groupe car les résultats étaient très similaires. Une valeur de 100 indique que le débit modélisé n'est pas biaisé, tandis que les valeurs supérieures et inférieures à 100 correspondent respectivement à un débit simulé positivement et négativement biaisé. Les résultats indiquent que les débits annuels moyens simulés sont généralement biaisés de façon négative, mais que les biais sont considérablement réduits lorsqu'on utilise un pas de temps de calcul plus court. Pour le pas de temps de 24 heures, le biais médian est de 94%, et il augmente progressivement jusqu'à 99% au pas de temps horaire. L'utilisation d'un pas de temps plus petit a donc une influence positive sur le bilan de masse. Une analyse détaillée des résultats (non montrée) semble indiquer que ceci est dû à la représentation progressivement meilleure du cycle quotidien d'évapotranspiration.



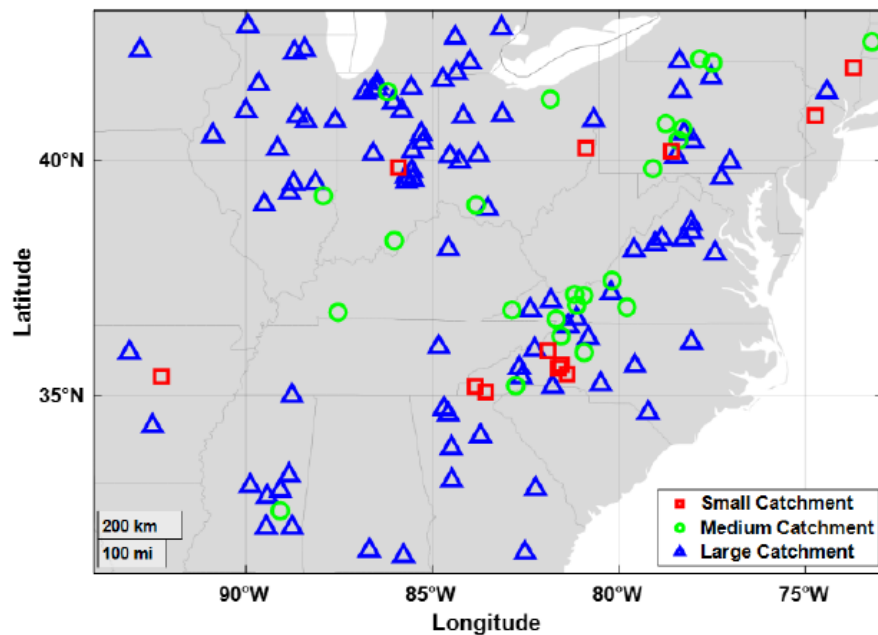
**Figure 4.3.19** Distribution du ratio de débit  $\left[\frac{Q_{sim}}{Q_{obs}} \times 100\right]$  de l'ensemble des 336 bassins versants pour chacun des 8 pas de temps de modélisation.

## Amplification spatiale and temporelle des précipitations extrêmes dans un climat plus chaud

Cette section présente une partie des travaux de la Thèse de doctorat de Mina Faghiih. L'Annexe A fournit une liste de liens vers les travaux plus détaillés décrits dans cette section. Ces travaux s'appuient sur le modèle hydrologique GR4J-CEMANEIGE développé pour des pas de temps multiples précédemment. Ce modèle avec pas de temps variable est appliqué au sous-ensemble des 336 bassins précédents mais présents dans le domaine des simulations CLIMEX tel que présenté à la Figure 4.3.20. Il en résulte un ensemble de 133 bassins versants. Notez que la méthodologie et résultats détaillés sont présentés via le lien présenté à l'Annexe A. Les 133 bassins versants sont regroupés en trois classes de grandeur tel que mentionné au Tableau 2.

**Tableau 2.** Classification des bassins versants en fonction de la taille

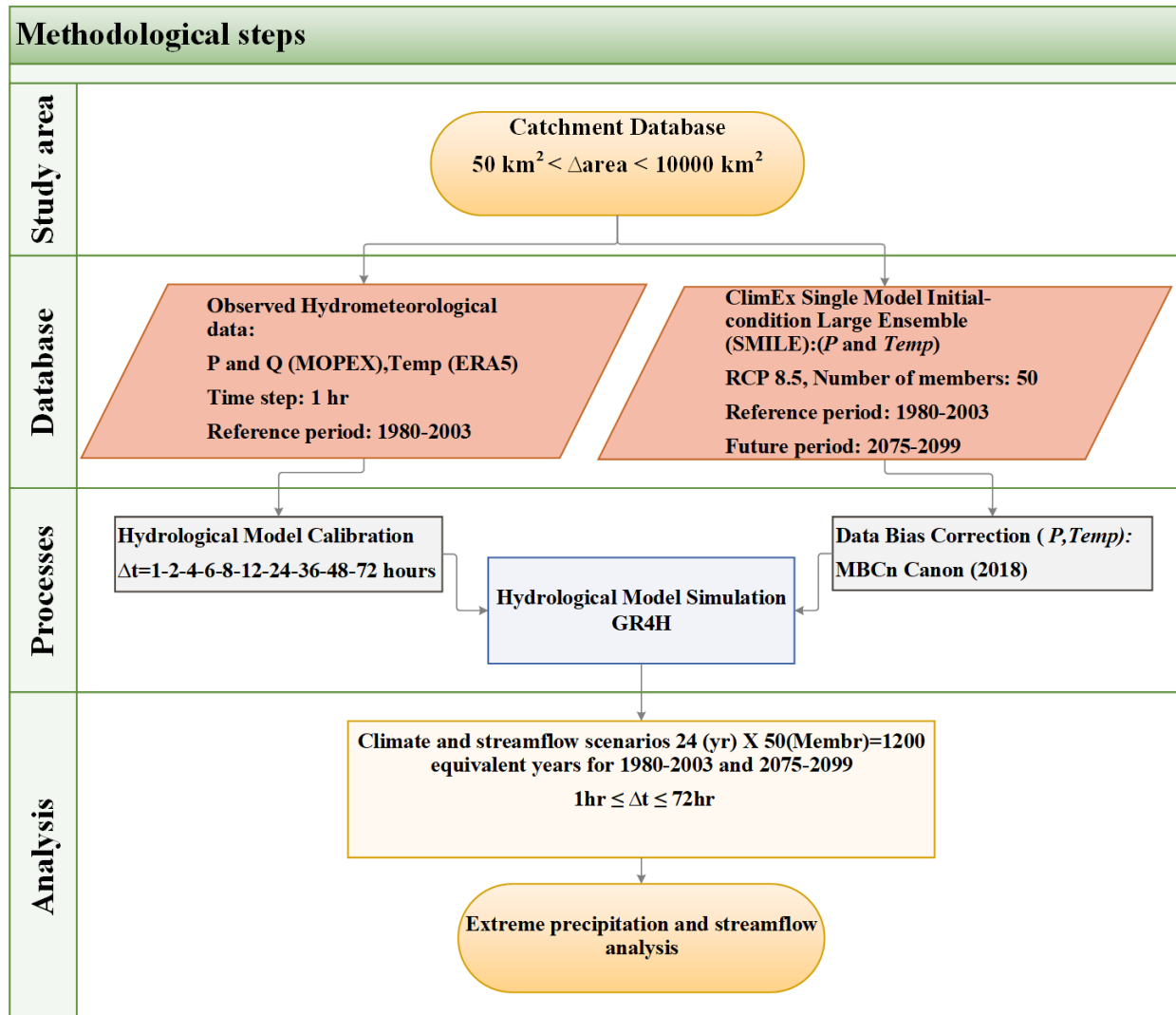
Groupe de taille	Dimension des bassins	Nombre de bassins
1	Area < 500 KM <sup>2</sup>	12
2	Area between 500 KM <sup>2</sup> and 1000 KM <sup>2</sup>	25
3	Area > 1000 KM <sup>2</sup>	96



