

Étude de l'incertitude liée à la modélisation de  
l'évapotranspiration potentielle dans les études d'impact des  
changements climatiques sur les ressources en eau au Canada,  
aux États-Unis et au Mexique

par

Gabrielle DALLAIRE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE  
LA MAÎTRISE AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION  
M. Sc. A.

MONTREAL, LE 24 AVRIL 2019

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Gabrielle Dallaire 2019



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

**PRÉSENTATION DU JURY**  
**CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ**  
**PAR UN JURY COMPOSÉ DE :**

Mme Annie Poulin, directrice de mémoire  
Département du génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Richard Arsenault, codirecteur de mémoire  
Département du génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. François Brissette, président du jury  
Département du génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Diane Chaumont, examinatrice externe  
Ouranos - Consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques

**IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC**

**LE 1<sup>E</sup> AVRIL 2019**

**À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE**



## REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a été réalisé grâce à l'implication et au soutien de plusieurs personnes et organisations. Un gros merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin. Je tiens à remercier personnellement quelques personnes essentielles à la réussite de ce projet.

Tout d'abord, je tiens à remercier ma directrice de recherche, Annie Poulin, pour sa confiance depuis notre première rencontre. Je suis reconnaissante d'être venue vivre cette expérience à Montréal sous ta direction. Merci pour ta patience, ton encadrement, ton écoute et tes judicieux conseils. Ton expérience m'a permis de développer mon esprit d'analyse et ma capacité à surmonter les défis. Je suis choyée d'avoir croisé ton chemin en tant qu'étudiante.

Merci à mon co-directeur, Richard Arsenault, pour ton implication dans mon projet de recherche. Je tiens à te remercier pour le temps que tu as pris pour répondre à mes questionnements, m'expliquer et discuter. Tu as réussi à me partager ta passion pour ce domaine. Merci de m'avoir poussée à dépasser mes limites et à croire en mes capacités.

Je veux aussi remercier le professeur François Brissette pour m'avoir pris sous ton aile pendant quelques temps. Merci d'avoir pris le temps de me remettre en question et de me conseiller. Ce fût une belle opportunité de travailler avec toi.

Un gros merci aux étudiants du DRAME pour vos sourires, vos trucs et vos discussions. Je tiens à remercier particulièrement Virginie, Mariana et Jean-Luc pour votre partage de connaissances avec moi ainsi que vos réponses à mes innombrables questionnements. Également, un merci spécial à Magali pour sa participation morale et son énergie.

Je tiens aussi à remercier les partenaires du projet de collaboration entre le Québec et le Mexique. De plus, merci aux participants de la mission au Mexique pour la belle expérience. Un merci tout spécial à Diane Chaumont et à Dominique Paquin du Consortium Ouranos

## VI

pour votre intérêt et vos précieux partages lors de nos rencontres. Vous avez été d'une grande aide, en particulier pour la partie climatique de mon projet.

Merci à l'École de technologie supérieure (ÉTS) et au Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) pour le financement qui m'a permis de me consacrer pleinement à mon projet de recherche.

Je désire aussi remercier ma famille et mes amis pour votre support tout au long de ma maîtrise. Un énorme merci à mes parents et ma petite sœur pour votre présence et votre réconfort en toutes circonstances, malgré la distance. Merci de croire en moi, d'accepter mes choix ainsi que de m'encourager dans mes études.

Finalement, merci infiniment à mon amoureux, Maxim. Merci de croire en moi (même lorsque je n'y crois plus), d'être patient et compréhensif avec moi. Je te suis extrêmement reconnaissante pour les encouragements, la motivation, la confiance et le soutien que tu m'as fournis. Merci beaucoup de me laisser faire ce que j'aime et de m'aimer ainsi !

# **Étude de l'incertitude liée à la modélisation de l'évapotranspiration potentielle dans les études d'impact des changements climatiques sur les ressources en eau au Canada, aux États-Unis et au Mexique**

Gabrielle DALLAIRE

## **RÉSUMÉ**

En contexte de changements climatiques, des périodes d'étiage plus sévères et prolongées sont à prévoir, ce qui aura des répercussions sur la quantité et la qualité de l'eau. L'évapotranspiration est un processus important dans le cycle de l'eau et est particulièrement significatif en période d'étiage. Il est donc important d'étudier la qualité de la modélisation de l'évapotranspiration dans la chaîne de modélisation hydroclimatique afin de mieux comprendre les impacts associés aux changements climatiques sur la disponibilité en eau. Comme l'évapotranspiration est un processus plutôt difficile et coûteux à mesurer, des formules sont utilisées pour déterminer l'évapotranspiration potentielle (ETP), soit la quantité d'eau maximale pouvant être évaporée ou transpirée sans aucun facteur limitant. Ainsi, l'objectif de ce projet est de déterminer la contribution de la formulation d'ETP dans l'enveloppe d'incertitude de la chaîne de modélisation hydroclimatique en contexte de changements climatiques. Onze formules d'ETP simples qui nécessitent uniquement les températures minimales et maximales ainsi que la latitude du bassin versant sont utilisées. Ces formules sont appliquées sur 2080 bassins versants situés en Amérique du Nord (235 au Canada, 1825 aux États-Unis et 20 au Mexique). Puisque l'ETP est directement liée aux conditions climatiques, l'utilisation d'une grande quantité de bassins versants couvrant plusieurs zones climatiques permet d'augmenter la robustesse des conclusions obtenues. Trois modèles hydrologiques globaux (GR4J, HMETs et Mohyse), calibrés selon le critère de Nash-Sutcliffe, sont utilisés pour la modélisation hydrologique des bassins versants. Par la suite, l'étude de transférabilité dans des conditions futures est réalisée à l'aide de simulations issues de huit modèles climatiques et suivant deux scénarios différents d'émission de gaz à effet de serre. Les sorties des simulations (précipitations et températures) sont post-traitées selon deux méthodes de correction de biais, avant leur introduction au sein des trois modèles hydrologiques. La contribution de l'ETP dans la chaîne de modélisation globale en changements climatiques ainsi que l'incertitude qui y est associée, peuvent alors être estimées, entre autres par analyse de décomposition de la variance. De plus, l'analyse de différents indices d'étiage permet d'étudier l'impact des changements climatiques selon les différentes formulations d'ETP. Par exemple, les valeurs des débits d'étiage sur une période de plusieurs jours consécutifs pour une période de récurrence sont comparées afin de voir si les changements d'ETP ont des répercussions sur les étiages. Les résultats montrent que l'augmentation de l'ETP et la diminution des débits d'étiage sont différentes selon les zones climatiques. Malgré une grande variabilité entre les différentes formulations d'ETP, les résultats démontrent des tendances similaires en changements climatiques. Ce projet montre aussi que certaines formules spécifiques ne s'adaptent pas bien au climat futur. Il résulte de ce projet une meilleure compréhension et une amélioration des connaissances de l'impact du choix de la formulation d'ETP dans la chaîne de modélisation hydroclimatique en contexte de changements climatiques. Les conclusions pourront servir aux gestionnaires des

## VIII

ressources hydriques pour l'identification de mesures d'adaptation adéquates, permettant notamment de prévenir l'assèchement des sources d'approvisionnement en eau en périodes d'étiage.

**Mots clés :** évapotranspiration, modélisation hydrologique, changement climatique, étiage, incertitude

# **Investigating the Uncertainty of Potential Evapotranspiration Modelling in Climate Change Impact Studies on Water Ressources in Canada, United States and Mexico**

Gabrielle DALLAIRE

## **ABSTRACT**

In the context of climate change, more severe and extended periods of low flows are expected, which will affect the quantity and quality of water sources. Evapotranspiration is an important process in the water cycle and is particularly significant during low-flow events. Therefore, it is important to study the effects of uncertainty in evapotranspiration modelling in the hydroclimatic modelling chain to understand the impacts of climate change on the water availability. As evapotranspiration is a rather hard and expensive process to measure, formulas are used to determine potential evapotranspiration (PET), which is the maximum water quantity that can be evaporated and transpired without any limiting factors. The objective is to determine the contribution of PET formulas to uncertainty in the full modelling chain in the context of climate change. Eleven simple PET formulas that only require minimum and maximum temperatures as well as the latitude are used. These formulas are applied to 2080 watersheds in North America (235 in Canada, 1825 in United States, and 20 in Mexico). As PET is directly related to climatic conditions, studying a large quantity of watersheds that cover many climatic zones increases the robustness of the conclusions. Three global hydrological models (GR4J, HMETs and Mohyse) calibrated with the Nash-Sutcliffe criterion are employed for the hydrologic modelling aspect of the work. Subsequently, the study of transferability under future climate is conducted with simulations from eight climate models and two different greenhouse gas emission scenarios. These simulations outputs (precipitations and temperatures) are post processed with two bias correction methods and are then introduced into the three hydrological models. The PET contribution in the global modelling chain in climate change and its uncertainty are estimated with different analyses such as variance decomposition. The analysis of different low-flow indices allows studying the climate change trends as expressed through the PET formulas. For instance, low-flow values over a period of several consecutive days for a certain recurrence period are compared to see if changes in the PET affect low-flows. Results show that the PET increases and the low-flow decreases are different according to climatic zones. Despite a great variability between the different formulas, results show similar trends under climate change. This project also shows that some specific formulas do not adapt well to future climate. This project results in a better comprehension and an increase in knowledge regarding the impacts of the PET formula choice in hydroclimatic modelling chain under climate change. The conclusions can be used for water resources management to identify adequate adaptation measures, such as preventing the drying up of water resources during low-flow periods.

**Keywords:** evapotranspiration, hydrologic modelling, climate change, low flow, uncertainty



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	5
1.1 Évapotranspiration et changements climatiques.....	5
1.1.1 Méthodes d'estimation de l'ETP .....	6
1.1.2 ETP en climat futur.....	7
1.2 Modélisation hydrologique .....	9
1.3 Extrême hydrologique.....	10
1.4 Modélisation climatique.....	12
1.4.1 Projections climatiques .....	12
1.4.2 Post-traitement .....	14
1.5 Incertitudes en modélisation hydroclimatique .....	15
1.6 Objectifs de recherche.....	16
CHAPITRE 2 SECTEUR À L'ÉTUDE .....	19
2.1 Bassins versants et données hydrométéorologiques .....	19
2.1.1 Canada.....	20
2.1.2 États-Unis.....	21
2.1.3 Mexique .....	22
2.2 Zones climatiques .....	24
CHAPITRE 3 MÉTHODOLOGIE.....	27
3.1 Aperçu global de la méthodologie pour la modélisation des débits .....	27
3.2 Évapotranspiration potentielle .....	29
3.3 Modélisation hydrologique .....	32
3.3.1 Modèles hydrologiques.....	32
3.3.1.1 GR4J .....	33
3.3.1.2 HMETS.....	35
3.3.1.3 Mohyse.....	36
3.3.2 Calage des modèles hydrologiques.....	37
3.3.2.1 Méthode de calage .....	38
3.3.2.2 Fonction-objectif.....	40
3.3.3 Choix des bassins versants.....	40
3.4 Modélisation climatique.....	42
3.4.1 Modèles climatiques .....	42
3.4.2 Post-traitement des données climatiques .....	44
3.4.2.1 Daily Scaling (DS).....	44
3.4.2.2 Daily Biais Correction (DBC) .....	45
3.4.3 Modélisation des débits en climat futur .....	46
3.5 Métriques d'analyse.....	46
3.5.1 Évapotranspiration .....	46

3.5.2	Étiage .....	47
3.6	Analyse de décomposition de la variance .....	48
CHAPITRE 4 RÉSULTATS .....		51
4.1	Évapotranspiration .....	51
4.2	Modélisation hydrologique .....	52
4.3	Modélisation climatique .....	57
4.3.1	Test de Kruskal-Wallis .....	58
4.3.2	Impacts et tendances en climat futur .....	58
4.3.2.1	Évapotranspiration .....	59
4.3.2.2	Débits d'étiage .....	64
4.3.3	Formulation de Thornthwaite .....	68
4.4	Enveloppe d'incertitude de la modélisation hydroclimatique .....	69
4.4.1	Climat passé récent .....	70
4.4.2	Climat futur .....	72
4.4.2.1	Étude selon quatre formulations d'ETP .....	76
4.4.2.2	Étude selon différentes combinaisons de modèles hydrologiques .....	77
CHAPITRE 5 ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION .....		81
5.1	Performance de la modélisation hydrologique .....	81
5.2	Tendances futures .....	82
5.3	Formulations d'ETP .....	83
5.4	Contributions de l'ETP à l'enveloppe d'incertitude .....	84
5.5	Contributions des composantes de la chaîne de modélisation hydroclimatique à l'incertitude, par rapport aux résultats d'autres études .....	87
5.6	Zones climatiques .....	88
5.7	Limites du projet .....	91
CONCLUSION .....		95
RECOMMANDATIONS .....		97
ANNEXE I	PARAMÈTRES ET BORNES DE CALAGE .....	99
ANNEXE II	ANALYSE DES DIFFÉRENCES ENTRE LES SCÉNARIOS CLIMATIQUES SUR L'INDICE $E_{max}$ .....	103
ANNEXE III	ANALYSE DES DIFFÉRENCES ENTRE LES SCÉNARIOS CLIMATIQUES SUR LES INDICES DE DÉBITS D'ÉTIAGE (7Q2, 7Q10 ET 30Q5) .....	105
ANNEXE IV	ANALYSE DE DÉCOMPOSITION DE LA VARIANCE INCLUANT LA FORMULATION DE THORNTHTWAITE POUR LES PÉRIODES ACTUELLE ET FUTURES .....	109

ANNEXE V	ANALYSE DE DÉCOMPOSITION DE LA VARIANCE POUR L'HORIZON 2050 .....	115
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		117



## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1	Informations des bassins versants du Canada.....21
Tableau 2.2	Informations des bassins versants aux États-Unis .....22
Tableau 2.3	Informations sur les bassins versants au Mexique.....23
Tableau 2.4	Classification des climats de Köppen-Geiger .....24
Tableau 2.5	Nombre de bassins versants par zones climatiques de Köppen-Geiger.....26
Tableau 3.1	Définition des 11 formules d'ETP utilisées dans le cadre de ce projet .....31
Tableau 3.2	Description des 8 MCG utilisés provenant de CMIP5 (GIEC, 2014).....43
Tableau 4.1	Pourcentages médians des variances des composantes en fonction de l'indicateur d'étiage pour l'horizon 2080 .....76
Tableau 4.2	Pourcentages médians des variances des composantes en fonction des modèles hydrologiques utilisés dans l'analyse pour l'horizon 2080 .....79
Tableau 5.1	Pourcentages de variance de E, de H et de l'interaction EH en fonction de l'indicateur d'étiage pour l'horizon 2080 .....86
Tableau 5.2	Pourcentages de variance de E et H pour la période de référence .....86
Tableau 5.3	Pourcentages de variance de E et H pour l'horizon 2080.....86



## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	11
Surveillance des sécheresses au Mexique le 15 mai 2018, Tirée de Conagua (2019) .....	
Figure 1.2	12
Débit moyen sur sept jours pour une récurrence de deux ans au Québec, Tiré de CEHQ (2015) .....	
Figure 1.3	13
Trajectoires de forçage radiatif ( $W/m^2$ ) des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre pour la période 2000-2100, Tiré de Van Vuuren et al. (2011) .....	
Figure 2.1	19
Localisation des bassins versants en Amérique du Nord.....	
Figure 2.2	20
Localisation des bassins versants au Canada.....	
Figure 2.3	22
Localisation des bassins versants aux États-Unis .....	
Figure 2.4	23
Localisation des bassins versants au Mexique.....	
Figure 2.5	25
Localisation des bassins versants dans les zones climatiques de Köppen-Geiger pour la période 1975-2004 .....	
Figure 3.1	28
Organigramme présentant la méthodologie générale pour la modélisation des débits d'étiage.....	
Figure 3.2	34
Structure du modèle hydrologique GR4J.....	
Figure 3.3	36
Structure du modèle hydrologique HMETS .....	
Figure 3.4	37
Structure du modèle hydrologique Mohyse.....	
Figure 3.5	38
Schéma de la chaîne de calage en modélisation hydrologique .....	
Figure 3.6	43
Sensibilité climatique des modèles climatiques de CMIP5 .....	
Figure 4.1	52
Diagrammes à moustaches représentant $E_{moy}(mm)$ pour les 11 formulations d'ETP à l'étude, par pays.....	
Figure 4.2	53
Diagrammes à moustaches des performances en calage des trois modèles hydrologiques selon la formulation d'ETP .....	
Figure 4.3	54
Diagrammes à moustaches des performances en calage selon le pays pour les trois modèles hydrologiques .....	

Figure 4.4	Cartes géographiques des NSE en calage pour le modèle hydrologique GR4J en fonction de la formulation d'ETP.....	55
Figure 4.5	Cartes géographiques des NSE en calage pour le modèle hydrologique HMETs en fonction de la formulation d'ETP .....	56
Figure 4.6	Cartes géographiques des NSE en calage pour le modèle hydrologique Mohyse en fonction de la formulation d'ETP .....	57
Figure 4.7	Cartes géographiques du delta relatif de $E_{moy}$ entre la période de référence et l'horizon 2050 avec le RCP 4,5 en fonction de la formulation d'ETP .....	60
Figure 4.8	Cartes géographiques du delta relatif de $E_{max}$ entre la période de référence et l'horizon 2050 avec le RCP 4,5 en fonction de la formulation d'ETP .....	61
Figure 4.9	Cartes géographiques du delta de $E_{moy}$ entre le delta relatif de H2050 avec RCP 4,5 et le delta relatif de H2050 avec RCP 8,5 en fonction de la formulation d'ETP .....	62
Figure 4.10	Cartes géographiques du delta de $E_{moy}$ entre le delta relatif de H2050 avec RCP 4,5 et le delta relatif de H2080 avec RCP 4,5 en fonction de la formulation d'ETP .....	63
Figure 4.11	Cartes géographiques du delta de $E_{moy}$ entre le delta relatif de H2050 avec RCP 4,5 et le delta relatif de H2080 avec RCP 8,5 en fonction de la formulation d'ETP .....	63
Figure 4.12	Cartes géographiques du delta relatif du 7Q2 entre la période de référence et l'horizon 2050 avec le RCP 4,5 en fonction de la formulation d'ETP .....	64
Figure 4.13	Cartes géographiques du delta relatif du 7Q10 entre la période de référence et l'horizon 2050 avec le RCP 4,5 en fonction de la formulation d'ETP .....	65
Figure 4.14	Cartes géographiques du delta relatif du 30Q5 entre la période de référence et l'horizon 2050 avec le RCP 4,5 en fonction de la formulation d'ETP .....	66
Figure 4.15	Cartes géographiques du delta du 7Q2 entre le delta relatif de H2050 avec RCP 4,5 et le delta relatif de H2080 avec RCP 8,5 en fonction de la formulation d'ETP .....	67

Figure 4.16	Cartes géographiques du delta du 7Q10 entre le delta relatif de H2050 avec RCP 4,5 et le delta relatif de H2080 avec RCP 8,5 en fonction de la formulation d'ETP .....	67
Figure 4.17	Cartes géographiques du delta du 30Q5 entre le delta relatif de H2050 avec RCP 4,5 et le delta relatif de H2080 avec RCP 8,5 en fonction de la formulation d'ETP .....	68
Figure 4.18	Analyse de décomposition de la variance pour l'indicateur 7Q2 et pour la période passée récente .....	71
Figure 4.19	Analyse de décomposition de la variance pour l'indicateur 7Q10 et pour la période passée récente .....	71
Figure 4.20	Analyse de décomposition de la variance pour l'indicateur 30Q5 et pour la période passée récente .....	72
Figure 4.21	Diagrammes à moustaches de la variance des composantes de la chaîne hydroclimatique par indicateur d'étiage pour l'ensemble des bassins versants (Horizon 2080).....	73
Figure 4.22	Analyse de décomposition de la variance du 7Q2 pour l'horizon 2080.....	74
Figure 4.23	Analyse de décomposition de la variance du 7Q10 pour l'horizon 2080...	74
Figure 4.24	Analyse de décomposition de la variance du 30Q5 pour l'horizon 2080...	75
Figure 4.25	Analyse de décomposition de la variance du 7Q2 selon les quatre formulations d'ETP (H, K, MB et O) pour l'horizon 2080 .....	77
Figure 4.26	Analyse de décomposition de la variance du 7Q2 selon les modèles hydrologiques GR4J et HMETs (Horizon 2080) .....	78
Figure 4.27	Analyse de décomposition de la variance du 7Q2 selon les modèles hydrologiques GR4J et Mohyse (Horizon 2080) .....	79
Figure 5.1	Pyramide de contribution à l'enveloppe d'incertitude de la chaîne de modélisation hydroclimatique.....	84
Figure 5.2	Décomposition de la variance pour les interactions de 1 <sup>e</sup> et 2 <sup>e</sup> ordres pour l'indice 7Q2 et pour l'horizon 2080.....	85
Figure 5.3	Zones climatiques de Köppen-Geiger en Amérique du Nord.....	90
Figure 5.4	Analyse de décomposition de la variance du 7Q2 selon les zones climatiques de Köppen-Geiger pour l'horizon 2080 .....	90



## **LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES**

CANOPEX	Canadian model parameter experiment
CEHQ	Centre d'Expertise Hydrique du Québec
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project – Phase 5
ET	Évapotranspiration
ETP	Évapotranspiration Potentielle
ETR	Évapotranspiration Réelle
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat
GR4J	Modèle du Génie Rural à 4 paramètres - Journalier
HMETS	Hydrological Model of École de Technologie Supérieure
MCG	Modèle Climatique Global
MOHYSE	Modèle Hydrologique Simplifié à l'Extrême
MOPEX	Model parameter estimation experiment
NSE	Nash-Sutcliffe Efficiency
RCP	Representative Concentration Pathways
NRCAN	Ressources Naturelles Canada
SCEUA	Shuffled Complex Evolution method developed at the University of Arizona
USGS	United States Geological Survey



## INTRODUCTION

L'eau, cette richesse naturelle parfois considérée comme acquise par ceux qui jouissent de son abondance alors qu'elle sème la détresse pour d'autres, est le fondement principal de l'hydrologie. Cette science s'intéresse particulièrement aux processus terrestres du cycle de l'eau. Ainsi, les études hydrologiques permettent de prédire, dans les limites de l'incertitude, le volume et le comportement de l'eau à l'échelle d'un cours d'eau ou d'un bassin versant. Dans le domaine de l'ingénierie, cet outil d'aide à la décision trouve plusieurs applications telles que la gestion de l'approvisionnement en eau des municipalités, le dimensionnement des infrastructures de régulation et d'évacuation, la gestion efficace des réservoirs hydroélectriques ou la prévention du risque d'inondations et de sécheresses.

Afin de simuler le cycle hydrologique et de prévoir son influence sur les bassins versants, les hydrologues utilisent des modèles hydrologiques. Ces outils numériques permettent de calculer les débits d'eau issus d'un bassin versant en utilisant les données météorologiques locales comme intrants au modèle. Chacun des processus du cycle de l'eau doit être bien simulé afin que le bilan hydrique soit équilibré et que le modèle soit robuste. Par contre, puisque ces processus ne sont pas constants dans le temps et dans l'espace et que les modèles sont des simplifications du monde réel, il est impossible de reproduire les processus hydrologiques de manière parfaite. De ce fait, le processus d'évapotranspiration (ET), complexe et particulièrement difficile à mesurer, est un maillon faible de la modélisation hydrologique.

En raison de son incidence sur les quantités d'eau disponibles pour le ruissellement, l'ET est une variable jouant un rôle important dans l'hydrologie d'un bassin versant. Puisqu'elle résulte de la combinaison des phénomènes d'évaporation provenant des étendues d'eau et du sol ainsi que de la transpiration provenant des végétaux, l'ET est une variable complexe et coûteuse à mesurer. C'est pourquoi plusieurs formulations mathématiques de complexité physique variable ont été élaborées à travers le temps afin de déterminer l'évapotranspiration potentielle (ETP), soit la capacité maximale d'ET pour une durée prédéterminée et

conditionnelle à la disponibilité de l'eau. Dans un contexte de changements climatiques, une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements météorologiques extrêmes tels que les sécheresses est à prévoir selon le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2014). Des périodes d'étiages plus sévères et prolongées auront des répercussions sur la quantité et la qualité de l'eau. L'ETP étant un facteur majeur du cycle de l'eau et particulièrement influant en période d'étiage, il est de mise d'étudier la robustesse de l'ETP en modélisation afin de mieux comprendre les risques associés aux changements climatiques sur la disponibilité en eau et, par le fait même, de mesurer l'impact d'utiliser une formulation d'ETP plutôt qu'une autre dans la chaîne de modélisation en contexte de changements climatiques.

La disponibilité de la ressource en eau est très hétérogène en Amérique du Nord. Alors que le Québec jouit du privilège d'avoir de l'eau de bonne qualité et en grande quantité, plusieurs états nord-américains sont victimes de stress hydrique. De ce fait, cette étude s'imbrique dans un projet de collaboration entre le Québec et le Mexique, ayant pour objectif de produire des connaissances nouvelles en matière d'impacts des changements climatiques sur les extrêmes hydrologiques. Les diversités hydrologiques et climatiques entre ces régions permettent d'enrichir le projet et d'élargir les conclusions.

L'objectif principal de cette étude est de déterminer la contribution de la formulation d'ETP dans l'enveloppe d'incertitude de la chaîne de modélisation hydrologique en changement climatique. Plus de 2000 bassins versants situés au Canada, aux États-Unis et au Mexique sont utilisés à cette fin. Puisque l'ETP est directement liée aux conditions climatiques du bassin versant, l'utilisation d'une grande quantité de bassins versants couvrant plusieurs zones climatiques permet ainsi d'augmenter la robustesse des conclusions obtenues dans le cadre du projet.

Il résultera de ce projet une meilleure compréhension et une amélioration des connaissances des processus d'ET. Les conclusions pourront servir aux gestionnaires de systèmes hydriques pour l'identification de mesures d'adaptation adéquates, permettant notamment de prévenir

l'assèchement des sources d'approvisionnement en eau des municipalités en périodes d'étiage.

À la suite de cette introduction, la présente étude est située par rapport au savoir scientifique existant dans la revue de littérature (chapitre 1). Le domaine d'étude ainsi que la provenance des données utilisées sont décrites au chapitre 2. Par la suite, les démarches utilisées pour mener à bien ce projet sont exposées dans la section méthodologie au chapitre 3. Cette section est suivie par la présentation des résultats (chapitre 4) ainsi que l'analyse de ceux-ci et la discussion (chapitre 5). Ce mémoire se termine finalement par la conclusion et les recommandations en vue de futures études.



## **CHAPITRE 1**

### **REVUE DE LITTÉRATURE**

L'objectif de ce chapitre est de situer la présente étude parmi la littérature existante. La revue de littérature est orientée selon les trois principaux champs d'intérêt du projet, soit (1) l'évapotranspiration et les changements climatiques, (2) la chaîne de modélisation hydroclimatique et (3) l'évaluation de l'incertitude. Finalement, l'objectif principal du projet ainsi que les sous-objectifs sont établis à la fin de ce chapitre.

#### **1.1 Évapotranspiration et changements climatiques**

L'évapotranspiration (ET) est un processus abstrait du cycle de l'eau particulièrement important puisqu' « à l'échelle planétaire, les deux tiers des précipitations continentales retournent à l'atmosphère par évapotranspiration, ce qui est loin d'être négligeable » (Ancil, Rousselle, & Lauzon, 2012).

L'ET résulte de la combinaison des volumes d'eau qui retournent vers l'atmosphère grâce aux processus d'évaporation provenant des surfaces d'eau et de transpiration provenant des êtres vivants. L'évapotranspiration réelle (ETR) représente le volume d'eau véritablement retourné à l'atmosphère et est limité par les conditions hydrométéorologiques courantes (notamment la disponibilité de l'eau), tandis que l'évapotranspiration potentielle (ETP) représente le volume maximal d'eau susceptible de retourner vers l'atmosphère lorsqu'il n'y a aucune contrainte de disponibilité en eau (Oudin, 2004 ; McMahon, Finlayson, & Peel, 2016). Ainsi, l'ETP est soit égale ou supérieure à ETR puisque les quantités d'eau pouvant être retournées à l'atmosphère par évaporation et transpiration ne sont pas toujours disponibles.

### 1.1.1 Méthodes d'estimation de l'ETP

Les méthodes pour déterminer l'ETP sont généralement regroupées en cinq classes (Oudin et al., 2005a ; Anctil et al., 2012 ; Xu & Singh (2002)) : (1) bilan hydrique, (2) transfert de masse, (3) combinatoire, (4) basée sur la radiation et (5) basée sur la température. Cette catégorisation dépend principalement de la philosophie de structure de la formule plutôt que des intrants nécessaires (Seiller & Anctil, 2016).

L'évaporation et la transpiration sont des processus complexes et coûteux à mesurer, ainsi la méthode par bilan hydrique (1), qui consiste à faire le bilan des entrées et des sorties d'eau dans un système, est difficilement praticable. De plus, les méthodes par transfert de masse (2), qui résultent de relations empiriques entre l'ET observée et plusieurs facteurs atmosphériques en lien avec l'ET, sont aussi difficiles à utiliser puisqu'elles nécessitent les valeurs observées. Ainsi, différentes méthodes mathématiques de complexité physique variable ont été mises en place dans le but de déterminer l'ETP. La quantité d'intrants nécessaires aux calculs de l'ETP varient principalement selon la complexité de la formulation. Les méthodes combinatoires (3) consistent en la combinaison du bilan énergétique, qui se base sur le principe de conservation de l'énergie selon le bilan thermique de la masse d'eau, et du transfert de masse (Anctil et al., 2012). Cette classe, contenant notamment la méthode de Penman (Penman, 1948), est plus physique (Oudin et al., 2005a) et demande plus de données d'entrées comme la radiation solaire, l'humidité relative ainsi que la vitesse du vent. Par la suite, les approches basées sur la radiation (4) prennent en compte le principe de conservation de l'énergie pour évaluer l'ETP (Xu & Singh, 2002). Finalement, les méthodes basées sur la température (5) reposent sur des mécanismes utilisant principalement la température comme variable prédictive de l'ETP.

Dans un contexte hydrologique, les valeurs d'ETP sont des intrants aux modèles hydrologiques ou sont calculées à l'intérieur même des modèles en fonction des diverses séries de données météorologiques requises. Par contre, les modèles hydrologiques sont peu sensibles à l'ETP (Oudin et al., 2005a). Le processus d'ET absorbe souvent les erreurs lors

de la calibration du modèle afin de fermer le bilan hydrique et d'obtenir des débits simulés performants (Minville et al., 2014 ; Beven, 2001).

Oudin et al. (2005a) a étudié la sensibilité de quatre modèles hydrologiques à 27 méthodes d'ETP (combinatoire, basée sur la radiation et basée sur la température) pour 308 bassins versants de zones climatiques différentes (Australie, France et États-Unis). Les principaux résultats de cette étude ont démontré que les méthodes simples (basée sur la radiation ou sur la température) sont aussi efficaces que les méthodes plus complexes (combinatoire) et que la performance des modèles hydrologiques peut être améliorée en privilégiant les méthodes les plus simples.

En général, plusieurs méthodes d'ETP doivent être prises en compte afin de diminuer l'incertitude qui y est liée (Seiller & Anctil, 2016). Ultimement, la sélection des formulations d'ETP dépend principalement des données observées disponibles afin d'alimenter la méthode.

### **1.1.2 ETP en climat futur**

Comme le climat affecte tous les processus du cycle de l'eau (Anctil et al., 2012), les changements climatiques auront des répercussions sur chacun des processus. Par exemple, selon le dernier rapport du GIEC (2014), les quantités de précipitations vont augmenter globalement. L'ET ne sera pas épargnée par les changements climatiques. En effet, l'étude de Kingston, Todd, Taylor, Thompson, & Arnell (2009) a démontré qu'une augmentation de température uniforme de 2 °C cause une augmentation de l'ETP pour six méthodes d'ETP (deux méthodes combinatoires, deux méthodes basées sur la radiation et deux méthodes basées sur la température). Des différences considérables dans les signaux de changement climatique sont présents entre les différentes méthodes d'ETP et cela a un grand impact sur la disponibilité en eau (Kingston et al., 2009).

Mundo-Molina (2015) a évalué l'impact des changements climatiques sur l'ET au Nord du Mexique. En utilisant deux formulations, l'étude a déterminé que l'ET augmentera d'environ 7% d'ici 2030 dans cette zone ce qui représente une grande quantité d'eau en moins pour satisfaire la demande.

Seiller & Anctil (2016) étudie la sensibilité des projections hydrologiques face au choix de la formulation d'ETP. Vingt-quatre (24) formulations d'ETP sont intégrées à 20 modèles hydrologiques afin de simuler des débits en climat actuel et futur pour un bassin versant au Canada et un en Allemagne. L'étude démontre que le choix de la méthode d'ETP a un grand impact sur les études hydrologiques en contexte de changements climatiques. Les formules plus physiques (combinatoires) engendrent moins d'impacts sur la ressource en eau en climat futur.

Les résultats concernant quel type de formulations s'adaptent le mieux en climat futur sont assez partagés. L'étude de Valipour, Sefidkouhi, & Raeini (2017) a déterminé que les formules d'ETP basées sur la radiation s'adaptent mieux aux changements climatiques que celles basées sur la température.

Dans le cadre du projet, 11 formulations d'ETP sont prises en compte soit cinq basées sur la radiation et six basées sur la température. La radiation solaire est déterminée selon des équations empiriques puisqu'elle est difficilement mesurable. Ainsi, la radiation solaire incidente est calculée en fonction du jour julien et de la latitude du bassin versant, en déterminant la déclinaison solaire ainsi que l'angle du soleil couchant. De cette façon, les formulations utilisées nécessitent uniquement les températures observées et la latitude comme intrants ce qui permet de les appliquer sur une grande quantité de bassins versants où des données plus complexes ne sont pas disponibles.

## 1.2 Modélisation hydrologique

Afin de prévoir les quantités d'eau disponible que ce soit pour le dimensionnement d'ouvrage ou pour la gestion hydroélectrique, les modèles hydrologiques sont utilisés pour simuler le cycle hydrologique en fonction des conditions d'un bassin versant. En contexte de changements climatiques, ces outils sont utiles afin de mesurer les impacts sur la disponibilité en eau.

Comme les modèles hydrologiques sont des outils mathématiques contenant plusieurs paramètres ajustables selon les conditions d'un bassin versant, l'étape de calage consiste à ajuster ces paramètres afin d'obtenir des simulations hydrologiques qui représentent le mieux possible la réalité. La performance du calage a un impact sur la robustesse et la fiabilité des modèles, principalement en contexte de changement climatique (Minville et al., 2014 ; Brigode, Oudin, & Perrin, 2013).

Les possibilités de stratégies de calage en modélisation sont nombreuses. Le choix du critère de performance est critique pour orienter la stratégie de calage. Plusieurs méthodes sont utilisées (Krause, Boyle, & Bäse, 2005) mais le critère de Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970) est la fonction-objectif la plus couramment utilisée pour le calage en modélisation hydrologique (Brigode et al., 2013 ; Seiller & Anctil, 2016 ; Oudin, 2004 ; Seiller, Anctil, & Perrin, 2012). Depuis quelques années, une dérivation du critère de Nash-Sutcliffe, le critère de Kling-Gupta (Gupta, Kling, Yilmaz, & Martinez, 2009), gagne en popularité en modélisation hydrologique. De plus, la période de calage ainsi que les conditions du calage sont variables selon les besoins de l'étude. Par exemple, Minville et al. (2014) présentent une stratégie de calage qui utilise le cycle annuel moyen de l'ETR comme contrainte pendant le calage du modèle hydrologique afin que les paramètres de calage soient transposables en climat futur.

### 1.3 Extrême hydrologique

Les extrêmes hydrologiques (crue et étiage) sont des périodes critiques souvent visées par les études hydrologiques puisqu'elles ont plusieurs impacts sur la gestion hydrique, la disponibilité en eau et la sécurité civile. Alors que les crues sont des périodes de fort débit d'eau, les étiages sont des périodes de faible débit d'eau, c'est-à-dire lorsque le ruissellement est à son plus faible sur le bassin versant (CEHQ, 2015). L'intensité d'un événement hydrologique extrême est défini par sa durée et de la récurrence de son débit. En contexte de changements climatiques, ces extrêmes hydrologiques sont sujets à augmenter en fréquence et en intensité (GIEC, 2014). En effet, selon le dernier rapport du GIEC, les zones qui sont actuellement sèches vont avoir tendance à devenir encore plus sèches. Les mêmes conclusions ont été tirées de Seiller & Anctil (2016). Cette étude démontre que les crues printanières surviendront plus tôt avec un débit maximum inférieur, que les débits hivernaux augmenteront et que les sécheresses estivales s'amplifieront pour les deux bassins versants situés au Canada et en Allemagne.

La variabilité dans la modélisation des débits est supérieure pour les périodes d'étiage et l'incertitude liée au modèle hydrologique ainsi qu'à la formulation d'ETP est plus grande pendant ces périodes (Bae, Jung, & Lettenmaier (2011) ; Giuntoli, Vidal, Prudhomme, & Hannah, 2015).

Au Mexique, les événements de sécheresses sont une préoccupation majeure. Depuis 2014, un outil de surveillance des sécheresses (Conagua, 2019) a été mis en place afin de déterminer la présence et l'intensité pour une zone géographique. Les sécheresses sont caractérisées selon divers indicateurs tel que l'indice de ruissellement. Puisque ces événements ont une grande influence sur la disponibilité en eau, un programme de prévention permet de minimiser les impacts environnementaux, économiques et sociaux en cas de pénurie d'eau.

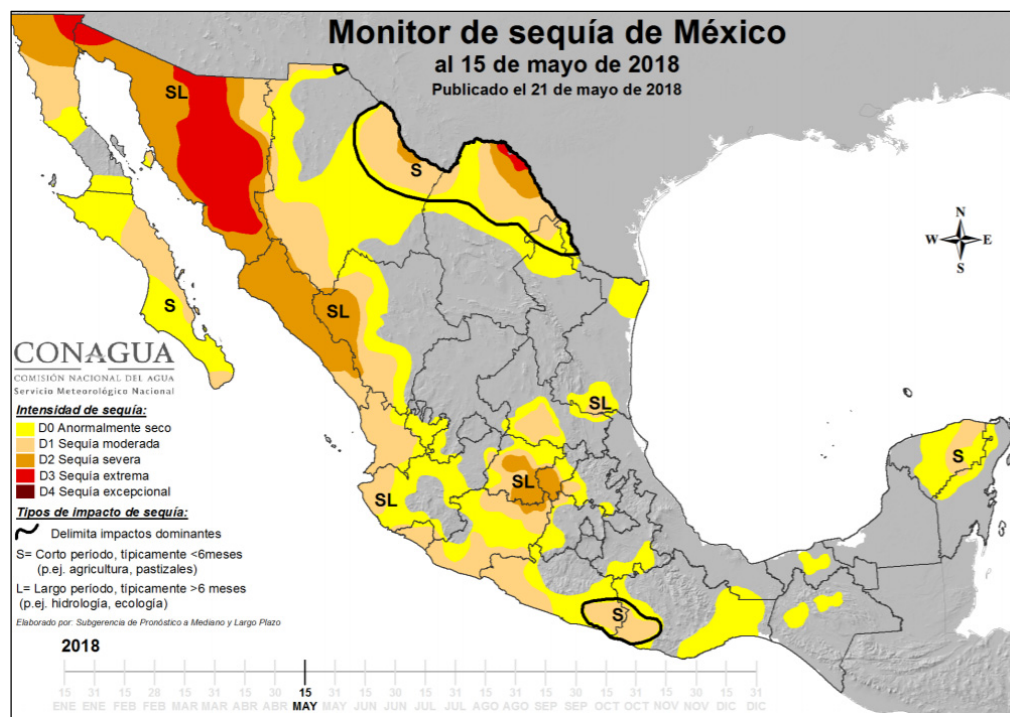


Figure 1.1 Surveillance des sécheresses au Mexique le 15 mai 2018,  
Tirée de Conagua (2019)

Au Québec, les tendances futures sont aussi une diminution des débits (Figure 1.2) lors des périodes d'étiage selon l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional (CEHQ, 2015). Ce document a été mis à jour en 2018. Par contre, le format d'affichage étant moins convivial, la figure 1.2 est utilisée à titre indicatif. L'Atlas 2018 montre une diminution très probable des débits d'étiage est généralement présente sur le territoire québécois avec des pourcentages de changement entre 0 % et -20 % pour le nord-est, et entre -20 % et - 50 % pour le sud-ouest, pour le même indice d'étiage (7Q2) que sur la Figure 1.2. Il y a donc intérêt et nécessité d'étudier le comportement hydrologique de ces régions en période d'étiage.