**Figure 4.3.20** Bassins versants retenus pour l'étude sur l'amplification des crues

## Méthodologie

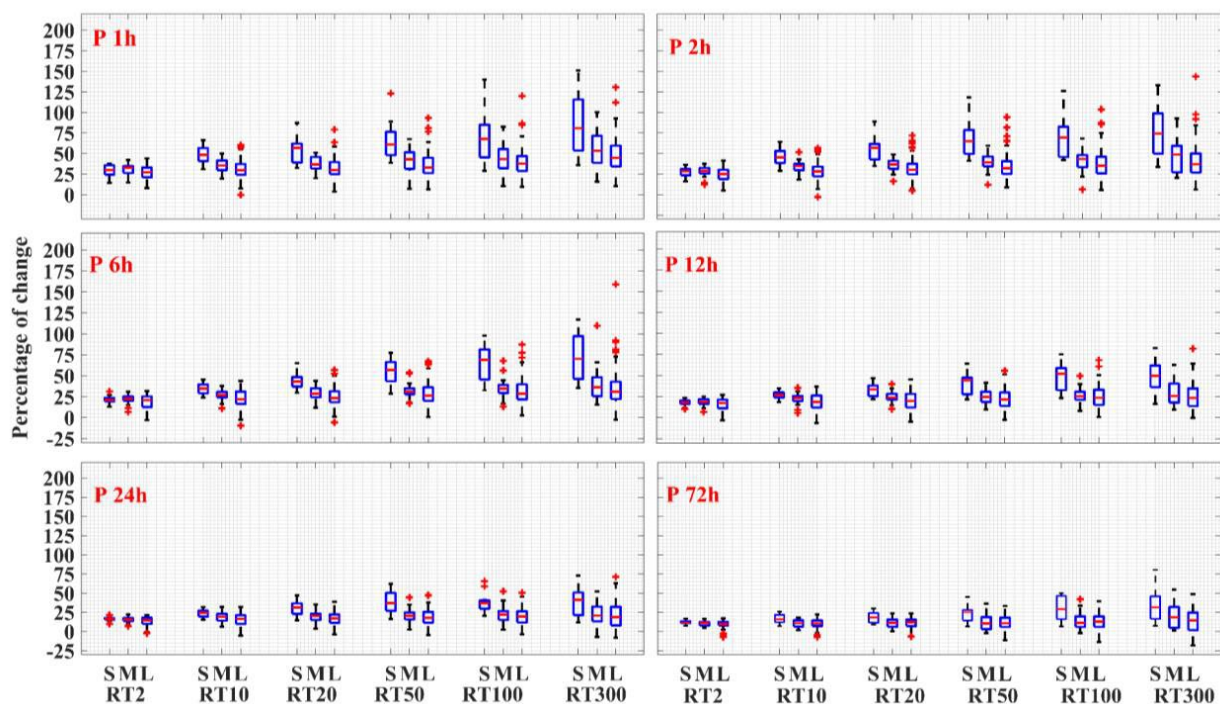
L'approche méthodologique est présentée à la Figure 4.3.21. LA base de données de 133 bassins versants dont la superficie varie entre 66,5 et 9886 km<sup>2</sup> a été mise en place dans le domaine de calcul nord-américain de l'expérience ClimEX (Leduc et al., 2019). Une base de données horaire de précipitations, de température et de débit est utilisée dans chaque bassin versant pour calibrer un modèle hydrologique sur une période de référence commune 1980-2003 (voir section précédente). Après une étape de correction des biais (voir section 4.1.1), les sorties horaires de précipitations et de températures de ClimEX sont utilisées pour générer des scénarios climatiques sur la période de référence 1980-2003 et la période future 2075-2099. Les scénarios contiennent tous deux 1200 ans (50 membres fois 24 ans/membre) représentant les conditions climatiques sur les périodes de référence et futures de 24 ans. Les valeurs extrêmes des précipitations et des débits sont ensuite analysées en fonction de la période de retour, de la durée des précipitations et de la taille du bassin versant.



**Figure 4.3.21** Méthodologie

### Résultats principaux

La figure 4.3.22 montre les changements prévus dans les précipitations extrêmes entre la période de référence et la période future. Les changements sont tous présentés en termes d'augmentations relatives en pourcentage. Une valeur de 25% représente une augmentation de 25% pour une durée de pluie et une période de retour données. La figure est divisée en six sous-figures correspondant aux six durées de pluie étudiées (1, 2, 6, 12, 24 et 72 heures). Pour chacune de ces sous-figures, six séries de trois boxplots sont présentées. Les six séries correspondent aux six périodes de retour (2, 10, 20, 50, 100 et 300 ans) considérées, et les trois boxplots correspondent aux trois classes de taille de bassin versant (petit - S, moyen - M, et grand L). Chaque boxplot représente la distribution des augmentations de précipitations parmi tous les bassins versants dans chaque classe de taille (12, 25 et 96 bassins, respectivement). Les boxplots montrent la médiane (ligne rouge), les 25ème et 75ème quantiles de la distribution (boîte bleue), tandis que les moustaches supérieures et inférieures présentent la gamme des valeurs min/max. Les croix rouges sont considérées comme des valeurs statistiques aberrantes.



**Figure 4.3.21** Augmentation des précipitations extrêmes (%) entre la période de référence (1980-2003) et la période future (2075-2099) en fonction de la durée des précipitations (6 sous-plots principaux) et de la période de retour (axe X). Les séries de trois boxplots représentent respectivement les classes de taille des petits (S), moyens (M) et grands (L) bassins versants.

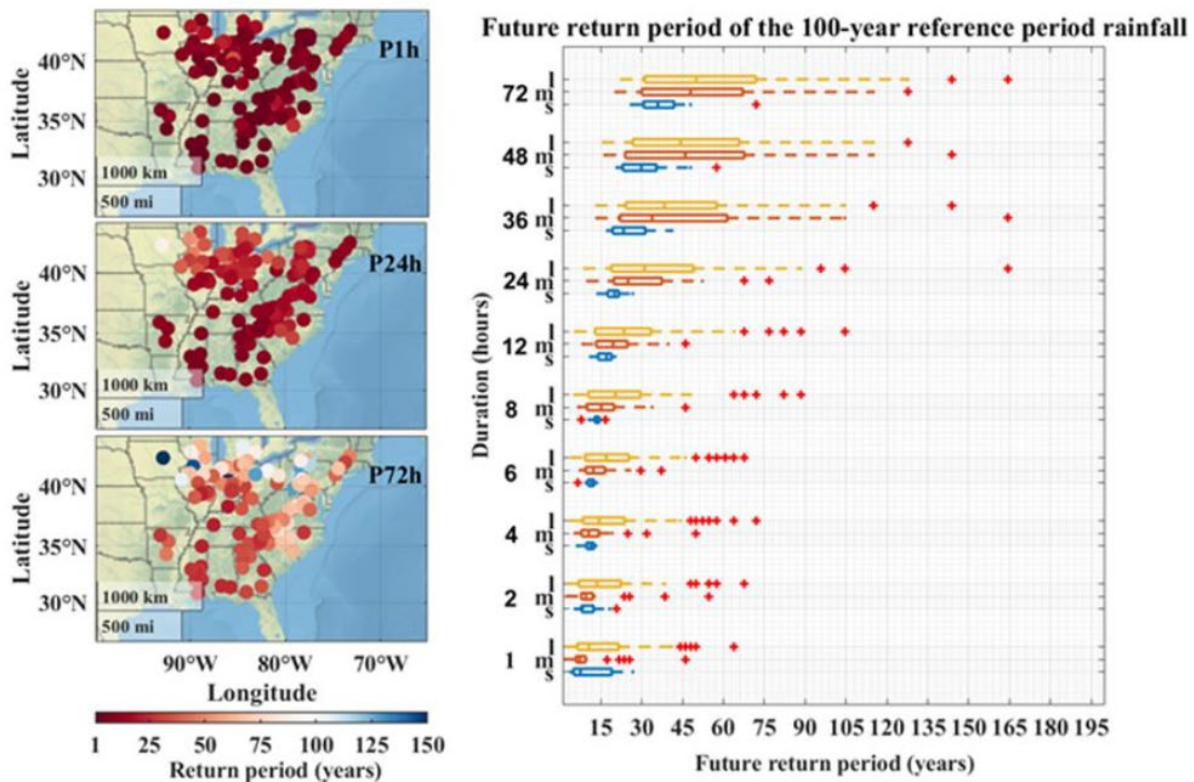
La figure 4.3.21 présente quatre caractéristiques importantes :

1. Des augmentations généralisées des précipitations extrêmes sont observées pour toutes les durées et périodes de retour, avec quelques rares exceptions (principalement des bassins versants aberrants dans les durées de précipitations plus longues).
2. A l'exception de la période de retour de 2 ans, les augmentations projetées des précipitations extrêmes sont fortement liées à la taille du bassin versant, les petits bassins versants voyant un changement beaucoup plus important par rapport aux bassins moyens et grands. Par exemple, pour les précipitations d'une heure sur 100 ans, l'augmentation médiane prévue est deux fois plus importante que celle de la classe des grands bassins versants.
3. Les augmentations prévues des précipitations extrêmes sont clairement liées à la durée des précipitations, les plus courtes connaissant les augmentations les plus importantes.
4. Les augmentations prévues des précipitations extrêmes sont clairement liées à la période de retour de la durée des précipitations, les augmentations les plus importantes étant observées pour les périodes de retour les plus longues.