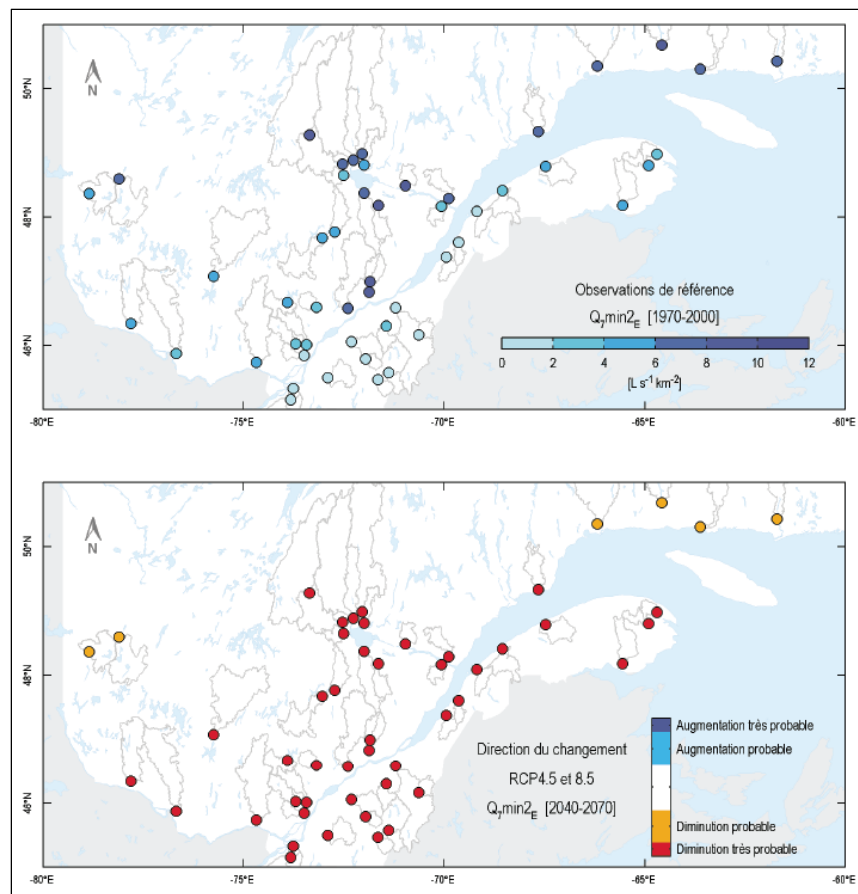


Figure 1.2 Débit moyen sur sept jours pour une récurrence de deux ans au Québec (7Q2), Tiré de CEHQ (2015)

## 1.4 Modélisation climatique

En hydrologie, l'étude des changements climatiques est particulièrement importante puisque le climat est influent sur tous les processus du cycle de l'eau (Ancil et al., 2012). L'accès à des projections climatiques est essentiel lors d'étude d'impacts en contexte de changements climatiques.

### 1.4.1 Projections climatiques

Afin de transposer une problématique en climat futur, les scientifiques utilisent les projections climatiques. Ces projections sont faites grâce à des modèles climatiques contraints à des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (Charron, 2016).

Les modèles climatiques sont des représentations physiques du système climatique fondé sur les processus d'interactions atmosphériques et océaniques de la planète. Ils permettent de simuler les climats actuel et futur. Plusieurs modèles climatiques ont été créés par les centres climatiques à travers le monde, chacun ayant ses caractéristiques propres. Il existe deux types de modèles climatiques : global (MCG) et régional (MCR) (Charron, 2016). Les MCG ont des résolutions spatiales grossières (environ 200 km) et couvrent l'ensemble de la planète. Quant à eux, les MCR ont une résolution spatiale plus fine (45 km et moins) et couvrent une aire limitée de la planète. Une réanalyse (uniquement pour la période historique) ou un MCG est utilisé afin de déterminer les conditions aux frontières des MCR (pilotage des MCR).

Afin de simuler les conditions futures, les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre sont représentés par des trajectoires de concentration représentative (representative concentration pathways – RCP) émis par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2014). Quatre possibilités de RCP ont été déterminées, soit le RCP 2,6, le RCP 4,5, le RCP 6,0 et le plus pessimiste RCP 8,5, représentant le forçage radiatif total en  $\text{W/m}^2$  vers 2100.

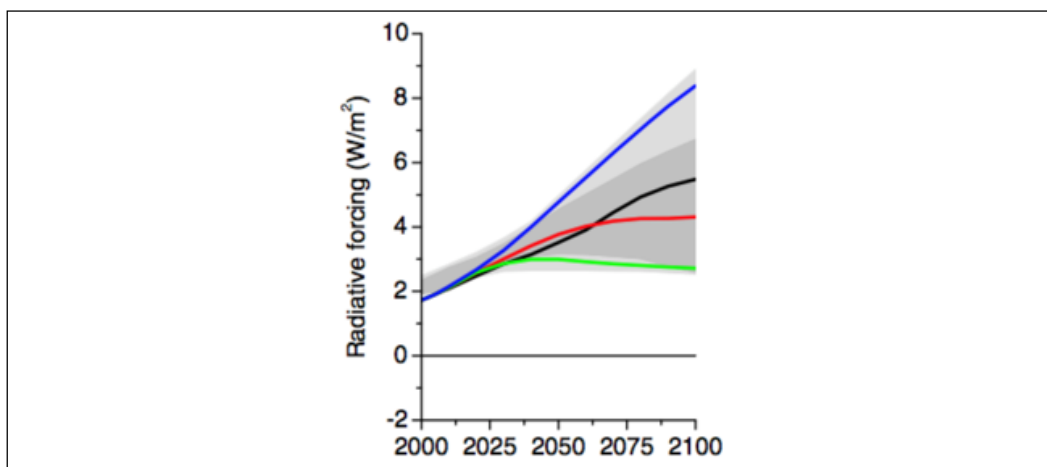


Figure 1.3 Trajectoires de forçage radiatif ( $\text{W/m}^2$ ) des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre pour la période 2000-2100, Tiré de Van Vuuren et al. (2011)

Étant donné que les possibilités de simulations climatiques sont nombreuses, les centres de modélisation climatique internationaux collaborent afin de rendre disponible plusieurs scénarios. L'ensemble de simulations climatiques le plus récent à ce jour est le CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5). C'est d'ailleurs cet ensemble qui soutient la rédaction du 5<sup>e</sup> rapport du GIEC (GIEC, 2014).

L'étude de Seiller et al. (2016) qui prend en compte différentes formulations d'ETP en climat futur, utilise un seul modèle climatique avec un unique scénario d'émissions de gaz à effet de serre pour simuler les conditions futures.

#### **1.4.2 Post-traitement**

Les données issues des modèles climatiques comportent généralement un biais dû à la structure et aux hypothèses sous-jacentes dans le modèle climatique. Afin de pallier ce problème, le post-traitement des données climatiques permet de corriger les biais systématiques afin de pouvoir les comparer aux données observées ainsi qu'aux autres modèles climatiques. Cette étape permet d'augmenter la confiance envers les sorties des modèles climatiques en conditions futures ainsi que de faire une mise à l'échelle statistique de ces données climatiques.

Il existe deux catégories de méthodes de post-traitement : (1) par correction de biais et (2) par perturbations. Les méthodes par correction de biais consistent à calculer un biais entre les données climatiques observées et celles de la période de référence. Ce biais est ensuite appliqué aux données climatiques futures pour obtenir les simulations corrigées. Quant à elles, les méthodes par perturbations consistent à déterminer le delta entre les sorties du modèle climatique pour la période de référence et pour la période future. Par la suite, le delta est appliqué aux données climatiques observées afin de produire la série d'observations perturbées.

L'étude de Chen, Brissette, Chaumont, & Braun (2013a) a comparé six méthodes de post-traitement dans un contexte de modélisation hydrologique. Selon cette étude, la performance

de la méthode dépend de l'emplacement du bassin versant. L'accent est aussi mis sur l'importance d'utiliser plusieurs modèles climatiques et plusieurs méthodes de correction afin de quantifier l'incertitude en découlant en changements climatiques.

## **1.5 Incertitudes en modélisation hydroclimatique**

Le concept d'incertitude est important dans les études d'impact en changements climatiques. En effet, l'incertitude provenant des différentes sources d'erreurs de la chaîne de modélisation ont des impacts sur les projections hydrologiques (Giuntoli, Villarina, Prudhomme, & Hannah, 2018 ; Chen, Brissette, Poulin, & Leconte, 2011). Chacune des composantes de la chaîne ajoute son incertitude. Les sources d'incertitudes de la chaîne de modélisation climatique sont (1) le choix du modèle climatique, (2) le scénario d'émissions de gaz à effet de serre utilisé pour alimenter le modèle climatique, (3) la méthode de post-traitement et (4) la variabilité naturelle (Charron, 2016 ; Troin, Arsenault, Martel, & Brissette, 2018). Les principales sources d'incertitudes en modélisation hydrologique sont les choix liés à la structure du modèle hydrologique, incluant le choix (1) de la formulation d'ETP et (2) du modèle de neige (Troin et al., 2018), ainsi que (3) des paramètres de calage et (4) le choix d'une fonction-objectif en calage. Plus il y a de composantes dans la chaîne, plus l'incertitude est amplifiée. L'enveloppe d'incertitude en modélisation est souvent déterminée en évaluant la variance des différentes composantes de la chaîne (Giuntoli et al., 2015). Des analyses statistiques comme l'ANOVA ou la décomposition de la variance (Ferro, 2004 ; Troin et al., 2018) sont utilisées afin de quantifier la contribution d'une composante.

Plusieurs études tentent de déterminer l'incertitude reliée à la chaîne de modélisation climatique dans les études hydrologiques. Dans ces cas, les sources d'erreur hydrologiques ne sont pas prises en compte. L'étude de Minville, Brissette, & Leconte (2008) estime l'incertitude liée au climat futur en changements climatiques sur un bassin versant nordique. La conclusion de cette recherche est que la plus grande incertitude est associée au MCG ce qui concorde avec Giuntoli et al. (2018).

Certaines études ont déterminé la variabilité associée aux choix de la formulation d'ETP suite à la modélisation climatique. Kingston et al. (2009) démontre que le choix de la formule d'ETP est une source d'incertitude considérable dans les projections futures de disponibilité en eau. Selon Kay & Davies (2007), la contribution de la formulation d'ETP à l'incertitude d'une étude hydrologique est inférieure à celle du modèle climatique.

L'analyse sur les contributions du modèle hydrologique et de la méthode d'ETP dans la chaîne de modélisation hydroclimatique de Bae et al. (2011) démontre que ces composantes hydrologiques engendrent beaucoup de variations pour les mêmes simulations climatiques donc beaucoup d'incertitude, et que cette conclusion est amplifiée pour des horizons futurs à plus long terme. Il est démontré dans Troin et al. (2018) que parmi les composantes hydrologiques, la structure du modèle hydrologique engendre la plus grande incertitude, suivie par la formulation d'ETP.

L'étude de Giuntoli et al. (2015) a démontré une augmentation de l'incertitude lors des périodes d'étiage. De plus, la contribution du modèle hydrologique à l'incertitude est supérieure lors de ces périodes de faible débit.

La littérature s'accorde sur l'importance d'utiliser plusieurs composantes pour quantifier et compenser l'intervalle d'incertitude de chacune des sources (Minville et al., 2008 ; Kay & Davies, 2007 ; Giuntoli et al., 2015). L'utilisation d'une variété de méthodes permet d'augmenter la robustesse des études de modélisation hydroclimatique.

## **1.6 Objectifs de recherche**

L'objectif primaire de ce projet consiste à estimer la contribution de la formulation d'ETP dans l'enveloppe d'incertitude de la chaîne de modélisation hydroclimatique, et ce, dans le but d'améliorer notre compréhension du processus d'ETP et ainsi de mieux prévoir les risques en période d'étiage.

Les sous-objectifs du projet consistent à (1) étudier le comportement en calage selon les différentes formulations d'ETP, (2) évaluer les tendances de l'impact de l'ETP en climat futur, (3) déterminer la variabilité associée à chaque composante de la chaîne hydroclimatique et (4) étudier la diversité spatiale des résultats selon les zones climatiques.



## CHAPITRE 2

### SECTEUR À L'ÉTUDE

Ce chapitre présente le domaine d'étude de ce projet. La localisation des bassins versants utilisés, leurs caractéristiques principales ainsi que la provenance des données observées sont décrites dans cette section. Les zones climatiques sont également abordées dans ce chapitre.

#### 2.1 Bassins versants et données hydrométéorologiques

Le domaine d'étude de ce projet s'étend sur l'ensemble de l'Amérique du Nord. Ainsi, un large éventail de conditions climatiques et physiographiques sont prises en compte. Au total, 2080 bassins versants couvrant le territoire nord-américain sont à l'étude, dont 235 au Canada, 1825 aux États-Unis et 20 au Mexique.

Les données hydrométéorologiques proviennent de différentes bases de données selon les pays. Ces données sont nécessaires afin de calculer les différentes valeurs d'ETP et de calibrer les modèles hydrologiques.

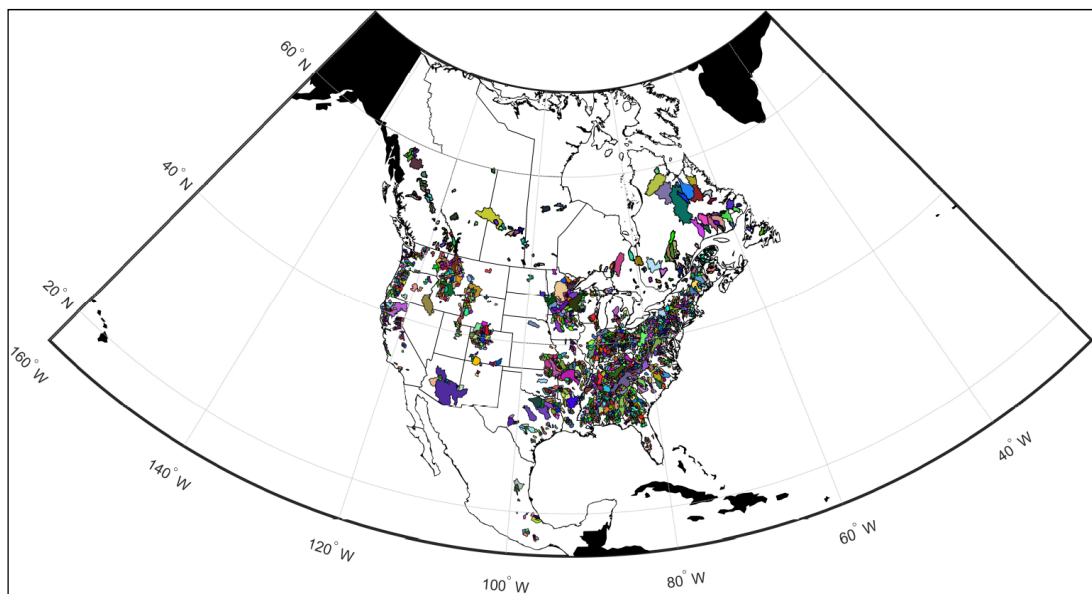


Figure 2.1 Localisation des bassins versants en Amérique du Nord

### 2.1.1 Canada

Sur le territoire canadien, 235 bassins versants ont été identifiés et sélectionnés dans la présente étude. Quoique la majorité de ces bassins se situent au Québec et en Colombie-Britannique, la plupart des provinces canadiennes sont représentées dans l'ensemble du Canada. Étant donné que les provinces des prairies canadiennes sont moins performantes en calage des modèles hydrologiques, un minimum de dix bassins versants performants par province ont été ajoutés pour l'Alberta, la Saskatchewan et le Manitoba. Les superficies des bassins versants varient entre 303 km<sup>2</sup> et 80 088 km<sup>2</sup>. Pour les bassins versants canadiens, les données hydrométéorologiques utilisées proviennent de la base de données « Canadian model parameter experiment » (CANOPEX) (Arsenault, Bazile, Ouellet Dallaire, & Brissette, 2016). Les données observées de CANOPEX proviennent des stations météorologiques d'Environnement et Changement climatique Canada et de la grille de données climatiques d'une résolution de 10 km de Ressources Naturelles Canada (NRCAN). Pour cette étude, les variables extraites de la base de données sont les coordonnées des contours des bassins versants, leur superficie, les précipitations journalières, les températures minimales et maximales journalières ainsi que les débits observés quotidiennement à l'exutoire. Les informations fournies couvrent la période 1950-2010 pour les données météorologiques (précipitations et températures) tandis que cette période est variable pour les valeurs de débits observés.

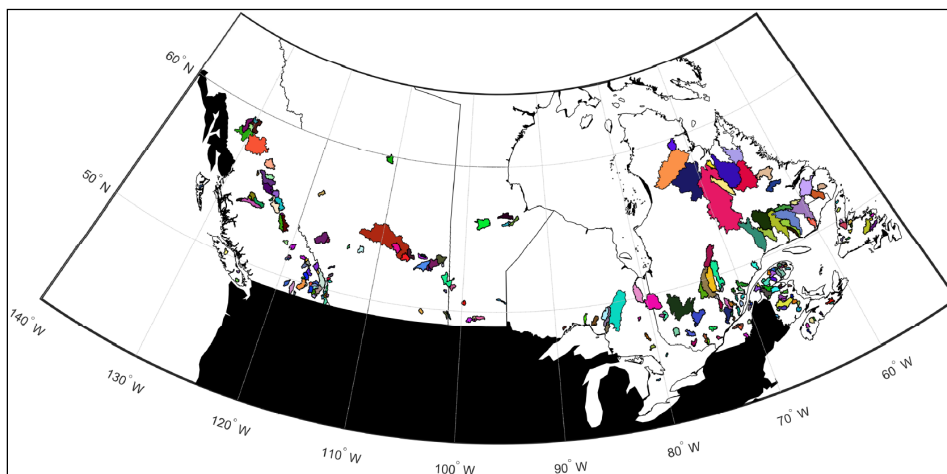


Figure 2.2 Localisation des bassins versants au Canada

Dans le Tableau 2.1, P représente les précipitations totales annuelles moyennes (mm), T représente la température annuelle moyenne (°C) et Q représente le débit annuel moyen (m<sup>3</sup>/s).

Tableau 2.1 Informations des bassins versants du Canada

	<b>Aire (km<sup>2</sup>)</b>	<b>P (mm)</b>	<b>T (°C)</b>	<b>Q (m<sup>3</sup>/s)</b>	<b>Longitude (°)</b>	<b>Latitude (°)</b>
<b>Minimum</b>	303	368	-7,3	0,2332	-132,2334	44,0518
<b>25<sup>e</sup> percentile</b>	630	662	0,1	10,48	-114,9420	48,3583
<b>Médiane</b>	1291	928	1,4	23,40	-76,3300	49,6849
<b>75<sup>e</sup> percentile</b>	3391	1091	2,8	52,62	-66,4635	52,5958
<b>Maximum</b>	88 088	2388	7,6	1118	-54,1609	59,7833

### 2.1.2 États-Unis

Parmi les 2080 bassins versants à l'étude, 1825 bassins versants sont situés sur le territoire des États-Unis. Leurs superficies se situent entre 502 km<sup>2</sup> et 162 580 km<sup>2</sup>. Les données hydrométéorologiques pour les bassins versants américains proviennent de la base de données « United States Geological Survey » (USGS) et « Model Parameter Estimation Project » (MOPEX) (Schaake, Cong, & Duan, 2006). Ces outils rassemblent une grande quantité de données hydrométéorologiques historiques à l'échelle du territoire américain. Les variables extraites de ces bases de données sont les mêmes que pour le Canada, c'est-à-dire les coordonnées du contour du bassin versant, la superficie, les précipitations journalières, les températures minimales et maximales journalières ainsi que les débits observés quotidiennement. Les données météorologiques observées sont disponibles sur la période 1950 à 2010 tandis que les périodes de disponibilité des données hydrologiques sont variables. Il est à noter que les données météorologiques sont des produits grillés et n'ont donc pas de valeurs manquantes, contrairement aux données hydrométriques qui sont les données observées et donc sujettes à la perte de données.

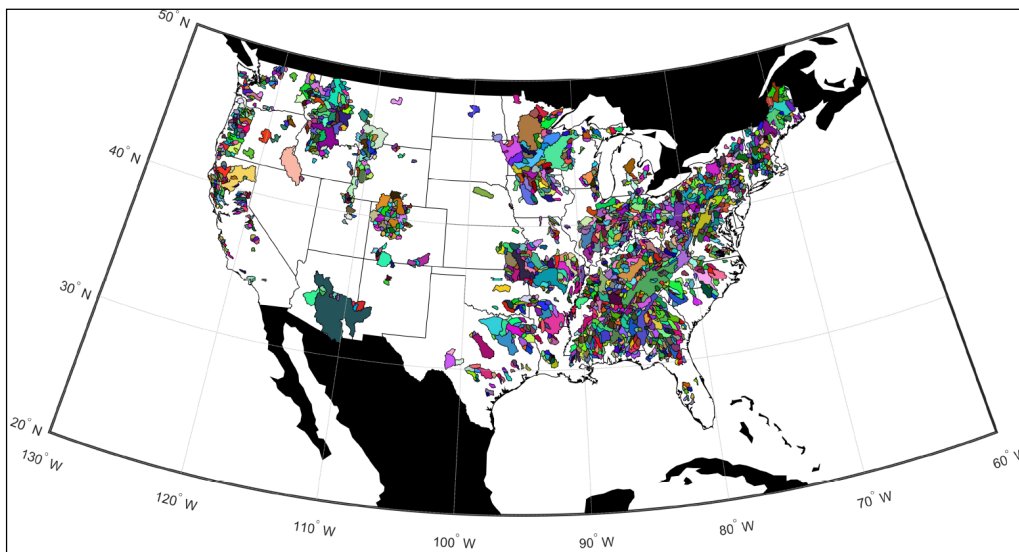


Figure 2.3 Localisation des bassins versants aux États-Unis

Dans le Tableau 2.2, P représente les précipitations totales annuelles moyennes (mm), T représente la température annuelle moyenne (°C) et Q représente le débit annuel moyen ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

Tableau 2.2 Informations des bassins versants aux États-Unis

	Aire ( $\text{km}^2$ )	P (mm)	T (°C)	Q ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Longitude (°)	Latitude (°)
<b>Minimum</b>	502	270	-2,6	0,06470	-124,0779	27,0647
<b>25<sup>e</sup> percentile</b>	831	953	6,9	10,94	-101,7440	35,3823
<b>Médiane</b>	1502	1127	10,5	20,76	-87,9860	39,5186
<b>75<sup>e</sup> percentile</b>	3832	1311	14,8	52,31	-82,8580	42,7938
<b>Maximum</b>	162 580	4336	22,7	1888	-67,5419	48,8153

### 2.1.3 Mexique

Il y a 20 bassins versants à l'étude sur le territoire du Mexique. Les superficies des bassins versants mexicains varient entre  $320 \text{ km}^2$  et  $10\,968 \text{ km}^2$ . Pour les bassins versants mexicains, les données hydrologiques proviennent de la banque nationale des données sur les eaux de surface (BANDAS) de la Commission nationale de l'eau du Mexique (Conagua, 2008) tandis

que les données météorologiques proviennent de la base de données de Livneh (Livneh et al., 2015). Cette dernière est une grille de données climatiques ayant une résolution d'environ 6 km qui comprend les variables suivantes : les températures minimales et maximales journalières ainsi que les précipitations journalières. Le période utilisée pour les données météorologiques est de 1950 à 2009.

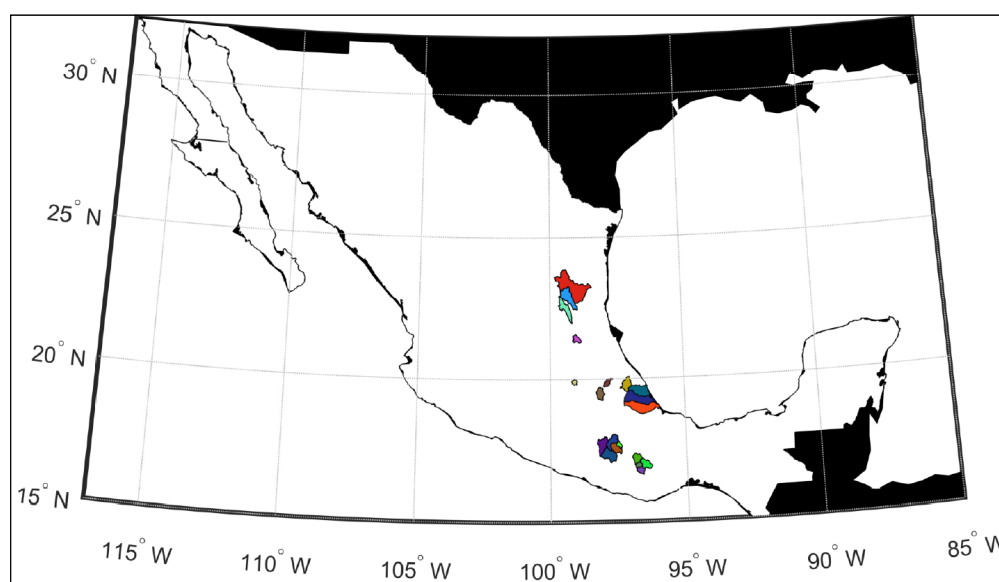


Figure 2.4 Localisation des bassins versants au Mexique

Dans le Tableau 2.3, P représente les précipitations totales annuelles moyennes (mm), T représente la température annuelle moyenne (°C) et Q représente le débit annuel moyen ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

Tableau 2.3 Informations sur les bassins versants au Mexique

	Aire ( $\text{km}^2$ )	P (mm)	T (°C)	Q ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Longitude (°)	Latitude (°)
<b>Minimum</b>	320	599	13,3	0,9010	-99,4099	16,9867
<b>25<sup>e</sup> percentile</b>	1030	735	16,2	3,940	-98,5586	17,4497
<b>Médiane</b>	1997	782	17,9	9,450	-97,6069	19,1771
<b>75<sup>e</sup> percentile</b>	3030	1374	20,8	33,90	-96,7925	19,8787
<b>Maximum</b>	10 968	3198	22,4	68,50	-96,5131	23,1568

## 2.2 Zones climatiques

La classification des climats de Köppen-Geiger (Kottek, Grieser, Beck, Rudolf, & Rubel, 2006) est un système international de classement des zones climatiques. Les zones climatiques sont ainsi applicables à l'ensemble du domaine à l'étude. Cette classification est utilisée dans plusieurs domaines tels que l'hydrologie et la climatologie. Les conditions des différentes zones climatiques de Köppen-Geiger sont basées sur les précipitations et les températures. La délimitation d'une zone est donc variable spatialement et temporellement.

Les zones climatiques sont définies par un code de deux à trois lettres. La première lettre représente le type de climat général, la deuxième représente le régime pluviométrique tandis que la dernière représente le régime des températures.

Tableau 2.4 Classification des climats de Köppen-Geiger

<b>Climat général</b>	<b>Régime pluviométrique</b>	<b>Régime des températures</b>
A : tropical	f : climat humide	a : été chaud
B : aride	m : climat de mousson	b : été tempéré
C : tempéré	s : saison sèche en été	c : été court et frais
D : continental	w : saison sèche en hiver	d : hiver très froid
E : polaire	F : calotte polaire	h : sec et chaud
	S : climat de prairie	k : sec et froid
	W : climat désertique	

Dans le cadre de cette étude, les zones climatiques sont définies sur une période de 30 ans débutant en 1975. La figure 6 illustre les zones climatiques en Amérique du Nord pour cette période ainsi que les centroïdes des 2080 bassins versants de cette recherche.

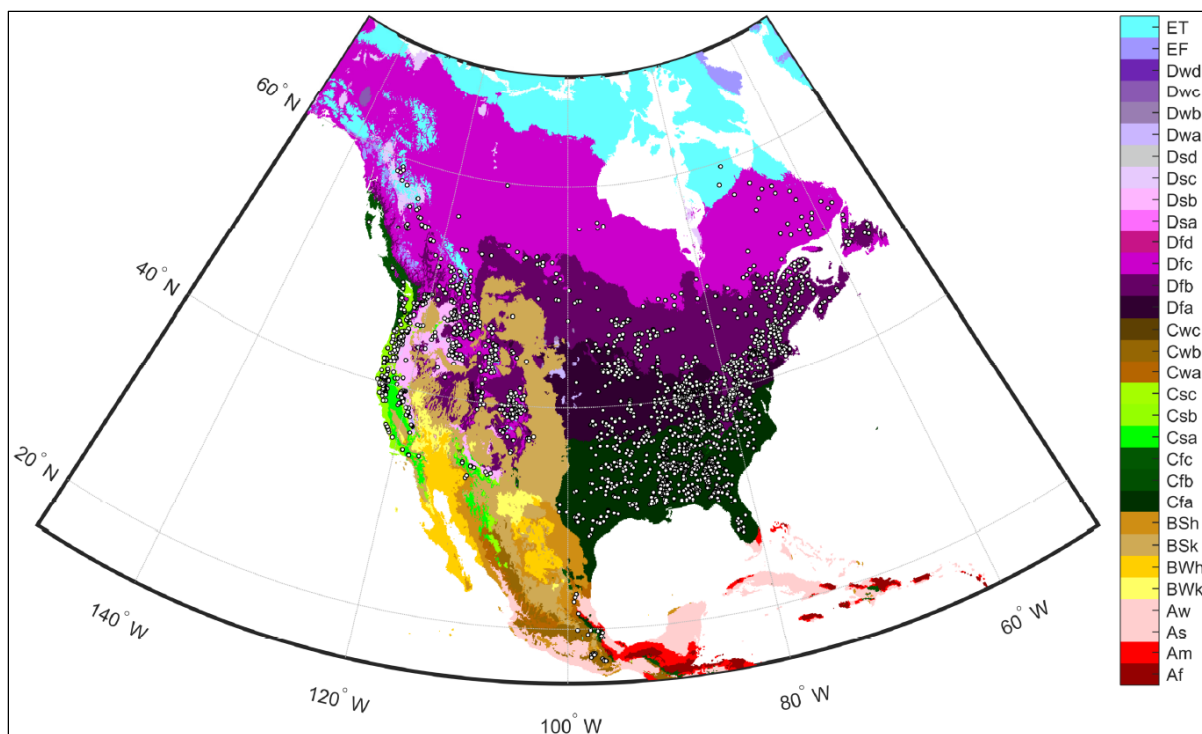


Figure 2.5 Localisation des bassins versants dans les zones climatiques de Köppen-Geiger pour la période 1975-2004

La diversité climatique varie significativement en Amérique du Nord. Au total, 14 zones climatiques différentes sont utilisées pour regrouper la multitude de bassins versants sur le territoire nord-américain. Au Canada, cinq zones climatiques (Cfb, Dfb, Dfc, Dsc et ET) englobent les 235 bassins versants. Pour les États-Unis, les 1825 bassins versants sont regroupés dans 12 zones climatiques différentes (BSk, BSh, Cfa, Cfb, Csa, Csb, Dfa, Dfb, Dfc, Dsb, Dsc et ET). Étant donnée la grande diversité climatique mexicaine, les 20 bassins versants sont compris dans quatre zones climatiques (BSh, Cfa, Cwa et Cwb). Le nombre de bassins versants par zone climatique est présenté au Tableau 2.5.

Tableau 2.5 Nombre de bassins versants par zones climatiques de Köppen-Geiger

<b>Zones climatiques</b>	<b>Nombre de bassins versants</b>			
	<b>Total</b>	<b>Canada</b>	<b>États-Unis</b>	<b>Mexique</b>
<b>BSk</b> : climat semi-aride sec et froid	<b>7</b>	-	7	-
<b>BSh</b> : climat semi-aride et chaud	<b>5</b>	-	2	3
<b>Cfa</b> : climat tempéré chaud, sans saison sèche et à été chaud	<b>631</b>	-	627	5
<b>Cfb</b> : climat tempéré chaud, sans saison sèche et à été tempéré	<b>26</b>	4	22	-
<b>Csa</b> : climat tempéré chaud à été chaud et sec	<b>23</b>	-	23	-
<b>Csb</b> : climat tempéré chaud à été sec	<b>111</b>	-	111	-
<b>Cwa</b> : climat tempéré chaud à hiver sec et été chaud	<b>3</b>	-	-	3
<b>Cwb</b> : climat tempéré chaud à hiver sec et été tempéré	<b>9</b>	-	-	9
<b>Dfa</b> : climat continental froid, sans saison sèche et à été chaud	<b>362</b>	-	362	-
<b>Dfb</b> : climat continental froid, sans saison sèche et à été tempéré	<b>554</b>	89	465	-
<b>Dfc</b> : climat continental froid, sans saison sèche et à été court et frais	<b>257</b>	134	123	-
<b>Dsb</b> : climat continental froid à été sec et tempéré	<b>60</b>	-	60	-
<b>Dsc</b> : climat continental froid à été sec, court et frais	<b>22</b>	2	20	-
<b>ET</b> : climat polaire de toundra	<b>9</b>	6	3	-

## **CHAPITRE 3**

### **MÉTHODOLOGIE**

Ce chapitre présente la méthodologie utilisée pour atteindre les objectifs du projet. Chaque étape réalisée, ainsi que les choix effectués pour y parvenir, y sont détaillés. Un aperçu global des éléments méthodologiques de modélisation est premièrement présenté et est suivi d'une description plus détaillée des différentes composantes de la chaîne de modélisation hydroclimatique utilisée dans ce projet. Finalement, un survol des méthodes de calcul d'indices pour les étiages estivaux est présenté.

#### **3.1 Aperçu global de la méthodologie pour la modélisation des débits**

L'objectif principal de cette étude étant de déterminer la contribution de la formulation d'ETP dans l'enveloppe d'incertitude de la chaîne menant à la modélisation hydrologique en changement climatique, chaque maillon de la chaîne est représenté par une variété d'éléments.

La première partie de la méthodologie a permis de mettre en place des outils de modélisation pour simuler des débits d'étiage sur les bassins versants à l'étude. À ce titre, l'organigramme de la Figure 3.1 présente les éléments méthodologiques de modélisation ainsi que les liens entre ces derniers. Dans un premier temps, onze formules d'évapotranspiration potentielle (ETP) ont été codées afin de simuler l'ETP pour l'ensemble des bassins versants. Les séries temporelles d'ETP ainsi générées de même que des séries temporelles de précipitations et températures observées ont pu servir d'intrants à trois modèles hydrologiques, pour leur calage. Le calage permet de déterminer les jeux de paramètres des modèles hydrologiques qui assurent la meilleure représentativité possible d'une série temporelle de débits observés, selon une fonction-objectif donnée. Les bassins versants ont ensuite été filtrés afin de ne conserver que les bassins pour lesquels la performance en calage était supérieure ou égale à un critère établi.

Afin de poursuivre l'analyse en changements climatiques, des données issues de huit modèles climatiques ont été extraites et traitées pour chacun des bassins versants retenus après filtrage. Comme il existe un biais entre les sorties des modèles climatiques et les données observées, deux méthodes de post-traitement ont été utilisées afin de générer les facteurs de correction à appliquer aux données climatiques (précipitations et températures) servant à alimenter les modèles hydrologiques / formulations d'ETP en conditions futures.

Par la suite, les séries temporelles d'ETP ont pu être calculées à l'aide des 11 formulations dans le climat futur. En utilisant les jeux de paramètres produits lors de l'étape de calage des bassins versants, les données météorologiques futures corrigées et les valeurs d'ETP futures ont pu être introduites dans les modèles hydrologiques afin de projeter les débits en contexte de changement climatique. Il a finalement été possible d'analyser les caractéristiques des extrêmes de ces débits, plus particulièrement au niveau des indicateurs liés aux étiages d'été, en climat passé récent et en climat futur.

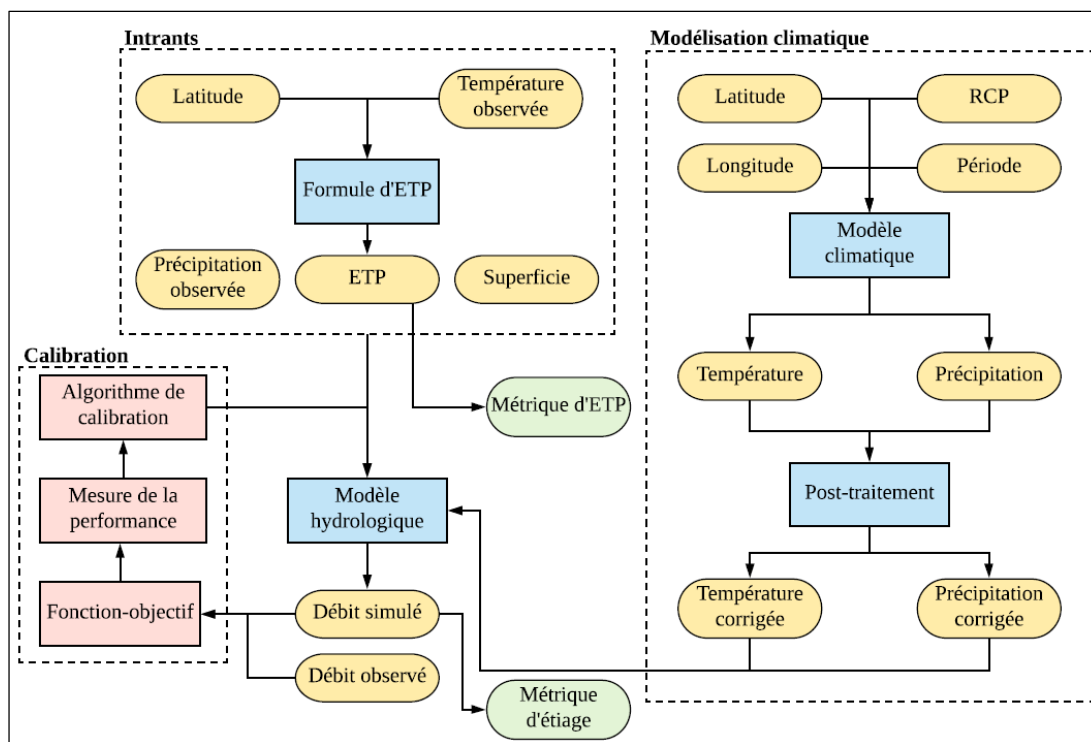


Figure 3.1 Organigramme présentant la méthodologie générale pour la modélisation des débits d'étiage

### 3.2 Évapotranspiration potentielle

Puisque les formules combinatoires ne conduisent pas nécessairement à des meilleures performances hydrologiques que les formules plus simples (Seiller & Anctil, 2016), onze formules simples ont été considérées dans le présent projet. Les catégories de formulations d'ETP les plus simples sont celles basées sur la température et celles basées sur la radiation. Les formules basées sur la température nécessitent uniquement, en entrée, la température maximale et minimale ainsi que, quelquefois, la latitude et le jour julien afin de déterminer la durée d'ensoleillement. Les formules basées sur la radiation nécessitent aussi la température maximale et minimale, la latitude, le jour julien en plus de la radiation extraterrestre. Alors que la température est une variable climatique généralement disponible en raison de sa facilité à être mesurée, ce n'est pas le cas pour la radiation extraterrestre. Cette variable climatique est donc déterminée selon la radiation solaire incidente qui est calculée à partir de la latitude et du jour julien afin de déterminer la déclinaison solaire. Le rayonnement solaire et la température sont d'ailleurs les deux principaux paramètres qui influent sur le taux d'évaporation (Anctil et al., 2012). Les 11 formules utilisées sont présentées au Tableau 3.1. Parmi celles-ci, les formules 1 à 6 sont basées sur la température alors que les formules 7 à 11 sont basées sur la radiation.

L'utilisation de peu de données afin de calculer l'ETP permet d'appliquer les formulations sur une grande quantité de bassins versants qui ne sont pas tous équipés des instruments nécessaires pour alimenter les formules requérant des variables plus complexes, telles que le vent, l'humidité relative et la pression atmosphérique. Les 11 formules sélectionnées assurent une grande diversité parmi les formules simples afin de mesurer l'incertitude de ce maillon de la chaîne de modélisation hydroclimatique des étiages.

Dans les équations du Tableau 3.1,  $DL$  représente la durée du jour (h/j), calculée à partir de la date et de la latitude;  $T_m$  représente la température moyenne de l'air ( $^{\circ}\text{C}$ );  $T_{mm}$  représente la température mensuelle moyenne de l'air ( $^{\circ}\text{C}$ );  $\omega$  représente l'angle du coucher du soleil (rad), déterminé à partir de la date;  $T_{max}$  et  $T_{min}$  sont les températures maximale et minimale de l'air

(°C);  $R_e$  représente le rayonnement extraterrestre ( $\text{MJ/m}^2\text{j}$ ), qui est déterminé à partir de la date et de la latitude;  $\lambda$  est la pente de la courbe de pression de vapeur ( $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ ), calculée à l'aide de  $T_m$  et  $\rho$  est la densité de l'eau ( $\text{kg/L}$ ). Les valeurs d'ETP résultant des 11 équations sont calculées en millimètres par jour ( $\text{mm/j}$ ).

Tableau 3.1 Définition des 11 formules d'ETP utilisées dans le cadre de ce projet

Nom	Formules	Référence
1. Blaney et Criddle (BC)	$ETP_{BC} = 0,825 \left( 100 \frac{DL}{365 * 12} \right) (0,46T_m + 8,13))$	<i>Blaney &amp; Criddle (1950)</i>
2. Hamon (H)	$ETP_H = \left( \frac{DL}{12} \right)^2 \exp \left( \frac{T_m}{16} \right)$	<i>Hamon (1960)</i>
3. Hydro-Québec (HQ)	$ETP_{HQ} = 0,029718(T_{max} - T_{min}) \exp \left( 0,019 \left( \frac{9}{5} (T_{max} + T_{min}) + 64 \right) \right)$	<i>Fortin (2000)</i>
4. Kharrufa (K)	$ETP_K = 0,34 \left( 100 \frac{DL}{365 * 12} \right) T_m^{1,3}$	<i>Kharrufa (1985)</i>
5. Mohyse (M)	$ETP_M = \frac{4,088}{\pi} \omega * \exp \left( \frac{17,3T_m}{238 + T_m} \right)$	<i>Fortin &amp; Turcotte (2006)</i>
6. Thornthwaite (T)	$ETP_T = 16 \left( \frac{DL}{360} \right) \left( \frac{10T_m}{I} \right)^K$ $I = \sum_{n=1}^{12} \left( \frac{T_{mm}}{5} \right)^{1,514}$ $K = 0,49239 + 1,792 * I * 10^{-2} - 0,771 * I^2 * 10^{-4}$	<i>Thornthwaite (1948)</i>
7. Baier et Robertson (BR)	$ETP_{BR} = 0,157T_{max} + 0,158(T_{max} - T_{min}) + 0,109R_e - 5,39$	<i>Baier &amp; Roberston (1965)</i>
8. Hargreaves et Samani (HS)	$ETP_{HS} = 0,0023 \frac{R_e}{\lambda \rho} \sqrt{(T_{max} - T_{min})(T_m + 17,8)} 1000$	<i>Hargreaves &amp; Samani (1985)</i>
9. Jensen et Haise (JH)	$ETP_{JH} = 1000 \frac{R_e T_m}{\lambda \rho 40}$	<i>Jensen &amp; Haise (1963)</i>
10. McGuinness et Bordne (MB)	$ETP_{MB} = 1000 \frac{R_e T_m + 5}{\lambda \rho 68}$	<i>McGuinness &amp; Bordne (1972)</i>
11. Oudin (O)	$ETP_O = 1000 \frac{R_e T_m + 5}{\lambda \rho 100}$	<i>Oudin et al. (2005a ; 2005b)</i>

### **3.3 Modélisation hydrologique**

Cette section de la méthodologie consiste à définir les outils utilisés afin de faire la modélisation hydrologique des bassins versants. Les différents modèles hydrologiques employés ainsi que la méthode de calage sont abordés.