En résumé, la figure 4.3.21 montre que les augmentations projetées des précipitations extrêmes sont plus importantes pour les petites durées de précipitations, les périodes de retour plus longues et les petits bassins versants. Ce comportement observé dans les données pluviométriques de ClimEX est cohérent avec ce qui a été observé dans des travaux récents avec d'autres modèles climatiques.

La figure 4.3.22 présente la période de retour future des précipitations ayant une récurrence de 100 ans sur la période de référence. Une valeur inférieure à 100 indique une fréquence croissante dans le futur. Par exemple, une période de retour future de 20 ans indique que les précipitations centennales de la période de référence se produiront tous les 20 ans (en moyenne) pour la période future, soit une fréquence cinq fois plus élevée. Une valeur supérieure à 100 indique que la même pluie centennale deviendra moins fréquente à l'avenir.

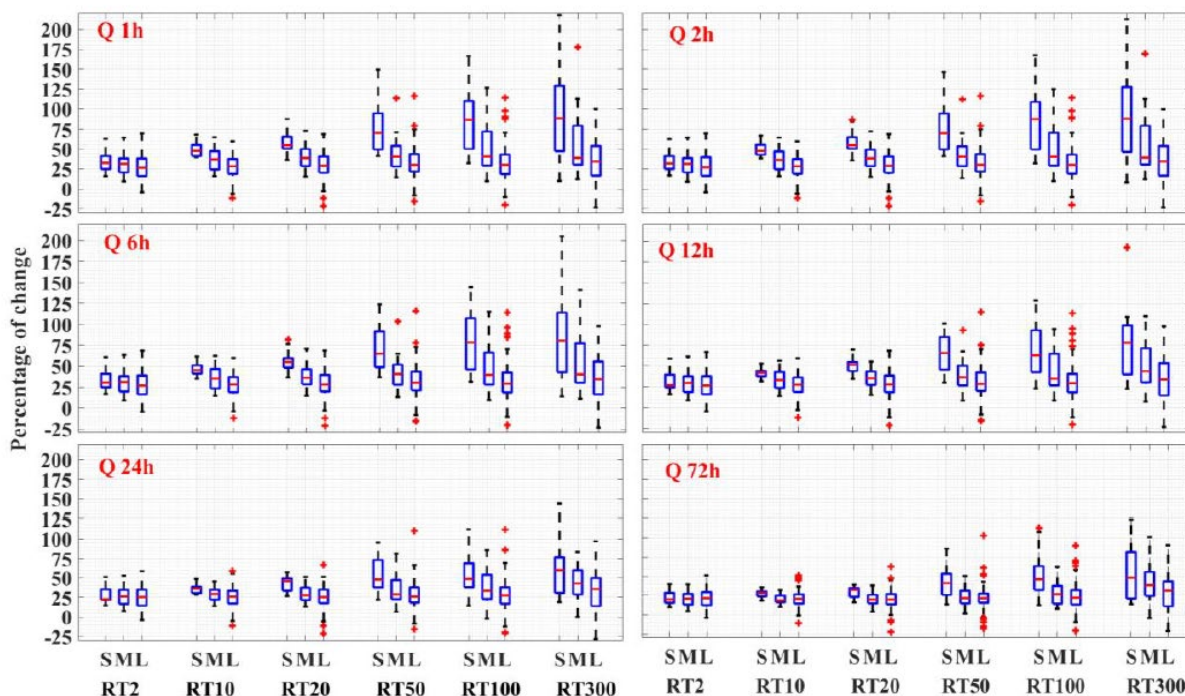
Les résultats mettent fortement en évidence les fortes augmentations de la fréquence des précipitations centennales de la période de référence, en particulier pour les durées des précipitations inférieures à 12 heures. Pour ces durées, la pluie médiane centennale devient au moins six fois plus fréquente au cours de la période future pour toutes les classes de taille de bassin versant. Les augmentations sont plus importantes et les boxplots sont plus serrés pour les petits bassins versants, mais cela peut être lié au nombre différent de bassins versants dans chacune des trois classes de taille. Les augmentations de fréquence deviennent progressivement plus faibles pour les durées de précipitations plus longues et la différence entre les classes de taille devient plus grande. La dispersion des boxplots des petits bassins versants est considérablement plus étroite, mais, une fois encore, cela peut être dû au plus petit nombre de bassins versants. Il existe un nombre relativement faible de bassins versants pour lesquels il n'y a pas d'augmentation de la fréquence future des précipitations centennales (période de retour future supérieure à 100 ans). Ce sont tous des bassins versants de grande taille et, dans une moindre mesure, de taille moyenne. Ceci ne se produit que pour des durées de pluie égales ou supérieures à 24 heures (avec une seule exception pour la durée de 12 heures). Ce comportement n'est pas aléatoire, et n'est observé que dans les bassins versants situés à l'extrémité nord du site d'étude.



**Figure 4.3.22** Côté droit : Période de retour future (axe X) des précipitations de la période de retour de référence de 100 ans, en fonction de la classe de taille du bassin versant et de la durée des précipitations (axe Y). A gauche : Distribution géographique de la période de retour future pour 1, 24 et 72 heures.

Les résultats présentés ci-dessus sont cohérents avec l'ensemble de la littérature récente sur les précipitations sub-quotidiennes dans un climat modifié (voir Mémoire de Parham Sabeti, référencé à l'Annexe A). Cependant, l'impact de ces changements sur le débit des cours d'eau n'est pas clair, compte tenu de l'impact potentiel d'une évapotranspiration accrue et de conditions potentiellement plus sèches dues à une température plus élevée. C'est ce que les figures 4.3.23 et 4.3.24 explorent.

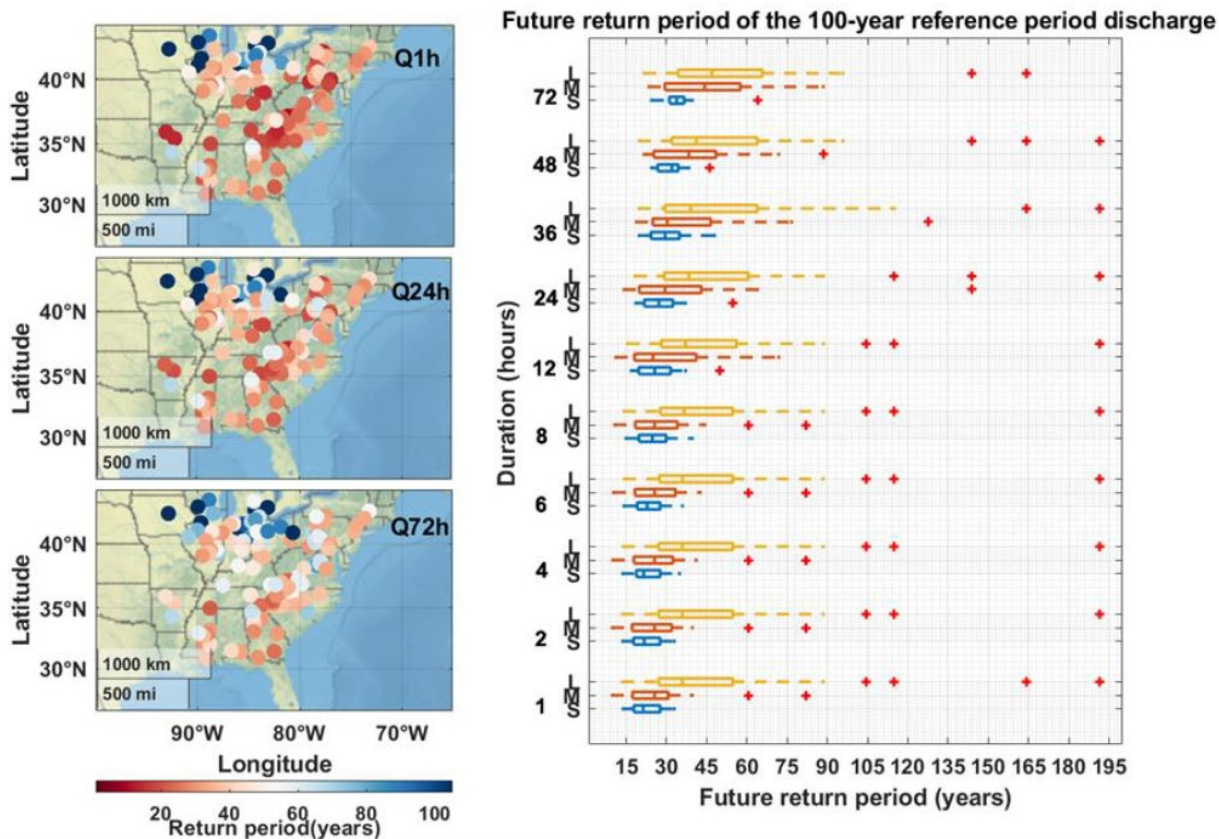
La figure 4.3.23 montre les changements projetés dans les débits extrêmes entre la période de référence et les périodes futures. La disposition de la figure 4.3.23 est la même que celle de la figure 4.3.21. La figure 4.3.23 suit les mêmes schémas que ceux observés pour les précipitations dans la figure 4.3.21, et les quatre principaux schémas observés s'appliquent également ici. Ces modèles montrent des augmentations relatives plus importantes pour des durées plus courtes, des fréquences plus faibles (périodes de retour plus longues) et des bassins versants plus petits. Cependant, les augmentations relatives semblent être plus importantes pour les débits extrêmes que pour les précipitations extrêmes.