#### **3.3.1 Modèles hydrologiques**

Les modèles hydrologiques sont des outils numériques qui permettent d'estimer, entre autres, les débits à l'exutoire de rivières à l'échelle d'un bassin versant. Ils incluent des approximations des processus du cycle de l'eau à l'aide d'un ensemble d'équations mathématiques. Les intrants requis varient selon le type de modèle mais incluent généralement les caractéristiques physiographiques du bassin versant, les données météorologiques sur la période d'intérêt ainsi que les paramètres permettant d'ajuster le comportement du modèle afin qu'il représente bien la réalité locale malgré les simplifications dans le processus de modélisation. Le principal produit de la modélisation est le débit à l'exutoire du bassin versant.

Plusieurs types de modèles hydrologiques ont été développés pour divers types de conditions physiographiques et hydroclimatiques. Les processus simulés par le modèle peuvent reposer sur une représentation de type physique ou de type conceptuel (Anctil, et al., 2012 ; Beven, 2011). Un modèle physique comprend une série d'équations mathématiques faisant appel aux lois de la physique pour représenter notamment l'écoulement de l'eau et les flux d'énergie. Ces modèles demandent généralement beaucoup de données d'observations détaillées, et bien que plusieurs modèles soient d'une complexité très grande, aucun n'est entièrement physique en raison de l'impossibilité d'obtenir suffisamment de données de bonne qualité pour les alimenter et les incertitudes liées aux processus eux-mêmes. Un modèle conceptuel utilise des simplifications pour reproduire les processus du cycle de l'eau afin de diminuer les données nécessaires et de diminuer le temps de calcul. Ce genre de modèle repose souvent sur des représentations à l'aide de réservoirs entre lesquels l'eau chemine suivant des équations non linéaires.

En ce qui concerne la spatialisation des processus simulés, un modèle peut être global ou distribué (Anctil et al., 2012 ; Beven, 2011). Un modèle global considère le bassin versant comme un tout homogène. Les caractéristiques et les données observées sont appliquées uniformément sur l'ensemble du bassin. Un modèle distribué discrétise le bassin versant en sous-bassins afin de prendre en compte les changements dans les caractéristiques d'un bassin à une échelle plus ou moins fine, selon les besoins de la modélisation. Ce type de modèle nécessite plus de données et augmente le temps de modélisation. Par contre, il présente l'avantage de produire de l'information spatialisée concernant, par exemple, l'étendue du couvert de neige ou encore les débits en divers points du bassin (en amont de l'exutoire).

Dans le but de quantifier l'incertitude totale de la chaîne de modélisation hydroclimatique, il est nécessaire d'utiliser plusieurs modèles hydrologiques afin d'évaluer l'incertitude liée à cette composante de la chaîne. Puisque 2 080 bassins versants sont à l'étude, la disponibilité des données, le temps de calcul ainsi que la taille des données sont des contraintes de ce projet. Il est donc pertinent d'utiliser des modèles hydrologiques qui utilisent un minimum de données observées et qui simulent des débits le plus rapidement possible. Ainsi, les modèles hydrologiques utilisés dans ce projet sont conceptuels et globaux. Les trois modèles retenus sont GR4J, HMETS et Mohyse. Bien que ces modèles hydrologiques soient de même type, ils se différencient par leurs complexités (selon le nombre de paramètres) ainsi que leurs structures différentes. Les prochaines sections détaillent davantage chacun de ces modèles.

### **3.3.1.1 GR4J**

Le modèle hydrologique GR4J (Perrin, Michel, & Andréassian, 2003), qui signifie modèle du Génie Rural à 4 paramètres – Journalier, est un modèle global et conceptuel à réservoirs qui comporte quatre paramètres à optimiser. En plus des paramètres, les intrants au modèle GR4J sont la superficie du bassin versant, la combinaison de la précipitation journalière liquide et la lame d'eau provenant de la fonte de la neige ainsi que l'ETP. Puisque ce modèle ne tient pas compte des processus liés à l'accumulation et la fonte de la neige, le modèle à 2 paramètres CemaNeige (Valéry, Andréassian, & Perrin, 2014) est utilisé conjointement avec

GR4J afin de simuler ces processus. Les intrants de CemaNeige sont la température moyenne journalière ainsi que la précipitation journalière sous forme de neige. Il en résulte l'équivalent en eau de la fonte de la neige, qui est ajouté à la précipitation liquide dans GR4J. Le schéma de la structure interne de GR4J est présenté à la Figure 3.2 (Perrin et al., 2003). Suite à l'interception de l'eau, la neutralisation permet de déterminer la pluie nette ainsi que l'ETP nette. Si la quantité de précipitation est supérieure à celle de l'ETP, la soustraction de la valeur de l'ETP à celle de la précipitation équivaut à la précipitation nette tandis que l'ETP nette est zéro. Si la quantité de précipitation est inférieure à l'ETP, c'est l'inverse. La structure de GR4J comporte deux réservoirs : le réservoir de production et le réservoir de routage. Deux hydrogrammes unitaires permettent de transformer la quantité d'eau restante en débit à l'exutoire du bassin versant. Le débit produit par l'hydrogramme unitaire 1 permet de mettre à jour le niveau du réservoir de routage.

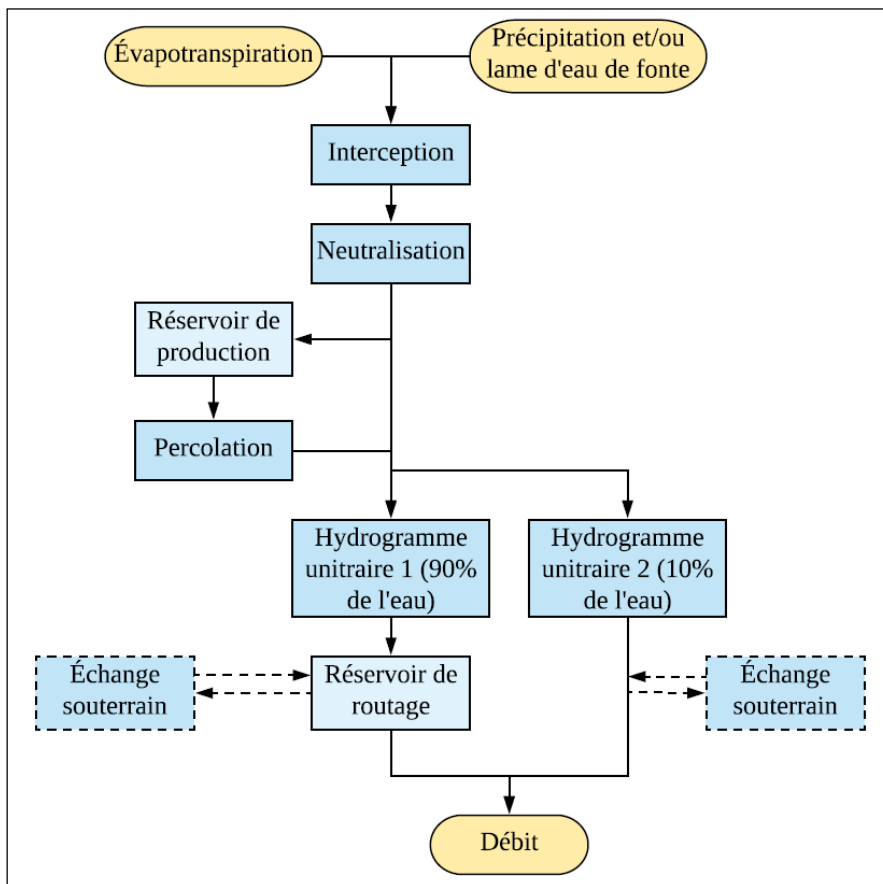


Figure 3.2 Structure du modèle hydrologique GR4J

### 3.3.1.2 HMETS

Le modèle hydrologique HMETS (Martel, Demeester, Brissette, Poulin, & Arsenault, 2017) est un modèle global et conceptuel qui comprend 21 paramètres à optimiser. Vu la quantité de paramètres, le modèle HMETS est plus complexe que GR4J et Mohyse (voir la section 3.3.1.3). Les intrants de ce modèle sont la superficie du bassin versant, les valeurs de températures moyenne, minimale et maximale journalières, les précipitations liquides et solides journalières, l'ETP ainsi que ses paramètres. Contrairement à GR4J, un module d'accumulation et de fonte de neige est incorporé directement dans HMETS. Avec ses dix paramètres, ce module s'adapte généralement bien aux conditions nordiques. La structure de HMETS contient deux réservoirs pour représenter la zone vadose et la zone phréatique. Dépendamment du niveau d'eau du réservoir, la zone vadose fournit l'eau nécessaire pour le processus d'écoulement hypodermique et pour la recharge souterraine. Selon le niveau d'eau de la zone phréatique, une partie de l'eau permet l'écoulement souterrain. Lorsqu'un réservoir a atteint sa capacité maximale, le surplus d'eau est ajouté à l'eau de ruissellement. Le débit à l'exutoire du bassin versant est déterminé en fonction des quatre composantes horizontales (eau de surface, eau de ruissellement, écoulement hypodermique et écoulement souterrain). Deux hydrogrammes unitaires permettent de transférer les eaux de surface et de ruissellement vers l'exutoire. Le schéma de la structure de HMETS est présenté à la Figure 3.3 (Martel et al., 2017).

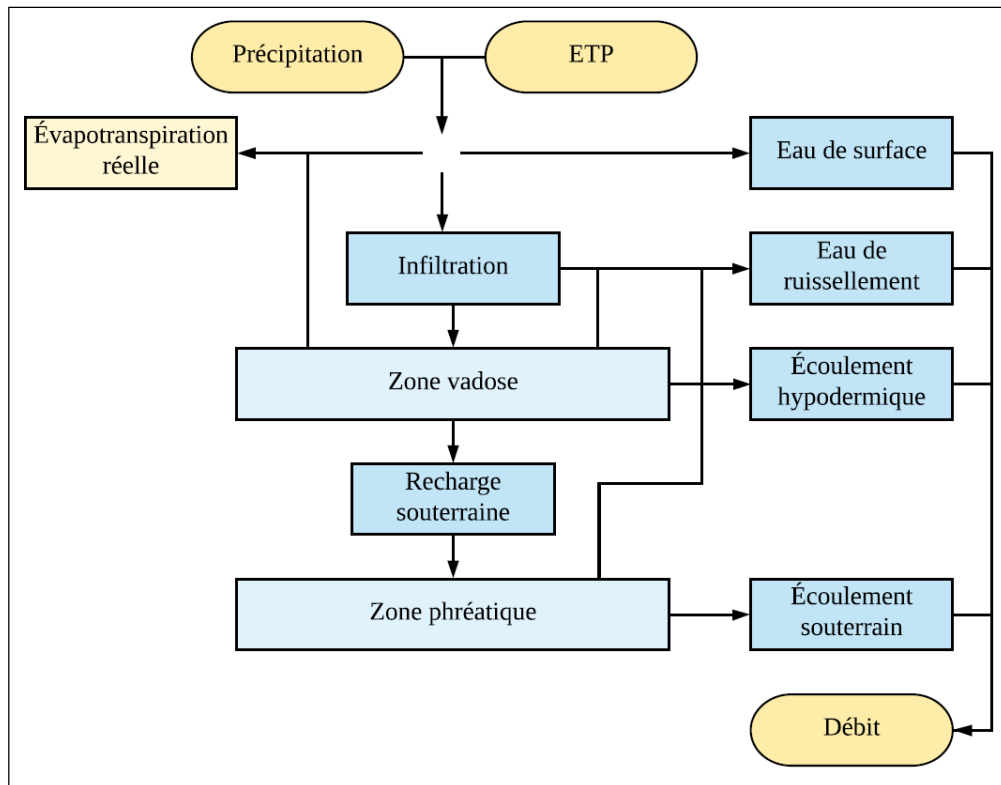


Figure 3.3 Structure du modèle hydrologique HMETS

### 3.3.1.3 Mohyse

Le modèle hydrologique Mohyse (Fortin & Turcotte, 2006), qui signifie MOdèle HYdrologique Simplifié à l'Extrême, est un modèle global et conceptuel avec 10 paramètres à optimiser. Sans compter les paramètres, les intrants de ce modèle sont la superficie du bassin versant, les précipitations liquides et solides journalières, la température moyenne journalière et l'ETP. Comme HMETS, les processus d'accumulation et de fonte de neige sont pris en compte directement dans le modèle. La structure de ce modèle est séparée en trois réservoirs. Afin de définir l'état hydrologique des réservoirs, trois variables d'état sont mises à jour quotidiennement. La production d'eau qui résulte du ruissellement, de la zone vadose et de l'aquifère, est acheminée à l'aide d'un hydrogramme unitaire afin de simuler le débit à l'exutoire du bassin versant. Le schéma de la structure de Mohyse est présenté à la Figure 3.4 (Fortin & Turcotte, 2006).

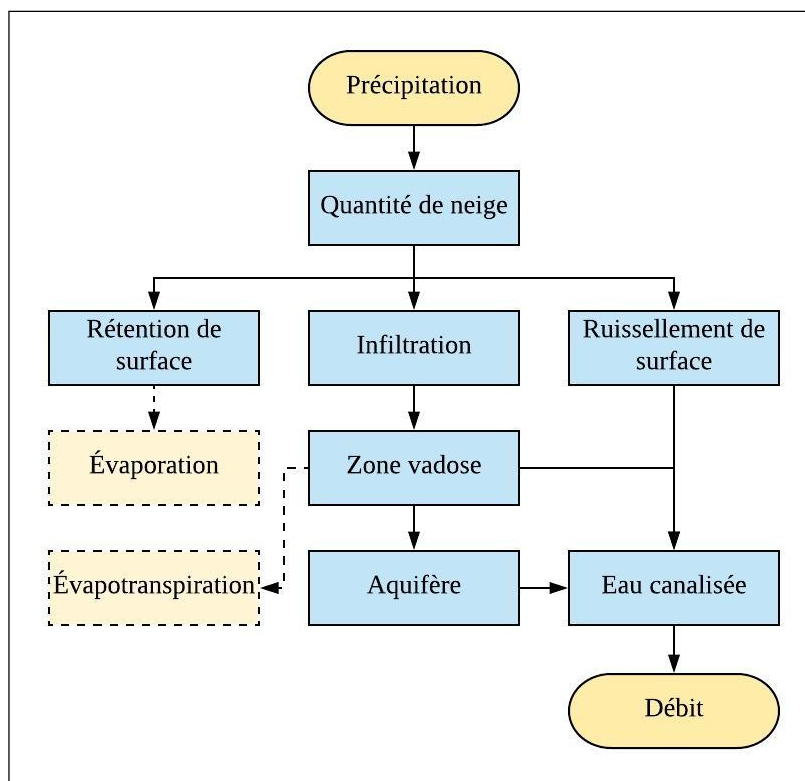


Figure 3.4 Structure du modèle hydrologique Mohyse

### 3.3.2 Calage des modèles hydrologiques

Dans le présent projet, deux calages par bassin versant ont été effectués, pour chaque formule d'ETP et pour chaque modèle hydrologique, c'est-à-dire que 66 jeux de paramètres par bassin versant (deux calages x 11 formules d'ETP x trois modèles hydrologiques) ont été générés. Par la suite, le jeu de paramètres le moins performant a été supprimé pour conserver le meilleur jeu de paramètres pour chaque cas (33 jeux de paramètres par bassin versant). Ceci a été répété pour chacun des 6 054 bassins versants initialement considérés dans cette étude.

Le cycle du calage (Figure 3.5) consiste à (1) générer un jeu de paramètres soit aléatoirement ou à l'aide d'un algorithme conçu à cet effet, (2) faire la modélisation hydrologique avec ce jeu de paramètres et (3) calculer la performance des débits simulés face aux débits observés à l'aide d'une fonction-objectif à minimiser. Le cycle est répété jusqu'à ce que la performance

de modèle ne puisse être améliorée davantage ou en fonction de critères d'arrêt de l'algorithme d'optimisation.

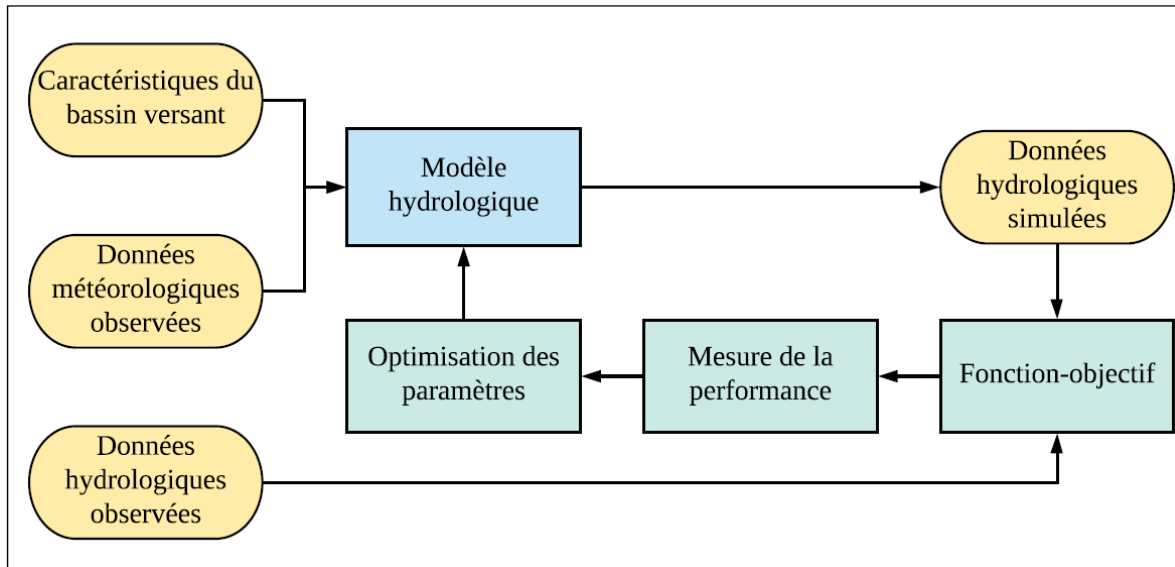


Figure 3.5 Schéma de la chaîne de calage en modélisation hydrologique

### 3.3.2.1 Méthode de calage

L'étape de calage se fait à l'aide d'un algorithme d'optimisation permet d'automatiser le processus. L'algorithme d'optimisation utilisé dans ce projet est le SCEUA (Duan, Sorooshian, & Gupta, 1994) qui signifie Shuffled Complex Evolution method developed at the University of Arizona. En modélisation hydrologique, cette méthode itérative est la plus utilisée en raison de sa robustesse (Beven, 2011). Ainsi, l'optimisateur fait plusieurs évaluations des jeux de paramètres (dont le nombre est initialement fixé par l'utilisateur en fonction de contraintes de ressources ou de temps) afin de minimiser la valeur de la fonction-objectif. Dans le cadre de ce projet, le nombre maximal d'évaluations a été fixé à 10 000 (Arsenault, Poulin, Côté, & Brissette, 2013).

L'espace paramétrique à l'intérieur duquel l'algorithme effectue sa recherche doit être délimité à l'aide de bornes sur les paramètres. Les bornes des paramètres des trois modèles hydrologiques sont définies à l'Annexe A.

Afin que les trois modèles hydrologiques soient comparables sur une base commune, les paramètres en lien avec l'ETP (15<sup>e</sup> paramètre de HMETS et 1<sup>er</sup> paramètre de Mohyse; Annexe A) ont été fixés à une valeur de 1 (borne inférieure = 0,9999999 et borne supérieure = 1,0000001; Annexe A). Cela a été fait dans le but de faire ressortir l'influence des différentes formules d'ETP.

Pour le modèle hydrologique Mohyse, la condition suivante (Équation (3.1)), où  $X_i$  représente le paramètre  $i$  (Annexe A), a été ajoutée dans l'optimisateur afin d'éviter la simulation de débits négatifs :

$$X_2 + X_6 + X_7 \leq 1 \quad (3.1)$$

Habituellement, en modélisation hydrologique, une partie des débits observés est utilisée pour le calage des paramètres alors que l'autre partie est utilisée pour valider ces jeux de paramètres. L'étude d'Arsenault, Brissette, & Martel (2018) a évalué l'utilité du processus de validation ainsi que le bénéfice d'utiliser la totalité de la période en calage pour augmenter la robustesse des jeux de paramètres de calage. La conclusion de cette recherche est qu'il est avantageux de calibrer sur le plus grand nombre d'années possibles puisque l'étape de validation impose de négliger des données qui pourraient améliorer la qualité du calage. Puisque la qualité du calage impacte la robustesse et la transférabilité en conditions futures, cette stratégie de calage n'incluant pas de validation est implémentée dans le présent projet. Ainsi, la période de calage de chacun des bassins versants est la période complète pour laquelle les débits observés ainsi que les données météorologiques observées (précipitations et températures) sont disponibles et aucune validation n'a été effectuée. Par contre, les modèles hydrologiques prennent un certain temps à bien modéliser le cycle de l'eau du bassin versant puisqu'ils commencent avec des états initiaux nuls, soit des réservoirs de production et de routage vides. C'est pourquoi la première année des débits simulés n'est pas prise en compte dans le calcul de la fonction-objectif.