**Figure 4.3.23** Augmentations extrêmes de débit (%) entre la période de référence (1980-2003) et la période future (2075-2099) en fonction de la durée du débit (6 sous-plots principaux) et de la période de retour du débit (axe X). Les séries de trois boxplots représentent respectivement les classes de taille des petits (S), moyens (M) et grands (L) bassins versants.

La figure 4.3.24 présente la période de retour future du débit de la période de référence de 100 ans. Tout comme pour la figure 4.3.22 (figure sœur pour les précipitations), une valeur inférieure à 100 indique une fréquence croissante dans le futur. Les résultats sont similaires à ceux des précipitations (Figure 4.3.22), et particulièrement pour la durée de 72 heures. Cependant, pour les durées d'une heure (et de 24 heures dans une moindre mesure), les couleurs sont plus foncées, ce qui indique une augmentation plus faible de la fréquence (période de retour) par rapport aux précipitations. Par conséquent, malgré l'augmentation plus importante du débit relatif (par rapport aux précipitations), elle se traduit néanmoins par une diminution plus faible de la période de retour future. Ces diminutions sont toutefois significatives, avec des périodes de retour médianes futures comprises entre 20 et 45 ans (augmentation de la fréquence de 2,2 à 5 fois).





**Figure 4.3.24** Côté droit : Période de retour future (axe X) du débit de la période de référence de 100 ans, en fonction de la classe de taille du bassin versant et de la durée du débit (axe Y). Côté gauche : Distribution géographique de la période de retour future pour 1, 24 et 72 heures.

## IMPACT DE LA VARIABILITÉ NATURELLE SUR L'HYDROLOGIE ET LES ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES (OBJECTIF B2 ET B3)

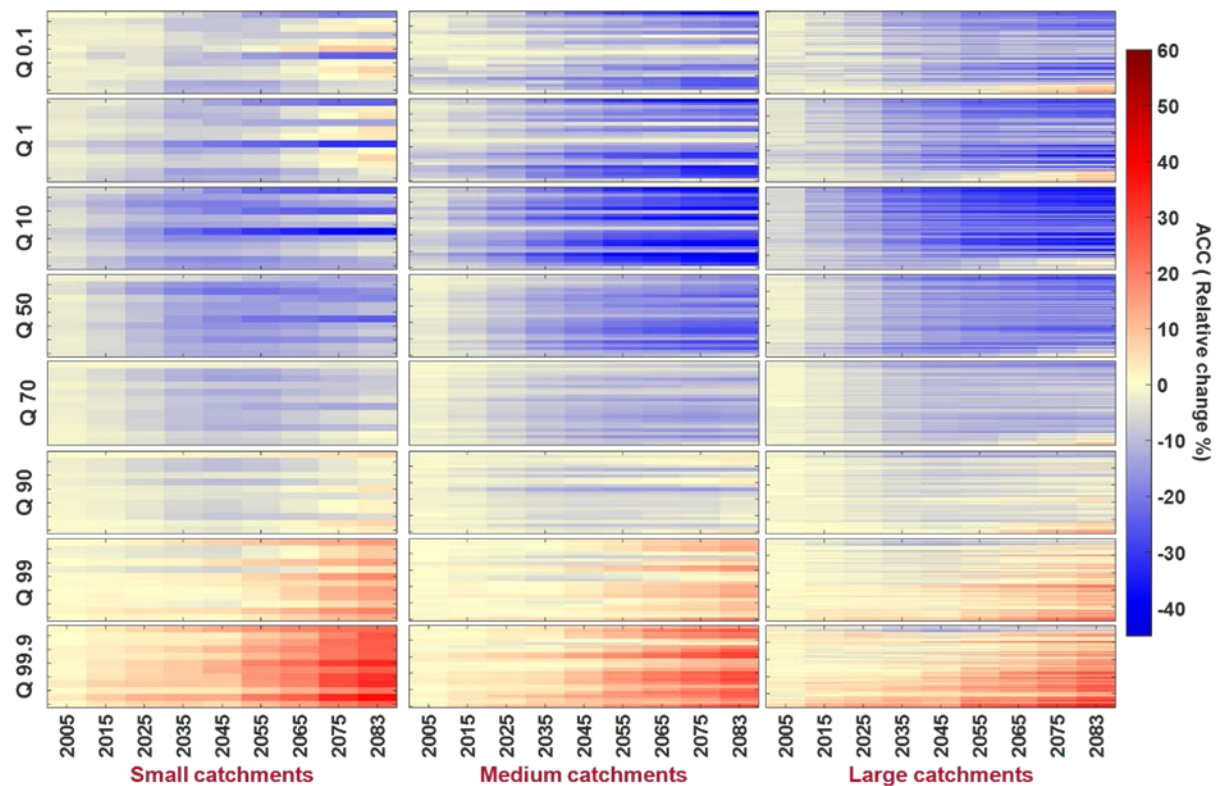
Cette section présente la dernière partie des travaux de la Thèse de doctorat de Mina Faghih. L'Annexe A fournit une liste de liens vers les travaux plus détaillés décrits dans cette section. L'incertitude quant aux impacts futurs du changement climatique représente un obstacle important à la mise en œuvre de mesures d'adaptation. Cette partie de travail quantifie l'impact de la variabilité climatique interne sur les projections de débit pour 133 bassins versants de l'est et du nord-est des États-Unis. Les résultats montrent que dans un climat plus chaud, les quantiles inférieurs et moyens du débit futur diminueront systématiquement, tandis que les quantiles supérieurs augmenteront. Les augmentations sont les plus importantes pour les débits les plus extrêmes. En utilisant trois approches différentes, le rôle de la variabilité interne est étudié pour

estimer le temps d'émergence (TOE). Dans ce cas, les résultats montrent que le signal de changement climatique des inondations et sécheresses extrêmes émerge plus tard que celui des quantiles de débit médian, même si les changements pour les inondations comme pour les sécheresses sont plus importants. Il existe une relation claire entre la taille du bassin versant et le TOE, les petits bassins versants voyant un TOE plus précoce pour les inondations, et plus tardif pour les sécheresses. Ces résultats donnent un aperçu des temps d'adaptation pour les bassins versants de petite à grande taille.

Des résultats succincts sont présentés ici. Les résultats détaillés sont présentés dans les documents référencés à l'Annexe A.

La figure 4.4.1 présente le signal projeté du changement climatique anthropique (ACC) sur 8 quantiles différents de la distribution du débit (Q0.1, Q1, Q10, Q50, Q70, Q90, Q99 et Q99.9). La figure est une carte thermique de la différence d'époque moyenne de l'ensemble (entre neuf périodes futures de 30 ans et la période historique 1981-2010) pour les trois classes de taille de bassin versant (colonnes 1 à 3). Les changements sont présentés sous leur forme relative (%) pour tenir compte de la large gamme d'amplitude de débit entre les bassins versants. Les bassins versants sont classés par latitude sur l'axe des ordonnées.

Le même modèle général de changement est observé pour les trois classes de taille. Des diminutions de débit sont prévues pour la plupart des quantiles étudiés alors que des augmentations sont prévues pour les plus grands. C'est au 90ème quantile que la transition entre les diminutions et les augmentations semble se produire. Les diminutions les plus importantes (jusqu'à 40%) sont observées dans les bassins versants moyens et grands, tandis que les augmentations les plus importantes (jusqu'à 40%) sont prévues pour la classe de taille inférieure. Les augmentations de débit projetées pour les grands quantiles deviennent systématiquement plus importantes pour les horizons plus éloignés, comme c'est généralement le cas dans les études d'impact. C'est également le cas pour la diminution du débit pour les bassins versants moyens et grands. L'image est plus complexe pour la classe des petites tailles, où des débits décroissants sont projetés jusqu'en 2050, suivis d'une inversion de tendance pour les quantiles inférieurs. L'impact de la latitude ne se manifeste que pour les grands bassins versants, les bassins versants méridionaux connaissant une augmentation plus importante pour les grands quantiles, et même quelques augmentations modestes pour les quantiles inférieurs.



**Figure 4.4.1** Impact projeté du changement climatique anthropique pour différents quantiles de la distribution des débits (Q0.1, Q1, Q10, Q50, Q70, Q90, Q99 et Q99.9) Le changement est présenté comme la différence moyenne d'ensemble entre 9 périodes futures et la période de référence 1981-2010. Les trois colonnes correspondent à trois classes de taille de bassin versant : petit (à gauche), moyen (au milieu) et grand (à droite). Les bassins versants sont classés par leur latitude sur l'axe des ordonnées.

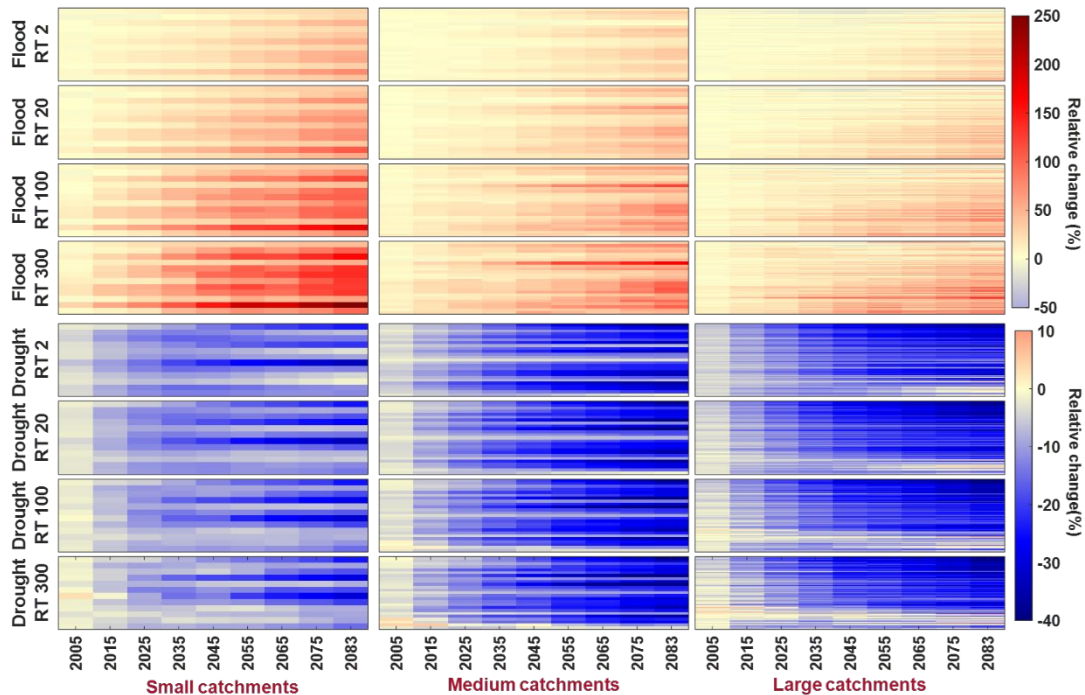
À la lumière des différents comportements entre les débits faibles et élevés, la figure 4.4.2 explore les deux queues de la distribution des débits en examinant les inondations et les sécheresses, avec une période de retour de 2, 20, 100 et 300 ans. La Figure 4.4.2 suit le même format que la précédente.

Trois caractéristiques principales peuvent être notées sur cette Figure.

Premièrement, il y a une augmentation générale de l'intensité des inondations et des sécheresses jusqu'à la fin du siècle, indépendamment de la taille du bassin versant et de la période de retour (dans chacun des 24 panneaux, les couleurs deviennent plus foncées de gauche à droite).

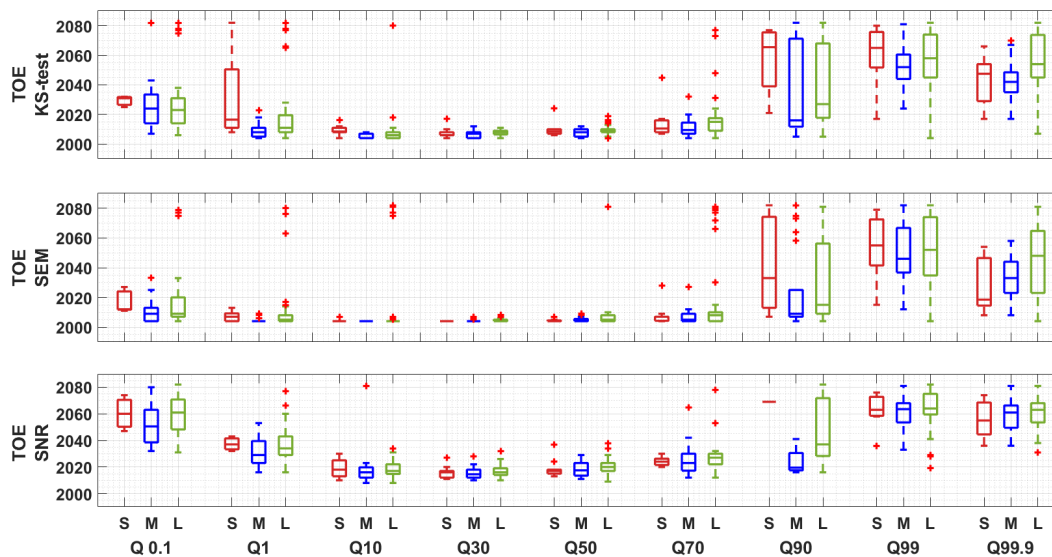
Deuxièmement, la taille du bassin versant a un impact important sur l'augmentation prévue des inondations, les petits bassins versants connaissant une augmentation beaucoup plus importante que les bassins versants moyens et grands. Pour les sécheresses, la situation est inversée, les petits bassins versants connaissant une baisse moins importante que les deux autres groupes.

Troisièmement, les augmentations attendues des inondations sont clairement corrélées avec la période de retour des inondations, les périodes de retour les plus longues connaissant les plus fortes augmentations. Pour les sécheresses, les diminutions de débit sont très similaires pour les 4 périodes de retour.



**Figure 4.4.2** Impact projeté du changement climatique anthropique pour les débits extrêmes élevés et faibles avec des périodes de retour de 2, 20, 100 et 300 ans. Le changement est présenté comme la différence moyenne d'ensemble entre 9 périodes futures et la période de référence 1981-2010. Les trois colonnes correspondent à trois classes de taille de bassin versant : petit (à gauche), moyen (au milieu) et grand (à droite). Les bassins versants sont classés par leur latitude sur l'axe des ordonnées.

La Figure 4.4.3 présente le temps d'émergence prévu pour les 8 quantiles de la figure 4.4.1 (Q0,1, Q1, Q10, Q50, Q70, Q90, Q99 et Q99,9). La Figure 4.4.3 montre des diagrammes en boîte du temps d'émergence pour les mêmes quantiles. Plusieurs observations peuvent être faites à partir de ces graphiques : 1-Les quantiles centraux (Q10 à Q70) sont ceux dont les temps d'émergence sont les plus précoces. 2-Les quantiles haut et bas présentent des temps d'émergence beaucoup plus tardifs, bien que cela change avec le quantile 99,9, et surtout pour les petits bassins versants. 3-Les petits bassins versants se distinguent par une gamme plus étroite de quantiles montrant des périodes d'émergence précoce, et un nombre beaucoup plus important de quantiles sans émergence à la fin du siècle. 4- Les approches KS-test et SEM projettent des temps d'émergence extrêmement similaires, alors que la méthode SNR donne des temps d'émergence beaucoup plus tardifs. 5- Les temps d'émergence projetés sont plus précoces pour les moyens et grands bassins versants, à l'exception du quantile 99,9, qui voit des temps plus précoces pour les petits bassins versants.