### 3.3.2.2 Fonction-objectif

La performance du jeu de paramètres déterminé par l'optimisateur est quantifiée à l'aide d'une fonction-objectif. Le critère de Nash-Sutcliffe (NSE ; Équation (3.2)) (Nash & Sutcliffe, 1970) est un indicateur couramment utilisé dans le domaine de l'hydrologie ; celui-ci mesure le niveau d'accord entre les débits simulés à l'exutoire d'un bassin versant et les débits observés sur une période historique (période de calage, telle que décrite à la section précédente). La valeur du NSE se situe entre  $-\infty$  (mauvaise performance) et 1 (performance parfaite). Un NSE de 0 signifie que le modèle performe aussi bien que si la moyenne des débits observés avait été utilisée comme prédicteur. Un NSE négatif signifie donc que le modèle performe moins bien que de prendre la moyenne. Généralement, un NSE inférieur à 0,5 indique que le modèle est plus ou moins apte à simuler les débits de manière adéquate, alors qu'un NSE supérieur à 0,7 est généralement reconnu comme étant une performance satisfaisante.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{sim}^t - Q_{obs}^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_{obs}^t - Q_M)^2} \quad (3.2)$$

Où,  $Q_{sim,t}$  représente le débit simulé au temps  $t$ ,  $Q_{obs,t}$  représente le débit observé au temps  $t$ ,  $Q_M$  représente la moyenne des débits observés et  $T$  représente le nombre total de jours pour le calage.

Puisque l'optimisateur cherche à minimiser la valeur de la fonction-objectif ( $FO$ ) et que l'on souhaite maximiser le NSE, la fonction-objectif suivante est utilisée (Équation (3.3)) :

$$FO = 1 - NSE \quad (3.3)$$

### 3.3.3 Choix des bassins versants

Suite à l'étape de calage, un prétraitement a été appliqué afin de conserver les bassins versants les plus performants dans le but de (1) rendre l'étude en changements climatiques

plus robuste et (2) de diminuer le nombre de bassins versants à l'étude qui était de 6054 au départ. L'utilisation d'autant de bassins versants génère des bases de données informatiques de grande taille ce qui cause des problèmes de temps de calcul, de gestion de la mémoire vive et de stockage de données.

Ainsi, un filtre à 4 exigences a été appliqué afin de conserver les bassins ayant des données valides et performantes hydrologiquement. Si un bassin versant ne répondait pas à une exigence pour l'un des trois modèles hydrologiques, il a été supprimé du domaine à l'étude.

- 1) La première exigence est d'avoir des valeurs de débit observé pour chaque pas de temps dans la période de calage, c'est-à-dire de ne pas avoir de données manquantes.
- 2) La deuxième exigence est que la période de disponibilité des débits observés soit supérieure à dix années.
- 3) La troisième exigence est d'avoir une superficie supérieure à 300 km<sup>2</sup> puisque pour les bassins versants ayant une superficie inférieure, un modèle hydrologique au pas de temps sous-journalier serait plus approprié.
- 4) La dernière exigence est d'avoir une médiane des 11 valeurs de NSE (une valeur par formule d'ETP) supérieure à la médiane des médianes de tous les bassins versants. Ainsi, les bassins ayant une médiane individuelle inférieure à la médiane de l'ensemble ont été éliminés.

Suite à ce traitement, les plaines canadiennes (Alberta, Saskatchewan et Manitoba) n'étaient plus représentées parmi l'ensemble de bassins versants canadiens. Ainsi, les bassins versants de ces provinces ayant une moyenne des NSE pour les trois modèles hydrologiques supérieure à 0,6 ont été ajoutés à l'ensemble canadien pour un total de 235 bassins versants. Les bassins versants qui étaient jugés acceptables suite à ce traitement ont donc été retenus dans la base de 2 080 bassins versants pour ce projet. Comme les bassins versants mexicains sont moins performants que ceux du Canada et des États-Unis, ce filtre a été appliqué par pays afin de garder un nombre acceptable de bassins pour chacun des pays.

Malencontreusement, le modèle hydrologique Mohyse avec le paramètre relatif à l'ETP fixé à une valeur de 1 n'a pas été utilisé pour filtrer les bassins versants à l'étude. Ainsi, il est possible qu'il ait des résultats moins performants que les deux autres modèles hydrologiques.

### **3.4 Modélisation climatique**

Cette section traite de la démarche utilisée afin de faire la modélisation de données climatiques dans le but de faire l'analyse en climat futur. Il est donc question des modèles climatiques utilisés, de la définition des conditions et des périodes futures ainsi que de la correction des données climatiques.

#### **3.4.1 Modèles climatiques**

Les sorties de précipitations et températures des modèles climatiques sont utilisés pour alimenter les modèles hydrologiques ainsi que les 11 formulations d'ETP en climat futur. Les modèles climatiques globaux utilisés proviennent de l'ensemble de simulations climatiques CMIP5 (GIEC, 2014). Afin de bien représenter le climat futur, les modèles climatiques de CMIP5 ont été contraints à des scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Parmi les quatre RCP possibles, deux scénarios sont utilisés pour la modélisation climatique de ce projet, soit les RCP 4,5 et RCP 8,5.

Les données de précipitations et températures sont extraites sur la période de référence allant du 1<sup>er</sup> janvier 1971 au 31 décembre 2000 et les périodes futures allant du 1<sup>er</sup> janvier 2041 au 31 décembre 2070 (Horizon 2050) et du 1<sup>er</sup> janvier 2071 au 31 décembre 2100 (Horizon 2080).

Les huit modèles climatiques globaux provenant de CMIP5 qui sont utilisés dans cette étude, sont présentés au Tableau 3.2. Les données extraites de ces modèles sont les précipitations journalières ainsi que les températures maximales et minimales journalières. Les données extraites sont les moyennes des quatre points de grille les plus près du centre de gravité de chacun des bassins versants.

Tableau 3.2 Description des 8 MCG utilisés provenant de CMIP5 (GIEC, 2014)

<b>Modèles climatiques</b>	<b>Année</b>	<b>Centre météorologique</b>	<b>Sensibilité climatique (Figure 3.5)</b>	<b>Résolution spatiale (°)</b>
CanESM2	2010	Canadian Center for Climate Modelling and Analysis	3,7	2,8 x 2,8
CNRM-CM5	2010	Centre National de Recherches Météorologiques et Centre Européen de Recherche et Formation Avancées en Calcul Scientifique	3,3	1,4 x 1,4
CSIRO-Mk3.6.0	2009	Queensland Climate Change Centre of Excellence et Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation	4,1	1,8 x 1,8
GFDL-ESM2M	2011	NOAA Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	2,4	2,5 x 2
GISS-E2-R	2011	NASA Goddard Institute for Space Studies USA	2,1	2,5 x 2
IPSL-CM5A-LR	2010	Institut Pierre Simon Laplace	4,1	3,75 x 1,8
MIROC5	2010	University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies et Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	2,7	1,4 x 1,4
MIROC-ESM	2010	University of Tokyo, National Institute for Environmental Studies et Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology	4,7	2,8 x 2,8

La Figure 3.5 démontre que les huit modèles climatiques couvrent la gamme de sensibilité climatique de l'ensemble des modèles climatiques disponibles dans CMIP5 (GIEC, 2014).

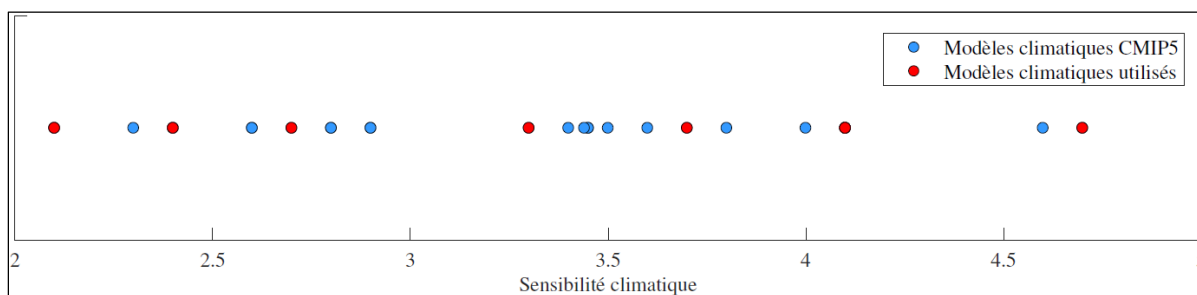


Figure 3.6 Sensibilité climatique des modèles climatiques de CMIP5

### 3.4.2 Post-traitement des données climatiques

L'étape de post-traitement des données climatiques (températures et précipitations) permet de corriger les biais systématiques du modèle climatique. L'hypothèse de stationnarité des biais, c'est-à-dire que leurs propriétés statistiques sont invariables dans le temps, est sous-jacente au post-traitement. Dans le cadre du présent projet, deux méthodes de post-traitement sont utilisées.

#### 3.4.2.1 Daily Scaling (DS)

La méthode DS (Chen, Brissette, Chaumont, & Braun, 2013b) est basée sur les quantiles. Ces quantiles sont déterminés pour chaque mois dans la fenêtre de 30 ans selon le delta entre les données journalières de la période de référence (par exemple, tous les jours des mois de janvier entre 1971 et 2000) et les données journalières de la période future pour le même mois (par exemple, tous les jours des mois de janvier entre 2071 et 2100), provenant, pour les deux périodes, du modèle climatique. Un facteur de mise à l'échelle différent est déterminé pour chacun des 100 quantiles de la distribution. Ces facteurs de mise à l'échelle sont appliqués aux observations afin d'obtenir les précipitations journalières futures ajustées ainsi que les températures minimales et maximales journalières futures ajustées.

Le DS est une méthode par perturbations puisque les facteurs de mise à l'échelle sont appliqués aux données météorologiques observées (Équations (3.4) et (3.5)).

$$T_{fut,j} = T_{obs,j} + (T_{MC,fut,Q} - T_{MC,ref,Q}) \quad (3.4)$$

$$P_{fut,j} = P_{obs,j} * (P_{MC,fut,Q} / P_{MC,ref,Q}) \quad (3.5)$$

Dans les équations (3.4) et (3.5),  $T_{obs,j}$  et  $P_{obs,j}$  représentent la température et la précipitation observées au jour  $j$ ,  $T_{fut,j}$  et  $P_{fut,j}$  représentent la température et la précipitation ajustées au jour  $j$ ,  $T_{MC,fut,Q}$  et  $P_{MC,fut,Q}$  représentent la température et la précipitation futures provenant du

modèle climatique selon le quantile d'un mois spécifique alors que  $T_{MC,ref,Q}$  et  $P_{MC,ref,Q}$  représentent la température et la précipitation de la période de référence provenant du modèle climatique selon le quantile d'un mois spécifique.

### 3.4.2.2 Daily Bias Correction (DBC)

La méthode DBC (Chen et al., 2013b) combine la méthode *Daily translation* (DT) (Mpelasoka & Chiew, 2009) et la méthode *Local intensity scaling* (LOCI) (Schmidli, Frei, & Vidale, 2006).

Premièrement, le LOCI est appliqué pour corriger l'occurrence des précipitations afin que la fréquence des jours de pluie du modèle climatique soit la même que celle des données observées pour la même période. Par la suite, le DT permet de corriger la distribution des températures et des quantités de précipitations selon les quantiles. Cent (100) quantiles sont déterminés pour chaque mois selon le delta entre les données journalières de la période de référence provenant du modèle climatique et les données journalières observées. Les facteurs de correction sont déterminés pour chaque quantile et sont appliqués aux données futures du modèle climatique. La méthode DBC est donc une méthode de correction de biais plutôt qu'une méthode de perturbation des observations.

Les équations du DT sont décrites ci-dessous (Équations (3.6) et (3.7)) et la définition des variables est la même que pour la première méthode de post-traitement (DS).

$$T_{fut,j} = T_{MC,fut,j} + (T_{MC,ref,Q} - T_{obs,Q}) \quad (3.6)$$

$$P_{fut,j} = P_{MC,fut,j} * (P_{MC,ref,Q} / P_{obs,Q}) \quad (3.7)$$

### 3.4.3 Modélisation des débits en climat futur

Suite au post-traitement des données climatiques avec les deux méthodes (DS et DBC), les températures corrigées sont utilisées pour déterminer les séries d'ETP selon les 11 formulations en climat futur. Par la suite, les données climatiques post-traitées (températures et précipitations) ainsi que l'ETP sont intégrés aux trois modèles hydrologiques ultérieurement calibrés afin de modéliser les débits de chaque bassin versant en conditions futures pour les différents horizons et RCP.

## 3.5 Métriques d'analyse

À la fin de l'exécution de la chaîne de modélisation hydrologique, les sorties disponibles sont les débits simulés ainsi que les valeurs d'ETP. La nature combinatoire du projet génère beaucoup de données soit en fonction : (1) du bassin versant, (2) de la formule d'ETP, (3) du modèle hydrologique, (4) du modèle climatique, (5) de la méthode de post-traitement et (6) par scénario d'émissions de GES, et ce, pour les deux périodes futures. La quantité de données hydrométriques étant telle qu'elle causait des problèmes de stockage des fichiers, des valeurs spécifiques issues de celles-ci ont été conservées uniquement.

Comme l'objectif du projet est de déterminer la contribution de la formulation d'ETP dans l'enveloppe d'incertitude de la chaîne de modélisation hydroclimatique principalement en période d'étiage, les cinq métriques sauvegardées pour chaque simulation traitent de l'ETP et des débits d'étiage.

### 3.5.1 Évapotranspiration

Dans le but de pouvoir comparer les différentes formules d'ETP, la valeur moyenne ( $E_{\text{moy}}$ ) et la valeur maximale ( $E_{\text{max}}$ ) des moyennes annuelles d'ETP sont utilisées. Il reste donc uniquement deux valeurs par formule.

### 3.5.2 Étiage

Annuellement, plusieurs périodes d'étiage ont lieu sur un bassin versant. Les caractéristiques (débit, durée et période de l'année) de ces périodes dépendant de plusieurs facteurs et sont différentes sur le territoire nord-américain étant donné la diversité des climats. Pour les bassins versants nordiques (Canada et Nord des États-Unis), il y a des périodes d'étiage pendant l'hiver puisque les précipitations sous forme de neige s'accumulent sans causer de ruissellement. Ces périodes d'étiage hivernales ne sont pas intéressantes dans ce projet puisque les valeurs d'ETP sont nulles lorsque la température est sous le point de congélation. Ainsi, les différentes métriques d'étiage sont calculées uniquement lorsque la température minimale journalière est supérieure à 0°C.

De plus, comme la période estivale n'est pas constante sur l'ensemble de l'Amérique du Nord et qu'elle est sujette à changement dans le futur, il n'est pas approprié de calculer les débits d'étiage pour des dates fixes.

Les trois indices d'étiage suivants (CEHQ, 2015) pour des périodes de récurrence et des durées différentes sont déterminés lorsque la température minimale est positive :

- 1)  $7Q2$  : valeur moyenne du débit d'étiage sur une plage de sept jours consécutifs et de récurrence deux ans ;
- 2)  $7Q10$  : valeur moyenne du débit d'étiage sur une plage de sept jours consécutifs et de récurrence dix ans ;
- 3)  $30Q5$  : valeur moyenne du débit d'étiage sur une plage de 30 jours consécutifs et de récurrence cinq ans.

La probabilité d'occurrence du débit d'étiage est basée sur la loi statistique de log-Pearson de type III. Comme pour le calcul de la fonction-objectif, la première année de simulation n'est pas considérée dans le calcul des indices d'étiage.

### 3.6 Analyse de décomposition de la variance

Pour déterminer l'incertitude liée au choix de la formulation d'ETP, l'analyse de décomposition de la variance (Troin et al., 2018) est utilisée. Cette analyse statistique consiste à évaluer la variance de chacune des composantes de la chaîne de modélisation hydroclimatique et de toutes les interactions possibles entre ses composantes. Ainsi, les analyses de variance-décomposition sont effectuées sur les valeurs brutes d'un indice d'étiage (7Q2, 7Q10 et 30Q5) et ce, par bassin versant.

Dans le présent projet, la chaîne de modélisation hydroclimatique contient 5 composantes, soit : la formule d'ETP ( $E$ ), le modèle hydrologique ( $H$ ), le modèle climatique ( $C$ ), la méthode de post-traitement ( $P$ ) et le RCP ( $R$ ). Plusieurs combinaisons de composantes sont possibles alors que  $E$  varie de 1 à 11,  $H$  varie de 1 à 3,  $C$  varie de 1 à 8,  $P$  varie de 1 à 2 et  $R$  varie de 1 à 2. La variance totale d'un indice ( $V_T$ ) est décomposée à l'équation (3.8).

$$\begin{aligned}
 V_T = & E + H + C + P + R + EH + EC + EP + ER + HC + HP + HR \\
 & + CP + CR + PR + EHC + EHP + EHR + ECP + ECR \\
 & + EPR + HCP + HCR + HPR + CPR + EHCP + EHCR \\
 & + EHPR + ECPR + HCPR + EHCPR
 \end{aligned} \quad (3.8)$$

La variance totale associée à une seule composante de la chaîne, par exemple la formule d'ETP ( $E$ ), est présentée à l'équation (3.9). L'effet de chacune des sources d'incertitude sur le signal de changement climatique est défini par les valeurs de  $V_E$ ,  $V_H$ ,  $V_C$ ,  $V_P$  et  $V_R$ . Ainsi, la présente étude vise principalement à estimer la valeur de  $V_E$  dans différents contextes climatiques.

$$\begin{aligned}
 V_E = & E + EH + EC + EP + ER + EHC + EHP + EHR + ECP + ECR \\
 & + EPR + EHCP + EHCR + EHPR + ECPR + EHCPR
 \end{aligned} \quad (3.9)$$

Ainsi, chaque bassin versant obtient ses valeurs caractéristiques de variance pour chacune des composantes, ce qui permet de comparer les bassins entre eux et de faire des liens selon les différentes zones climatiques.



## **CHAPITRE 4**

### **RÉSULTATS**

Ce chapitre présente les résultats obtenus dans le cadre de ce projet de recherche. Suite à la détermination des différentes séries d'ETP, les résultats relatifs au calage des modèles hydrologiques sont présentés. Ensuite, les impacts des conditions climatiques sur les indicateurs d'ETP et d'étiage sont exposés. Finalement, ce chapitre se termine sur les analyses de décomposition de la variance.

Pour la majorité des figures présentées dans ce chapitre, les formulations d'ETP sont identifiées de la façon suivante : BC (Blaney et Criddle), H (Hamon), HQ (Hydro-Québec), K (Kharrufa), M (Mohyse), T (Thornthwaite), BR (Baier et Robertson), HS (Hargreaves et Samani), JH (Jensen et Haise), MB (McGuinness et Bordne) et O (Oudin).

#### **4.1 Évapotranspiration**

Pour chacun des 2080 bassins versants à l'étude, les valeurs journalières d'ETP ont été déterminées selon les 11 formulations pour la période historique où les données hydrométéorologiques sont disponibles.

La Figure 4.1 compare la variabilité entre les valeurs moyennes des moyennes annuelles d'ETP (indice  $E_{moy}$ , section 3.5.1) pour les différentes formulations d'ETP, par pays. Évidemment, les bassins versants du Canada (et du Nord des États-Unis) affichent des valeurs moyennes inférieures puisqu'il y a peu d'évapotranspiration pendant l'hiver, lorsque les températures journalières sont sous 0°C.

La formulation de Mohyse (M) a tendance à surestimer les valeurs d'ETP par rapport aux autres formulations. Pour les trois territoires, il ne semble pas y avoir de corrélation entre les formules de même catégorie (basées sur la température ou sur la radiation). De plus, la formulation de Thornthwaite (T) est celle qui démontre le moins de variabilité sur l'ensemble

de bassins versants. Malgré qu'elle se situe dans la normale pour les bassins canadiens, cette formule semble sous-estimer l'ETP des bassins versants mexicains et sud-américains. Ainsi, T semble moins bien s'adapter au climat du sud, où les températures sont plus élevées.

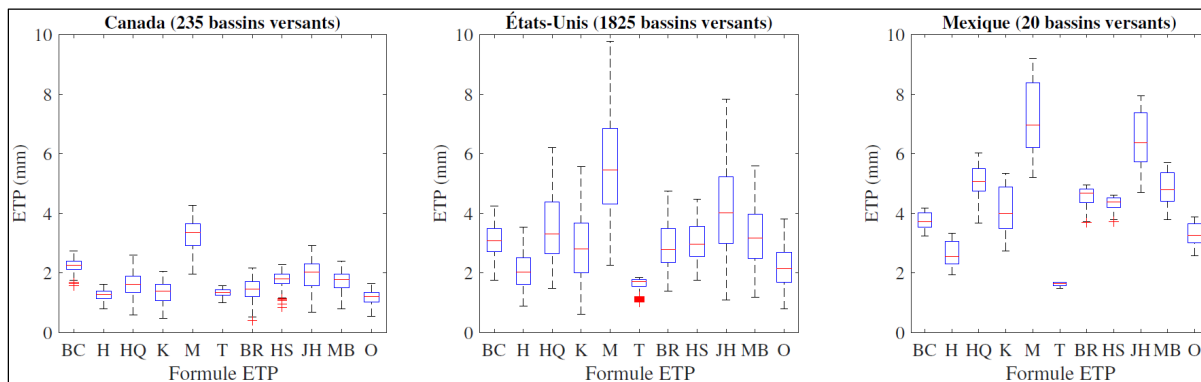


Figure 4.1 Diagrammes à moustaches représentant  $E_{moy}(mm)$  pour les 11 formulations d'ETP à l'étude, par pays

Suite aux calculs des séries d'ETP, les métriques d'analyse  $E_{moy}$  et  $E_{max}$  (section 3.5.1) ont été calculées pour la période historique afin d'en comparer les valeurs avec des périodes futures (ces résultats sont présentés à la section 4.3.2.1 ci-après).

## 4.2 Modélisation hydrologique

Le calage des trois modèles hydrologiques (GR4J, HMETs et Mohyse) a été effectué sur l'ensemble de la période de disponibilité des débits observés. Cette étape est essentielle afin d'assurer une bonne modélisation des débits en climat futur. Pour un bassin versant donné, chaque modèle hydrologique a été calibré 22 fois, soit deux fois par formulation d'ETP. La performance du calage est évaluée avec le critère de Nash-Sutcliffe (NSE). Uniquement le jeu de paramètres le plus performant des deux calages a été conservé. Les Figures 4.2 à 4.6 représentent ces résultats pour l'ensemble des 2080 bassins versants sélectionnés.

La Figure 4.2 présente la distribution des performances (NSE) en calage pour les 11 formulations d'ETP selon le modèle hydrologique. En ce qui concerne la performance générale du modèle, GR4J montre de meilleures performances avec une médiane des NSE de

0,77. Quant à lui, le modèle hydrologique Mohyse performe de manière plutôt constante entre les différentes formules d'ETP. La médiane de ses NSE est de 0,67. HMETs obtient des performances inférieures avec une médiane de 0,62 ainsi que plus de variabilité entre les formulations d'ETP. Il est possible d'observer sur les Figures 4.2 et 4.3 que le modèle hydrologique Mohyse obtient plusieurs horsains inférieurs. Ces résultats sont dus au fait que les bassins versants ont été sélectionnés selon les performances en calage de GR4J et HMETs.

Pour GR4J et HMETs, la formule M est la moins performante alors que c'est la meilleure pour le modèle Mohyse. Considérant que cette formule a été créée pour ce modèle hydrologique (Fortin & Turcotte, 2007), il n'est pas surprenant que cette combinaison soit plus performante.

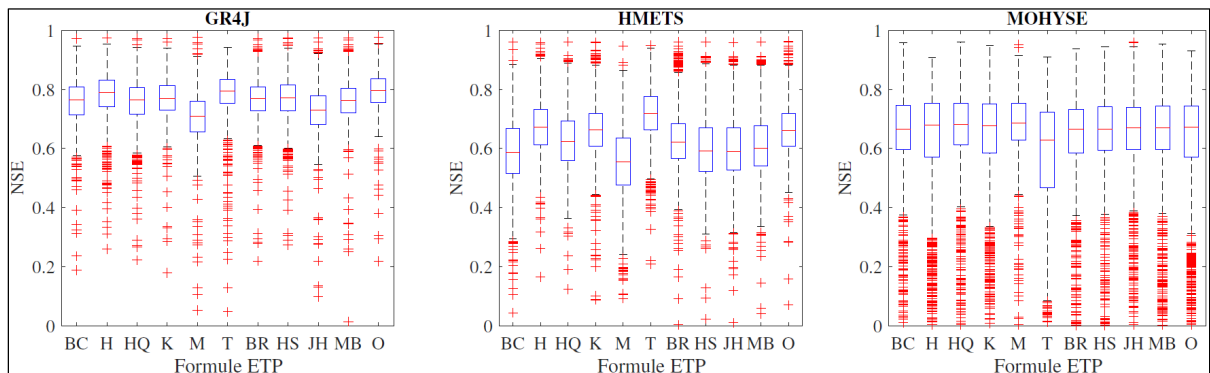


Figure 4.2 Diagrammes à moustaches des performances en calage des trois modèles hydrologiques selon la formulation d'ETP

Les distributions du NSE par pays sont présentées à la Figure 4.3. Malgré une meilleure performance générale de GR4J (Figure 4.2), HMETs obtient des résultats plus robustes pour les 20 bassins versants du Mexique que les deux autres modèles hydrologiques. Ceci dit, les valeurs de performance pour les bassins versants mexicains sont systématiquement plus faibles pour les trois modèles hydrologiques.

Pour le modèle GR4J, les distributions des NSE au Canada et aux États-Unis montrent une meilleure performance et plus de robustesse, sauf pour la formulation de T aux États-Unis.

Au Mexique, la formulation de M semble plus performante pour Mohyse. Ce dernier obtient des distributions de performance très étendues. Généralement, le Canada est le pays pour lequel les valeurs de NSE obtenues lors du calage sont les meilleures.

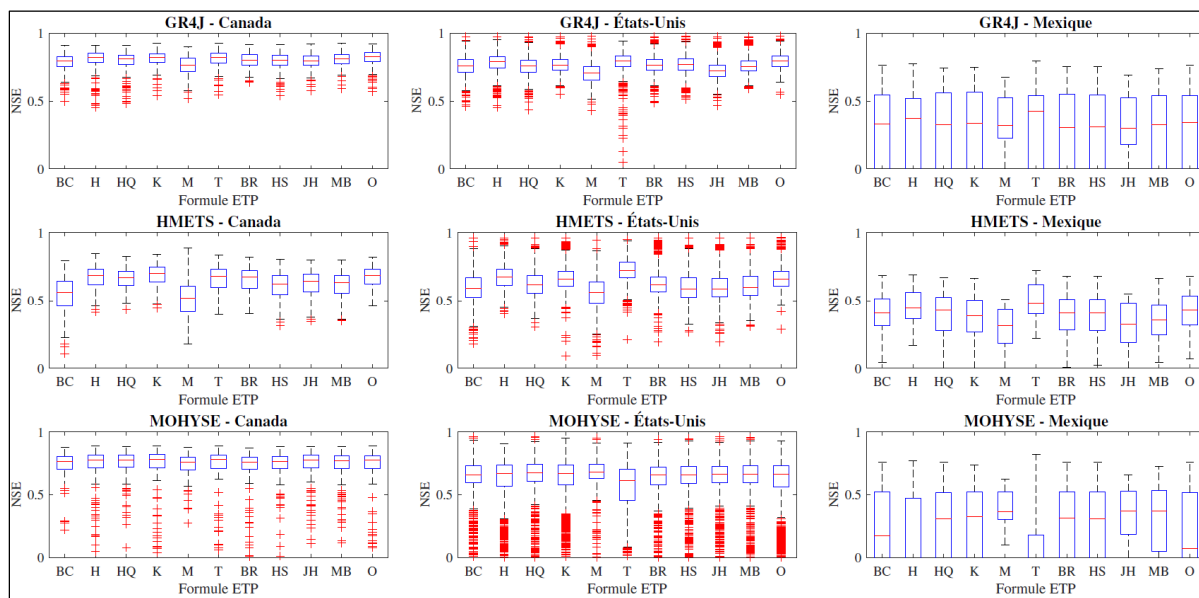


Figure 4.3 Diagrammes à moustaches des performances en calage selon le pays pour les trois modèles hydrologiques

La distribution spatiale des performances en modélisation hydrologique est présentée aux Figures 4.4 (GR4J), 4.5 (HMETs) et 4.6 (Mohyse). Sur ces figures, chaque point représente le centre d'un bassin versant alors que la couleur du point décrit sa performance en calage selon l'échelle de couleurs. Ces cartes permettent d'identifier les zones où les combinaisons de modèles hydrologiques et formulations d'ETP montrent de bonnes ou moins bonnes performances.

Les teintes de bleu étant omniprésentes sur la Figure 4.4, GR4J obtient généralement de bonnes performances sur l'ensemble du territoire nord-américain à l'exception du Mexique, où des points rouges et oranges sont présents. Comme il était aussi possible de voir sur le diagramme à moustaches de la Figure 4.3, les formulations de M et de JH engendrent des performances inférieures, principalement au Nord-Est des États-Unis et au centre du Canada. La formule de T donne lieu aussi à de mauvais calages aux alentours de la Floride.

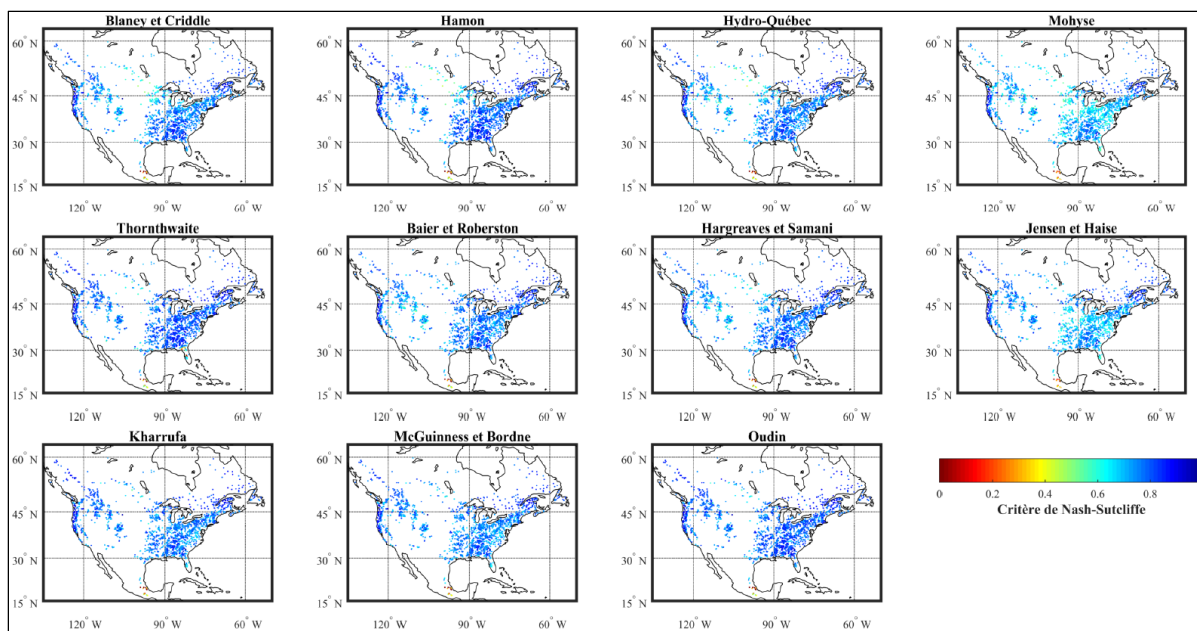


Figure 4.4 Cartes géographiques des NSE en calage pour le modèle hydrologique GR4J en fonction de la formulation d'ETP

La Figure 4.5 illustre bien la variabilité des performances, d'une part, entre les différentes formules d'ETP, ainsi que spatialement, lorsque le modèle hydrologique utilisé est HMETS. En effet, les résultats sont hétérogènes entre les différentes cartes de la figure. La formulation de T est la plus performante pour ce modèle, surtout au Sud-Est des États-Unis, contrairement à GR4J. Les NSE des formules de BC et M sont inférieures aux autres formules avec plusieurs points oranges et rouges répartis sur le territoire. HMETS présente aussi de mauvais calages pour le Mexique.

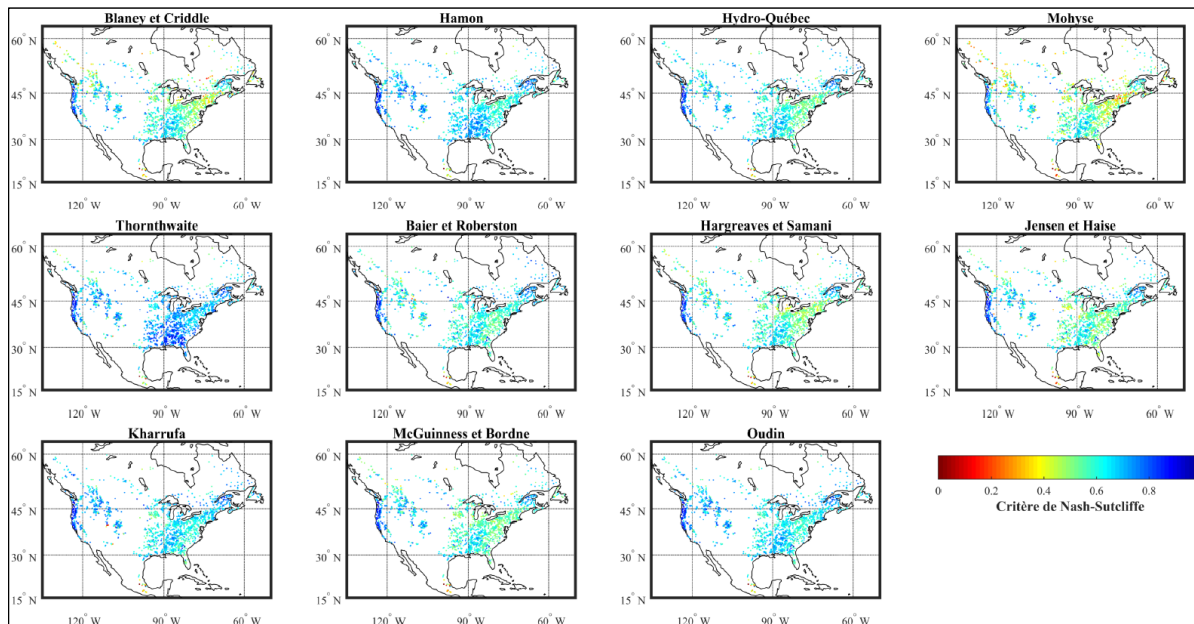


Figure 4.5 Cartes géographiques des NSE en calage pour le modèle hydrologique HMETS en fonction de la formulation d'ETP

Finalement, la Figure 4.6 présente les résultats de la distribution spatiale pour le modèle hydrologique Mohyse. Alors que toutes les cartes sont relativement semblables, une augmentation de points rouges est remarquée par rapport aux autres modèles. Ces points rouges ou même orangés correspondent vraisemblablement aux nombreux horsains (croix rouges) que l'on peut apercevoir sur les diagrammes à moustaches des Figures 4.2 et 4.3. Les mauvaises performances en calage se localisent principalement au Mexique ainsi qu'au centre des États-Unis et du Canada. La formule de T obtient aussi de mauvais NSE vers la Floride.

L'étape de modélisation hydrologique a permis de produire des séries de débits simulés selon les valeurs d'ETP pour chacun des modèles hydrologiques. Par la suite, ces débits simulés ont permis de déterminer les valeurs des indicateurs hydrologiques en période d'étiage 7Q2, 7Q10 et 30Q5 (section 3.5.2) pour la période passée récente (période de référence 1971-2000).

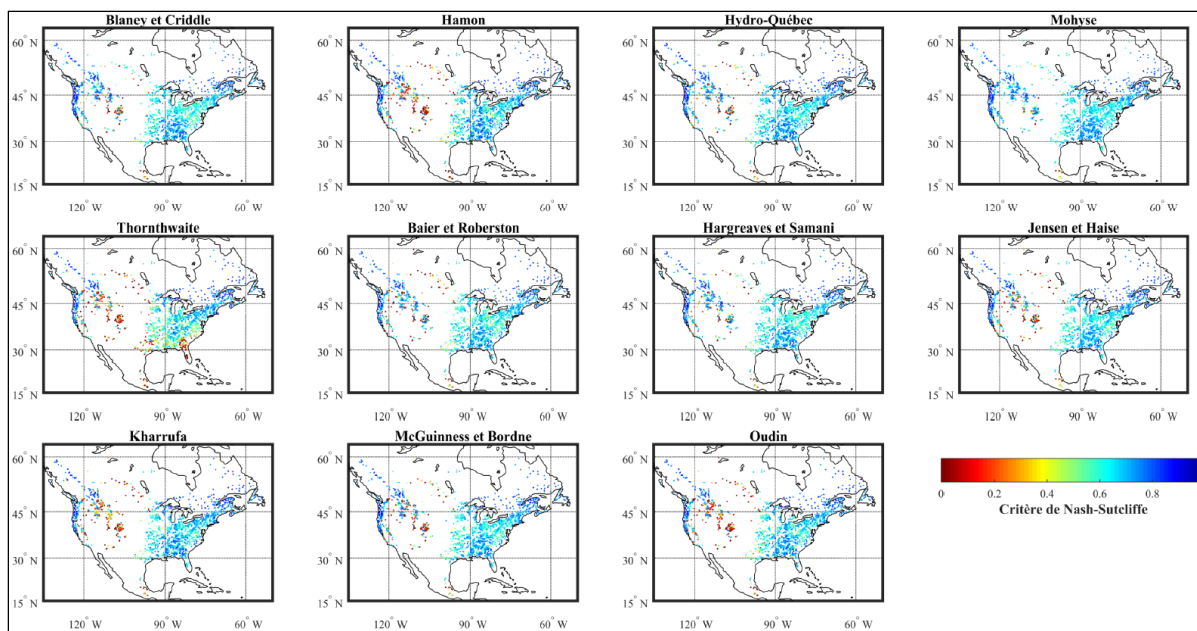


Figure 4.6 Cartes géographiques des NSE en calage pour le modèle hydrologique Mohyse en fonction de la formulation d'ETP

### 4.3 Modélisation climatique

Afin d'évaluer l'impact des changements climatiques sur l'ETP et sur les étiages, 32 scénarios climatiques différents ont été produits pour chacun des deux horizons (2050 et 2080). En effet, les huit modèles climatiques globaux utilisés conjointement avec les deux RCP ont permis de déterminer les données climatiques pour les périodes futures. Ces données climatiques ont ensuite été post-traitées selon les deux méthodes décrites à la section 3.4.2. Par la suite, les sorties corrigées des modèles climatiques (températures et précipitations) ont permis d'estimer les valeurs d'ETP pour les deux horizons et de faire la modélisation hydrologique en climat futur avec les jeux de paramètres préalablement obtenus. Pour des raisons d'espace de stockage et de temps de calcul, les résultats sauvegardés suite à la modélisation hydrologique future sont uniquement les valeurs des cinq indicateurs détaillés à la section 3.5.

#### 4.3.1 Test de Kruskal-Wallis

Le test de Kruskal-Wallis (McDonald, 2014) est un test statistique non-paramétrique utilisé lorsque l'hypothèse de normalité des échantillons n'est pas valable. Le but du test est de déterminer si les échantillons sont statistiquement indépendants. Contrairement à l'ANOVA qui est basée sur la moyenne, le test de Kruskal-Wallis se base sur les rangs. L'hypothèse nulle du test est que le rang moyen est identique pour chacun des groupes. Dans le cadre du projet, ce test permet d'affirmer que les différences entre les résultats obtenus selon les composantes de la chaîne hydroclimatique sont statistiquement significatives.

Ce test a été effectué avec les valeurs des indicateurs en conditions futures pour les trois indicateurs d'étiage. Les quatre groupes utilisés dans le test sont (1) les formulations d'ETP, (2) les modèles hydrologiques, (3) les modèles climatiques et (4) la méthode de post-traitement. Pour chaque groupe, l'hypothèse nulle est rejetée. Par exemple, le test a permis de déterminer que les trois modèles hydrologiques obtiennent des valeurs qui sont statistiquement indépendantes.

#### 4.3.2 Impacts et tendances en climat futur

Dans le but de voir les changements entre le passé récent et le futur, les résultats suivants sont présentés sous forme de delta relatif (exprimé en pourcentage) entre les valeurs d'un indicateur  $i$  pour la période passée et la période future (Équation 4.1).

$$\text{delta relatif}(\%) = \left( \frac{V_{i,\text{futur}} - V_{i,\text{passé}}}{V_{i,\text{passé}}} \right) * 100 \quad (4.1)$$

Où  $V$  représente la valeur de l'indicateur  $i$ , et les indices *passé* et *futur* réfèrent respectivement, aux périodes de référence (1971-2000) et future (horizon 2050 ou 2080). Pour les figures suivantes, les valeurs représentées sont les médianes des deltas relatifs obtenus à l'aide des trois modèles hydrologiques, des huit modèles climatiques et des deux méthodes de post-traitement. Le scénario de base servant de comparaison avec les autres

scénarios futurs est l’horizon 2050 avec le RCP 4,5. Par la suite, l’écart entre les deltas relatifs du scénario de base et de l’un des trois autres scénarios (Horizon 2050 avec RCP 8,5, Horizon 2080 avec RCP 4,5 et Horizon 2080 avec RCP 8,5) est déterminé dans l’objectif d’évaluer les différences entre les scénarios (Équation 4.2). Cette décision a été prise dans le but de mieux faire ressortir les changements qui étaient difficilement visibles lorsque chaque scénario était comparé à la période de référence.

$$\text{delta} (\%) = \text{delta relatif}_{H,RCP} - \text{delta relatif}_{H2050,RCP\ 4,5} \quad (4.2)$$

Où *delta* représente la valeur de l’écart entre les deltas relatifs en pourcentage, *delta relatif* représente la valeur calculée à l’Équation 4.1 et les indices *H* et *RCP* réfèrent respectivement, à l’horizon (2050 ou 2080) et le RCP (4,5 ou 8,5). Ces deltas sont évalués pour chacun des indicateurs. Il est important de noter que l’échelle de couleurs n’est pas pareille pour le *delta relatif* et le *delta (%)* dans les figures qui suivent.