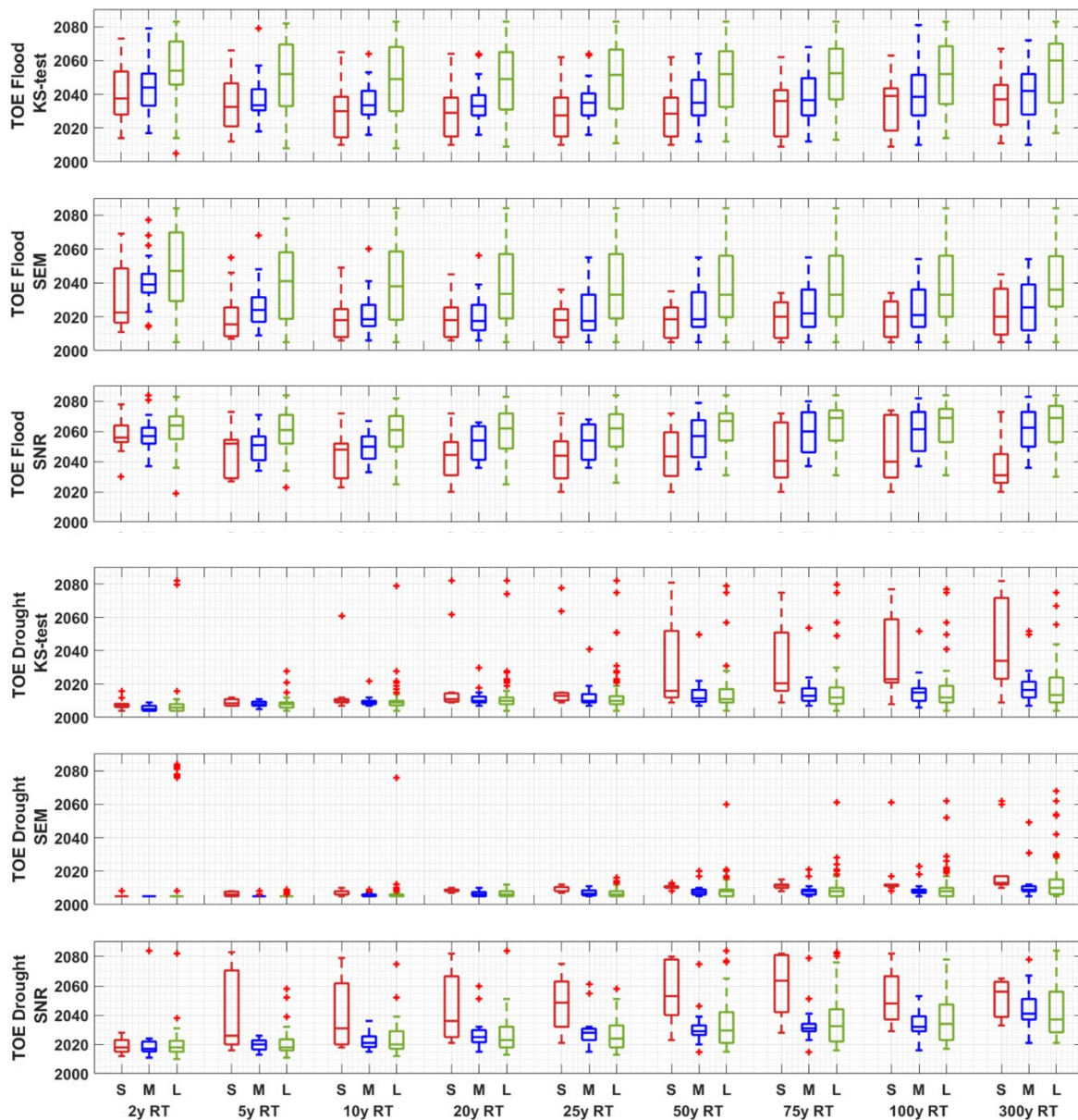


**Figure 4.4.3** Diagrammes en boîte du temps d'émergence pour neuf quantiles de débit (Q 0,1, Q1, Q10, Q30, Q50, Q70, Q90, Q99 et Q99,9). Les trois rangées correspondent aux trois différentes approches utilisées pour estimer le temps d'émergence - test de KS, erreur standard de la moyenne (SME) (Leng et al.), rapport signal/bruit (SNR). Les plus petits bassins versants sont en rouge, les moyens en noir, et les plus grands en bleu. Chaque boxplot représente la distribution des quantiles TOE pour tous les bassins dans chaque classe de taille.

Les quantiles élevés des temps d'émergence plus précoces pour les bassins versants plus petits sont explorés plus en détail dans la Figures 4.4.4 en examinant les inondations extrêmes avec des périodes de retour allant de 2 à 300 ans.

Cette figure suit le format de la Figure 4.4.3. En plus des inondations (trois rangées supérieures), cette Figure montre également les sécheresses avec des périodes de retour allant de 2 à 300 ans. Les résultats montrent que la taille du bassin versant a un impact clair sur le temps d'émergence des inondations, les petits bassins versants ayant un temps d'émergence systématiquement plus précoce que les bassins versants moyens et grands. Les temps d'émergence sont relativement similaires pour toutes les périodes de retour, à l'exception de la crue biannuelle, qui a un temps d'émergence plus tardif. Une fois encore, les approches KS-test et SEM prévoient des temps d'émergence extrêmement similaires, tandis que la méthode SNR donne des temps d'émergence beaucoup plus tardifs.

Les résultats pour les sécheresses montrent un moment précoce d'émergence dans la plupart des cas, bien que cela devienne progressivement plus tardif pour les périodes de retour de sécheresse plus importantes. Dans l'ensemble, la taille du bassin versant a une fois de plus un fort impact sur le moment de l'émergence des sécheresses extrêmes, les bassins versants plus petits voyant un moment d'émergence plus tardif, ce qui est l'opposé de ce qui a été observé pour les inondations.



**Figure 4.4.4** Diagrammes en boîte du temps d'émergence pour les débits extrêmes élevés (trois rangées supérieures) et faibles (trois rangées inférieures) avec des périodes de retour comprises entre 2 et 300 ans. Pour les inondations et les sécheresses, les trois lignes correspondent aux trois différentes approches utilisées pour estimer le temps d'émergence - test KS, erreur standard de la moyenne (Leng et al.), rapport signal/bruit (SNR). Les plus petits bassins versants sont en rouge, les moyens en noir, et les plus grands en bleu. Chaque box plot représente la distribution du TOE des périodes de retour inondation/sécheresse pour tous les bassins versants dans chaque classe de taille.

## - DISCUSSION ET CONCLUSION

Cette section couvre les éléments les plus importants de chacune des sections présentées ici-haut et y incorpore les conclusions principales.

Par rapport à la section 4.1 :

Le modèle climatique régional ClimEX simule un cycle diurne de température très réaliste, mais avec des biais de timing et d'amplitude. Il y a cependant de grandes différences entre les cycles diurnes des précipitations simulés et observés. Ces différences résultent d'une combinaison d'erreurs d'observation, de la variabilité interne des précipitations et d'une représentation inadéquate des processus physiques conduisant aux précipitations par le modèle climatique. Ces biais ont été corrigés avec succès en utilisant une méthode de cartographie multivariée par quantile. L'impact de la correction (ou non) du cycle diurne des précipitations et de la température a été évalué sur de petits (<500 km<sup>2</sup>), moyens et grands (>1000 km<sup>2</sup>) bassins versants. Les résultats indiquent que la correction du cycle diurne permet une meilleure simulation du débit, en particulier pour les petits bassins versants, qui ont un temps de réponse infra-quotidien. Pour les petits bassins versants, l'erreur relative entre les quantiles de débit observés et simulés a été réduite. Par exemple, la réduction médiane était de 5 % pour les 95e et 99e quantiles, et de 4 % pour la valeur médiane de la crue de 20 ans pour tous les petits bassins versants. Pour les bassins versants plus grands, la correction des biais du cycle diurne n'entraîne que des améliorations mineures du débit.

Malgré les grandes différences dans les cycles diurnes des précipitations observées et simulées, et les limites des modèles climatiques dans la génération de précipitations avec une convection paramétrée, nous recommandons néanmoins de corriger le cycle diurne de la température et des précipitations lors de la réalisation d'études d'impact du changement climatique sur les petits bassins versants au pas de temps infra-quotidien.

Les travaux sur la sélection de sous-ensembles de modèles climatiques (section 4.2) a permis de mettre sur pied une méthodologie permettant un pas dans la compréhension des relations complexes entre les indicateurs climatiques et les événements hydrologiques. Cette meilleure compréhension permet de sélectionner des membres climatiques afin de réaliser des études d'impact de changements climatiques de façon efficace. La méthodologie permet, pour certains indicateurs hydrologiques, de sélectionner des membres climatiques spécifiques pour alimenter le processus de la modélisation hydrologique en classant les simulations climatiques selon l'indicateur climatique « meilleur prédicteur », identifié dans ces travaux, et de sélectionner des membres à intervalles réguliers dans ce classement. Il serait donc possible, pour les indicateurs hydrologiques les plus corrélés aux indicateurs climatiques, d'effectuer une sélection restreinte de simulations climatiques et tout de même obtenir une distribution de cet indice hydrologique qui serait similaire à ce qui aurait été obtenu en utilisant l'ensemble des simulations disponibles.

Cependant, ces démarches devraient être appliquées pour chaque indicateur hydrologique de manière indépendante puisque le meilleur prédicteur dépend de l'indicateur hydrologique à modéliser. De plus, le choix du modèle hydrologique ajoute une grande incertitude dans le processus, donc l'applicabilité de ces méthodes dans un cas réel demeure théorique pour le moment.

Il apparaît donc très difficile de penser qu'il sera possible un jour de sélectionner un sous-ensemble de simulations climatiques qui pourra systématiquement bien représenter la distribution

de métriques hydrologiques de manière acceptable. La représentation adéquate de la distribution future des métriques hydrologiques passe donc par l'utilisation du plus grand nombre possible de simulations climatiques.

Ce projet a systématiquement étudié les impacts de faire de la modélisation hydrologique sous-journalière, à la fois avec des modèles globaux et distribués (Section 4.3).

Les travaux avec un modèle global ont permis de faire ressortir les points suivants :

- L'utilisation d'un pas de temps de simulation plus court a systématiquement amélioré la simulation des débits de pointe pour les 6 classes de taille de bassins versants utilisés ;
- Un rendement rapidement décroissant de l'utilisation d'un pas de temps plus petit a été observé pour les classes de taille plus importantes. Le passage d'un pas de temps de 24 heures à un pas de temps de 8 heures a donné des résultats satisfaisants pour les plus grands bassins versants
- La plus petite classe de taille (< 500km<sup>2</sup>) a bénéficié le plus d'un pas de temps plus petit jusqu'à 1 heure, suggérant qu'un pas de temps encore plus petit pourrait être bénéfique;
- Le biais de simulation (différence dans le débit moyen) a été systématiquement réduit en utilisant un pas de temps plus petit pour toutes les classes de taille.

Ces résultats suggèrent fortement que l'utilisation d'un pas de temps aussi petit que possible est bénéfique, à condition que des données d'entrée et des capacités de calcul adéquates soient disponibles.

Pour les modèles distribués, les points suivants peuvent être notés :

- Il n'y a pas de lien systématique entre la taille du bassin versant et l'incertitude correspondant à la simulation du débit. Il est intéressant de noter que les bassins versants de petite taille génèrent de plus grandes incertitudes et de plus grandes variabilités dans l'efficacité de la modélisation ce qui réfute l'hypothèse selon laquelle le changement de résolution spatiale affecte principalement les grands bassins versants.
- La résolution temporelle ne joue qu'un rôle mineur dans la détermination de l'incertitude liée à la résolution spatiale. WaSiM et Hydrotel2 ont montré qu'un pas de temps de 3 heures pouvait augmenter modérément les limites d'incertitude des simulations pour la plupart des bassins versants.
- La structure du modèle est un facteur important de l'incertitude liée à la résolution spatiale des simulations. WaSiM a démontré une sensibilité aux changements de la résolution spatio-temporelle des simulations. Ceci était attendu, étant donné que le modèle résout les équations de Richards pour chaque cellule de grille, associée à des descripteurs spécifiques. La conceptualisation de l'infiltration, de la percolation et de l'eau souterraine d'Hydrotel et des eaux souterraines est moins basée sur la physique. Dans sa configuration par défaut, cette conceptualisation ne peut pas capturer adéquatement l'incertitude liée à la discrétisation spatiale, à moins qu'un changement ne soit imposé en modifiant le nombre de UHRHs.
- La tentative de séparation de l'incertitude spatio-temporelle totale en une partie attribuable aux descripteurs et une partie attribuable aux paramètres de calibration a montré que cette dernière est la contributrice dominante pour la plupart des bassins.



Sur l'impact de la résolution spatio-temporelles sur les projections futures des débits :

- Le choix du pas de temps de simulation est un déterminant important de la variabilité des projections futures des inondations, et ce même pour les petits bassins versants.
- Pour les bassins versants plus grands, la résolution spatiale ET la résolution temporelle impactent la variabilité des projections des crues futures.
- Pour les petits bassins versant, une modélisation au pas de temps de 24 heures peut résulter en une inversion des tendances des projections.
- En terme d'incertitude des projections futures des crues, le choix du modèle hydrologique est important pour toutes les tailles de bassins, mais demeure plus important pour les grands bassins versants.

Les travaux effectués le modèle global GR4J ont permis de faire l'étude de l'amplifications des crues extrêmes sur des bassins versants de différentes tailles. Les points suivants peuvent être notés :

- Une augmentation des précipitations extrêmes entre la période de référence et la période future est observée dans tous les bassins versants, pour toutes les durées et périodes de retour. L'augmentation devient progressivement plus importante pour les durées plus courtes et les périodes de retour plus importantes pour tous les bassins versants, ce qui confirme les résultats d'études récentes basées sur des modèles climatiques régionaux et sur des observations.
- L'augmentation des précipitations extrêmes est la plus importante dans les petits bassins versants, ce qui indique que les changements futurs des précipitations extrêmes dépendent aussi fortement de l'échelle spatiale des tempêtes futures.
- Le schéma d'augmentation des débits extrêmes futurs est très similaire à celui des précipitations extrêmes futures. Les augmentations les plus importantes pour les futures inondations extrêmes sont observées sur les plus petits bassins versants, sur des durées plus courtes et des périodes de retour plus importantes. Les augmentations relatives sont plus importantes pour le débit que pour les précipitations. La durée des précipitations extrêmes semble être le facteur le plus important dans l'amplification des événements extrêmes futurs. Dans l'ensemble, les résultats présentés dans cette étude indiquent que les changements futurs prévus dans les précipitations extrêmes affecteront de manière disproportionnée les petits bassins versants, et en particulier les zones urbaines, où les critères de conception de la gestion des inondations sont basés sur des précipitations de courte durée et de grande période de retour.

Finalement, ce qui a trait à l'impact de la variabilité naturelle sur la détection des tendances des données de débit, on peut noter les points suivants (Section 4.4) :

- La plupart des bassins versants verront une diminution des débits futurs pour tous les quantiles jusqu'au quantile Q90, alors que des augmentations sont prévues pour les quantiles les plus élevés (au-dessus de Q90, et surtout pour Q99 et Q99.9). Ces conclusions s'appliquent aux trois classes de bassins versants, bien que les diminutions les plus importantes soient observées pour les bassins versants moyens et grands, tandis que les augmentations les plus importantes sont prévues pour les petits bassins versants.

- L'intensité des inondations et des sécheresses augmentera systématiquement jusqu'à la fin du siècle. La taille des bassins versants a un impact significatif sur les augmentations projetées des signaux d'inondation et de sécheresse, les petits bassins versants connaissant des augmentations d'inondation significativement plus importantes que les autres. Inversement, ils connaîtront une augmentation plus faible des sécheresses extrêmes sévères.
- Les projections futures de toutes les variables hydrologiques, au moins jusqu'au milieu du siècle, sont significativement influencées par la variabilité naturelle du climat. En général, le rapport signal/bruit des quantiles augmente avec le temps, du futur proche au futur lointain. Cela s'explique par le fait que le signal du changement climatique est amplifié dans un climat plus chaud.
- Le temps d'émergence le plus rapide est observé pour les quantiles centraux (Q10 à Q70), et a été atteint au début du siècle actuel pour la majorité des bassins versants. Le moment d'émergence des quantiles supérieurs et inférieurs devrait être plus tardif, vers le milieu du siècle actuel dans la plupart des cas, et même vers la fin du siècle et le début du siècle suivant pour les petits bassins versants.
- Le moment de l'émergence du signal des inondations et des sécheresses extrêmes est fortement influencé par la taille du bassin versant. Le signal pour les inondations extrêmes apparaît clairement plus tôt pour les grands bassins, alors que le contraire est observé pour les sécheresses extrêmes. Le moment de l'émergence apparaît plus tôt pour les sécheresses, malgré le fait que le signal du changement climatique soit plus significatif pour les inondations extrêmes, surtout dans les petits bassins versants.
- Les résultats montrent que la variabilité interne et le signal de changement climatique ont des impacts qui dépendent de la taille du bassin versant, ce qui se traduit également par une dépendance du temps d'émergence à la taille du bassin versant.

## RÉFÉRENCES

---

Les références présentées dans le texte se retrouvent toutes dans les documents référencés à l'Annexe A.

# ANNEXES

---

## **ANNEXE A – LISTE DES CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES DÉCOULANT DIRECTEMENT DU PROJET (MÉMOIRES, THÈSES, CONFÉRENCES ET ARTICLES SCIENTIFIQUES) ET LIENS MENANT VERS L'ACCÈS AU DOCUMENTS**

### **Thèses:**

Faghih, M., Amplification of extreme precipitation and streamflow in a warmer climate: impact of catchment size and internal variability. Thèse de doctorat en génie, École de technologie supérieure – Mars 2023. Note : soutenance cédulée pour le 24 mai 2023.

[https://www.dropbox.com/s/rzyursxx9qlmt33/Faghih\\_Mina\\_FAGM21598505\\_EVALUATION\\_1.pdf?dl=0](https://www.dropbox.com/s/rzyursxx9qlmt33/Faghih_Mina_FAGM21598505_EVALUATION_1.pdf?dl=0)

Markhali, S.P., Multi-Scale Streamflow Simulation. Thèse de doctorat en génie, École de technologie supérieure – Janvier 2023. Soutenue en Avril 2023.

[https://www.dropbox.com/s/5ehezfpazuznm0/Pouryousefi\\_Markhali\\_Siavash\\_POUS13098609\\_EVALUATION\\_1.pdf?dl=0](https://www.dropbox.com/s/5ehezfpazuznm0/Pouryousefi_Markhali_Siavash_POUS13098609_EVALUATION_1.pdf?dl=0)

### **Mémoires:**

Sabeti, P., Optimal temporal resolution for hydrological modeling studies . Mémoire de Maîtrise en génie de la construction, École de technologie supérieure (Décembre 2022)

<https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/3174/>

Bégin, A.-M. Évaluation du cycle journalier du grand ensemble ClimEX. Mémoire de Maîtrise en Sciences de l'atmosphère, UQAM (mars 2021)

<https://archipel.uqam.ca/14867/>

Vandal, M., Méthodes d'identification de membres issus d'ensembles de modélisations climatiques pour la modélisation représentative et parcimonieuse d'indicateurs hydrologiques. Mémoire de Maîtrise en génie de la construction, École de technologie supérieure (Septembre 2020)

<https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2628/>

### **Articles de recherche:**

Markhali, S. P., Poulin, A., & Boucher, M. A. (2022). Spatio-temporal discretization uncertainty of distributed hydrological models. *Hydrological Processes*, 36(6), e14635.

[https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.14635?casa\\_token=VYgKKcjTT1wAAAAA:L\\_UchICA30B-0gqRG5dqeibwC5aGGmzpZfUrnXIUP9-rBq04FRll1JrBRsSoPqHZ5Ka3U3nScOn9Xm5E](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.14635?casa_token=VYgKKcjTT1wAAAAA:L_UchICA30B-0gqRG5dqeibwC5aGGmzpZfUrnXIUP9-rBq04FRll1JrBRsSoPqHZ5Ka3U3nScOn9Xm5E)

Faghih, M., Brissette, F., & Sabeti, P. (2022). Impact of correcting sub-daily climate model biases for hydrological studies. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26(6), 1545-1563.

<https://hess.copernicus.org/articles/26/1545/2022/>

Sabeti, P., and Brissette, F. (2022). Optimal temporal resolution for hydrological modeling simulations. *Journal of Hydrological Engineering* (submitted)

[Voir chapitre 3 du mémoire de Parham Sabeti.](#)

Markhali, S. P., Poulin, A., & Boucher, M. A. (2022). Multi-scale flood simulations under climate change scenarios. *Water Resources Research* (soumis)

[Voir chapitre 4 de la Thèse de M.Markhali.](#)

Markhali, S. P., Boucher, M. A. & Poulin, A. (2022). Regionalization of a distributed hydrology model using random forest (soumis)

[Voir chapitre 5 de la Thèse de M.Markhali.](#)

Faghih, M., Brissette, F., & Martel, J.L. (2022). Temporal and spatial amplification of extreme rainfall and extreme floods in a warmer climate. *Journal of Hydrometeorology* (acceptation finale pour publication, Mai 2023)

[Voir chapitre 4 de la Thèse de Mme Faghiq en attendant la disponibilité sur le site du Journal of Hydrometeorology.](#)

Faghih, M., Brissette, F. (2022). Impact of internal variability on the detection of the climate change signal for streamflow extremes. *Journal of Hydrology*. Accepté avec révision mineures, Mai 2023.

[Voir chapitre 5 de la Thèse de Mme Faghiq en attendant la disponibilité sur le site du Journal of Hydrology.](#)

## **Présentations/posters:**

Pouryousefi-Markhali, S., Poulin, A., & Boucher, M. A. (2022). Regionalization of a Distributed Hydrology Model Using Random Forest (No. EGU22-10239). Copernicus Meetings.

<https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU22/EGU22-10239.html>

Faghih, M., & Brissette, F. (2022). Should we correct biases in the diurnal cycle of climate model for hydrological studies? (No. EGU22-1393). Copernicus Meetings.

<https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU22/EGU22-1393.html>

Faghih, M., Brissette, F., Sabeti, P., & Tarek, M. (2021, April). Using a high-resolution regional climate model large ensemble to simulate the impact of extreme precipitation on flooding over small to medium-size catchments. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (pp. EGU21-10249).

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021EGUGA..2310249F/abstract>

Bégin, A.-M., M. Leduc and A. Poulin: Evaluation of the daily cycle in the simulations of the ClimEX large-ensemble. *EGU General Assembly 2021* (virtual), 19-30 April 2021.

<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2021EGUGA..2312097B/abstract>

Pouryousefi-Markhali, S., Poulin, A., & Boucher, M. A. (2021). Analyzing the Effects of Spatio-Temporal Discretization on Hydrological Response of Natural Catchments. CWRA Annual Meeting.

Bégin, A.-M., M. Leduc et A. Poulin: Évaluation du cycle journalier dans les simulations du grand ensemble ClimEX. 8e symposium Ouranos, Québec/Virtuel, 28 octobre 2020.

Brissette, F., Faghih, M., Sabeti, P., Tareq, M. Modéliser les impacts du changement climatique sur l'hydrologie au pas de temps sous-journalier – défis et opportunités. 8ième Symposium Ouranos, 26 octobre au 6 novembre 2020.

Vandal, M., Arsenault, R. et Huard, D. (2019). Sélection optimale de sous-ensembles de projections climatiques en contexte de modélisation hydrologique. Journée québécoise des étudiants CentEau, Université Laval, Québec. 22 mars 2019.

Pouryousefi-Markhali, S., Poulin, A., & Boucher, M. A. (2019). Application of Distributed Hydrologic Model on a Small-Scale Watershed Located in Quebec. Journée Québécoise étudiante CentEau 2019.

Brissette, F.P., Zhao, C., Martel, J.L., Chen, J., Mailhot, A. & Arsenault, R., (2019) Using climate model large ensembles to study extreme hydrometeorological events in a changed climate. The International Symposium of Hydrological Sciences and Water Resources Utilization under the Changing Environment. Wuhan, China, October 24-26.

Brissette F, Martel JL, Bertrand V, Vandal M, Arsenault R. (2018). Recent trends in precipitation, temperature and streamflow extremes - from gauges to reanalysis to climate models - impact of spatial scale. 8th GEWEX Science Conference, Canmore, Canada



550 SHERBROOKE OUEST, TOUR OUEST, 19<sup>e</sup> ÉTAGE, MONTRÉAL, QC, CANADA, H3A 1B9 | TÉLÉPHONE 514 282.6464 | TÉLÉCOPIEUR 514 282.7131 | [WWW.OURANOS.CA](http://WWW.OURANOS.CA)