#### 4.3.2.1 Évapotranspiration

Les Figure 4.7 et 4.8 illustrent les deltas relatifs pour les valeurs  $E_{moy}$  (valeurs moyennes des moyennes annuelles d’ETP) et  $E_{max}$  (valeurs maximales des moyennes annuelles d’ETP), respectivement, entre la période passée récente et la période future du scénario de base. La tendance future générale est une augmentation de l’ETP sur l’ensemble du territoire. Les deltas relatifs de  $E_{max}$  (Figure 4.8) sont inférieurs à ceux de  $E_{moy}$  (Figure 4.7).

La tendance générale est une augmentation d’ $E_{moy}$  sur l’ensemble du territoire pour toutes les formulations (Figure 4.7). L’intensité des pourcentages de changement est variable entre les différentes formules ainsi que spatialement. Les augmentations sont de plus grande envergure au Canada ainsi qu’au centre des États-Unis.

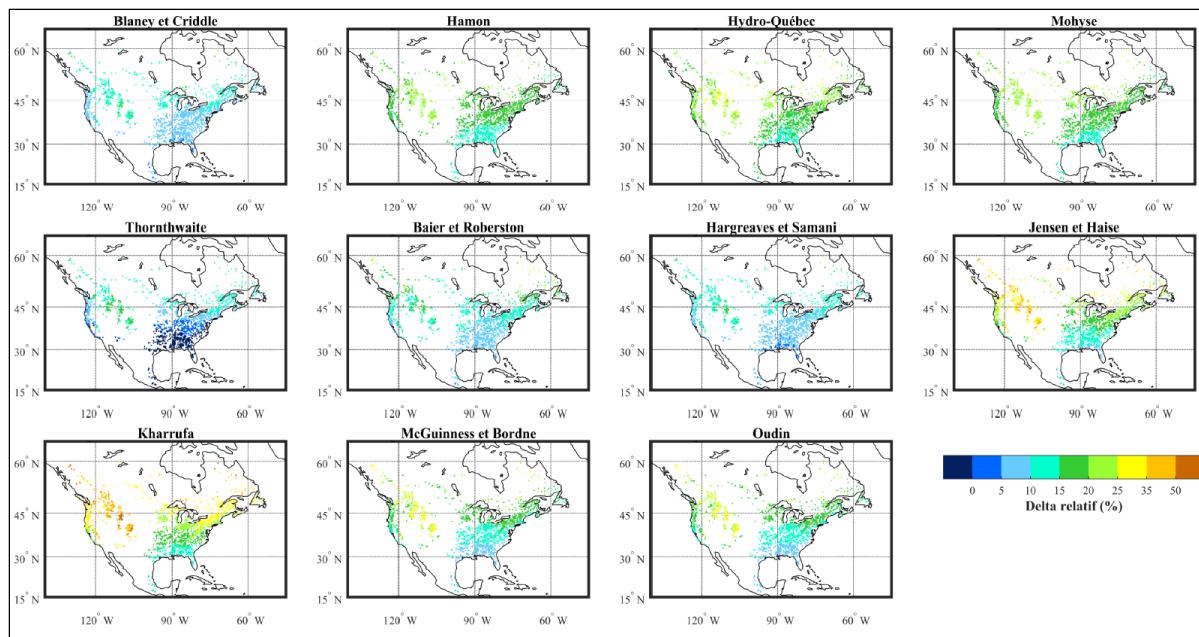


Figure 4.7 Cartes géographiques du delta relatif de  $E_{moy}$  entre la période de référence et l'horizon 2050 avec le RCP 4,5 en fonction de la formulation d'ETP

Les tendances générales montrées à la Figure 4.8 sont similaires à celles de la Figure 4.7. Cependant, les deltas sont inférieurs à ceux du  $E_{moy}$ .

Sur les deux figures, il est possible de remarquer que certains groupes de formules ont des comportements similaires : (1) BC, BR et HS, (2) H, HQ et M, (3) JH et K, et (4) MB et O. Les formulations du groupe (1) obtiennent des changements inférieurs aux autres formulations, avec des pourcentages de 5 % à 15 % généralement. Le groupe (1) engendre des changements moins variables spatialement. Les changements du groupe (2) sont supérieurs à ceux du groupe (1) avec des pourcentages allant majoritairement de 10 % jusqu'à 25 %. Il est aussi possible d'observer plus de variabilité entre les différentes zones climatiques. Tant qu'à lui, le groupe (3) est celui où il est possible d'observer les changements les plus extrêmes. Les pourcentages sont semblables à ceux du groupe (2) mais avec des changements plus importants pour le Canada et les montagnes Rocheuses (plus de 50 % de changement). La formulation de Kharrufa (K) entraîne les plus grandes augmentations de l'ETP, suivie par la formulation de Jensen et Haise (JH). Finalement, les formulations du groupe (4) entraînent plus de variabilité spatiale selon les zones climatiques

avec des pourcentages de changement allant de 5 % à 35 %. Quant à elle, la formulation de Thornthwaite (T) n'a pas les mêmes tendances que les autres. Il est surprenant d'observer un delta négatif, c'est-à-dire une diminution de l'ETP, au Sud-Est des États-Unis ainsi qu'au Mexique avec cette formule.

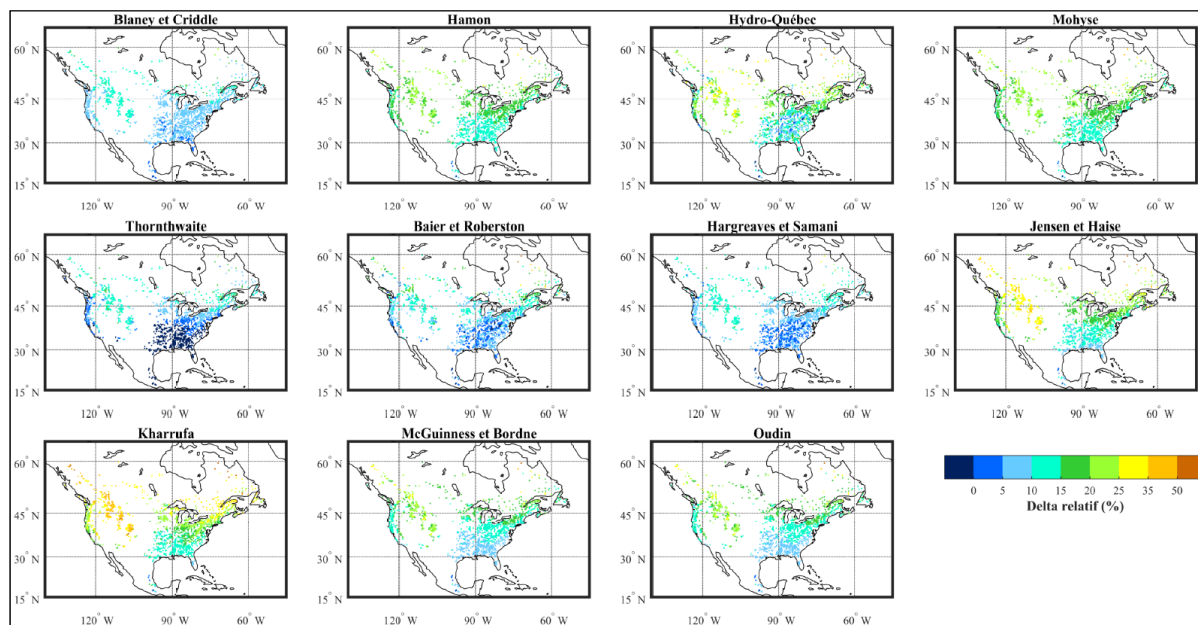


Figure 4.8 Cartes géographiques du delta relatif de  $E_{\max}$  entre la période de référence et l'horizon 2050 avec le RCP 4,5 en fonction de la formulation d'ETP

Par la suite, l'analyse entre les différents scénarios climatiques a été effectuée. Les trois figures suivantes (Figures 4.9 à 4.11) présentent les deltas de  $E_{\text{moy}}$  entre les deltas relatifs de l'horizon 2050 avec le RCP 4,5 et ceux d'un autre scénario (H2050 avec RCP 8,5, H2080 avec RCP 4,5 ou H2080 avec RCP 8,5). Ainsi, les cartes suivantes représentent le pourcentage de changement de  $E_{\text{moy}}$  par rapport au scénario de base. Puisque les résultats pour  $E_{\max}$  sont semblables, les figures relatives à  $E_{\max}$  sont présentées à l'Annexe II.

À la Figure 4.9, l'écart entre le RCP 4,5 et le RCP 8,5 pour l'horizon 2050 est présenté. Ainsi, le RCP 8,5 contribue principalement à une augmentation des valeurs d'ETP de 0% à 10% par rapport au RCP 4,5. Ce pourcentage s'élève jusqu'à 15% pour certaines formules

comme J et HS. Encore une fois, les changements les plus importants sont au Canada et parfois le long des montagnes Rocheuses.

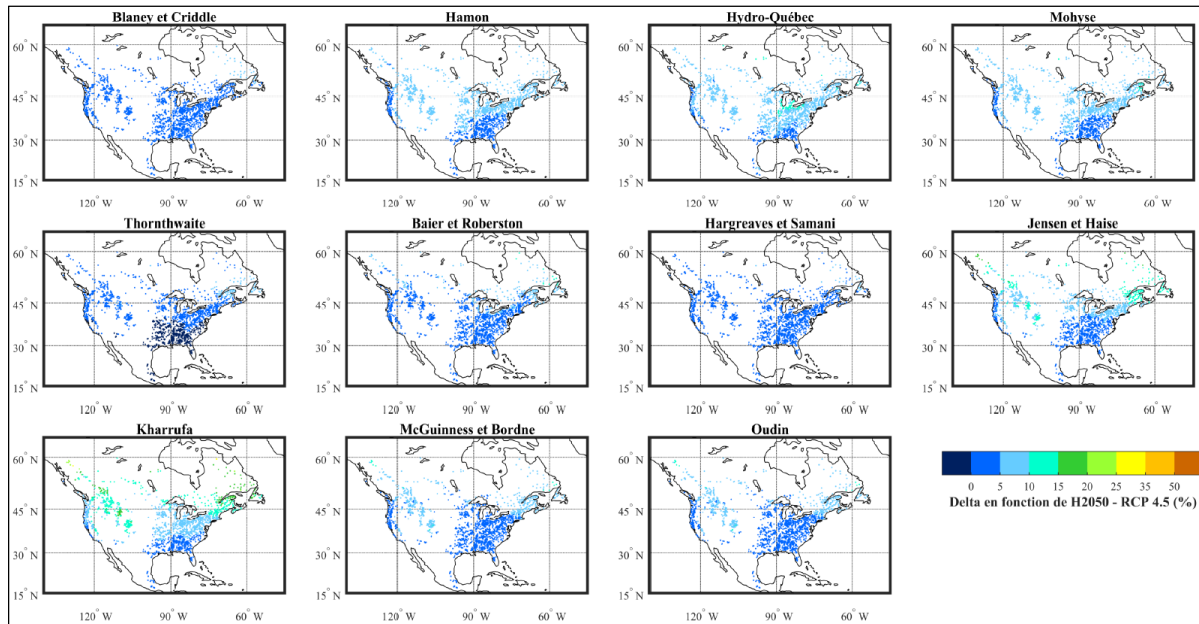


Figure 4.9 Cartes géographiques du delta de  $E_{moy}$  entre le delta relatif de H2050 avec RCP 4,5 et le delta relatif de H2050 avec RCP 8,5 en fonction de la formulation d'ETP

La Figure 4.10 présente les différences lorsque le RCP 4,5 est conservé mais pour les deux horizons. Les pourcentages de changement sont moindres que pour la Figure 4.9, ainsi le RCP a plus d'impact que l'horizon. Les écarts entre les résultats de l'horizon 2050 et ceux de l'horizon 2080 sont généralement entre 0% et 5%.

Finalement, la Figure 4.11 présente les différences entre le scénario de base et le scénario le plus extrême, soit l'horizon 2080 avec le RCP 8,5. Les différences sont considérables et variables entre les formules d'ETP, allant de 5% à 50% de changement.

Pour les trois cas, les écarts de changement pour la formulation de T au sud des États-Unis et au Mexique sont négatifs ce qui signifie que l'ETP diminue encore par rapport au scénario de base qui diminuait déjà.

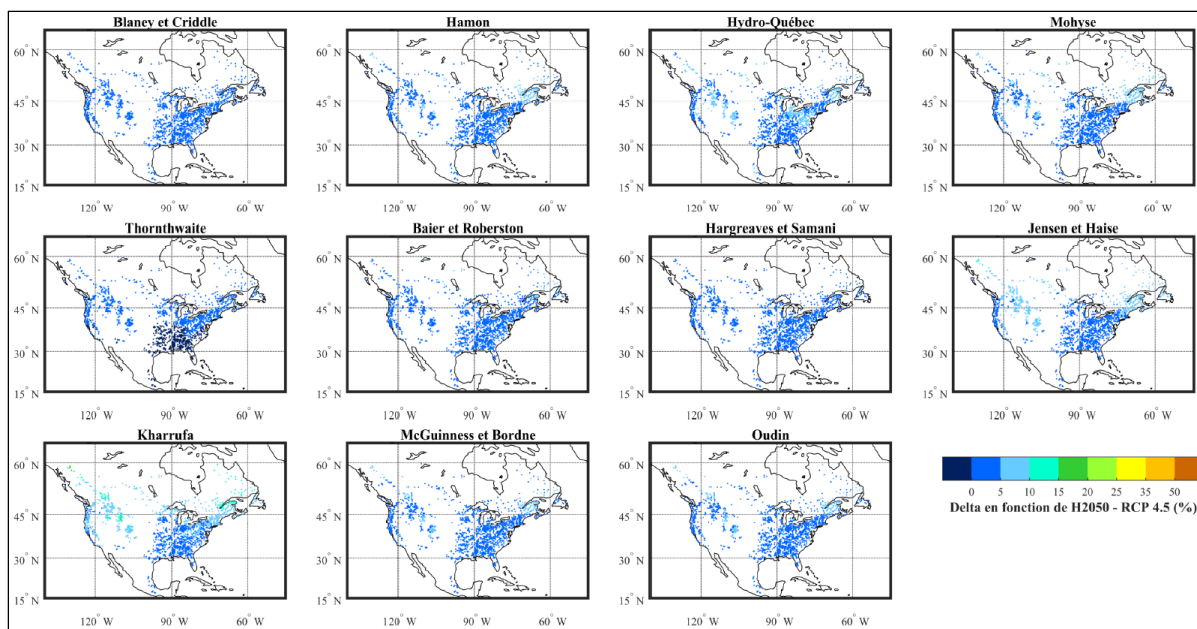


Figure 4.10 Cartes géographiques du delta de  $E_{moy}$  entre le delta relatif de H2050 avec RCP 4,5 et le delta relatif de H2080 avec RCP 4,5 en fonction de la formulation d'ETP

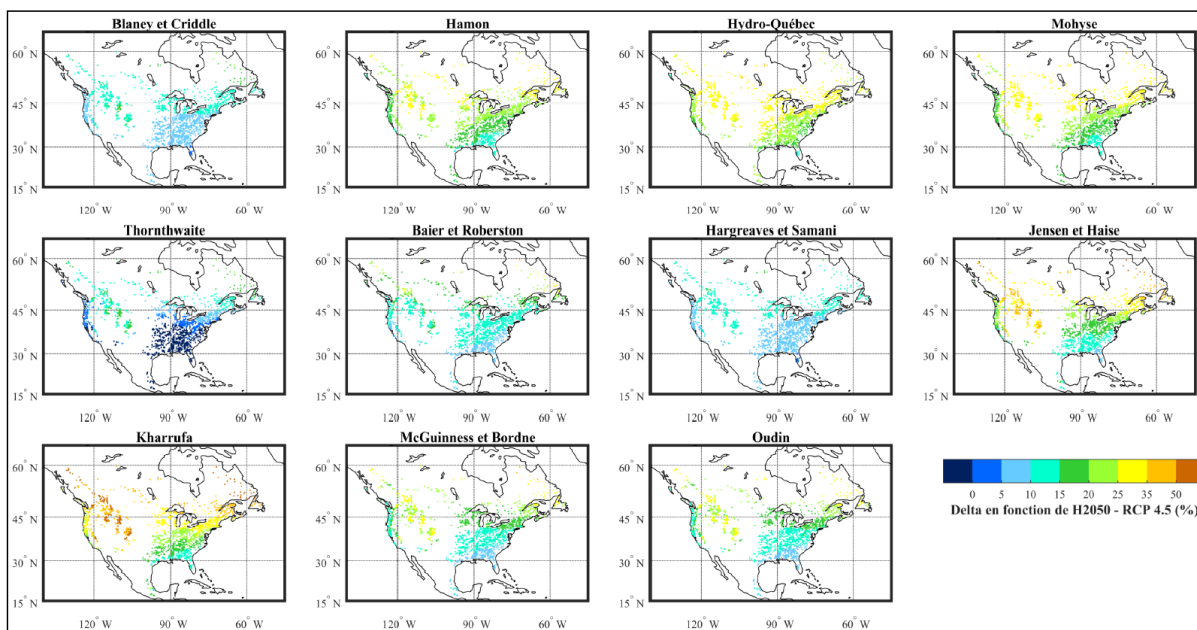


Figure 4.11 Cartes géographiques du delta de  $E_{moy}$  entre le delta relatif de H2050 avec RCP 4,5 et le delta relatif de H2080 avec RCP 8,5 en fonction de la formulation d'ETP

#### 4.3.2.2 Débits d'été

La même analyse des deltas a été effectuée pour les trois indicateurs de débit en période d'été. Les valeurs présentées sont la valeur médiane issue des trois modèles hydrologiques. Les Figures 4.12 à 4.14 présentent les deltas relatifs entre la période passée récente et l'horizon 2050 avec le RCP 4,5.

La Figure 4.12 illustre les deltas relatifs pour les valeurs moyennes du débit d'été sur une plage de sept jours consécutifs et de récurrence deux ans (7Q2). Les deltas relatifs pour les valeurs moyennes du débit d'été sur une plage de sept jours consécutifs et de récurrence dix ans (7Q10) sont présentés à la Figure 4.13.

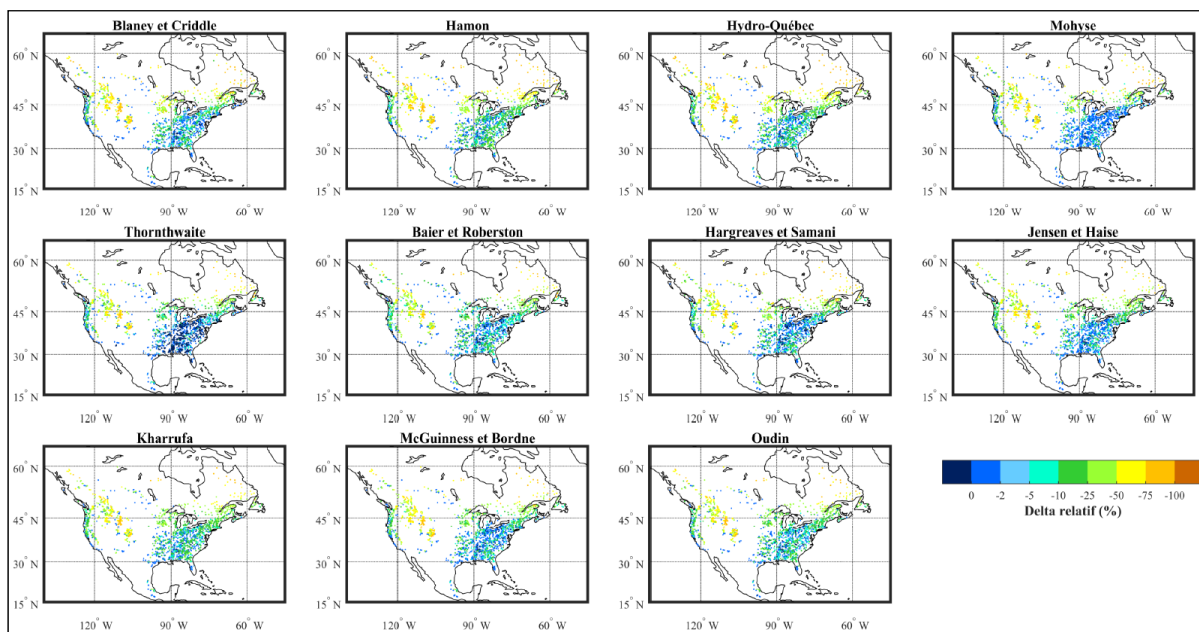


Figure 4.12 Cartes géographiques du delta relatif du 7Q2 entre la période de référence et l'horizon 2050 avec le RCP 4,5 en fonction de la formulation d'ETP

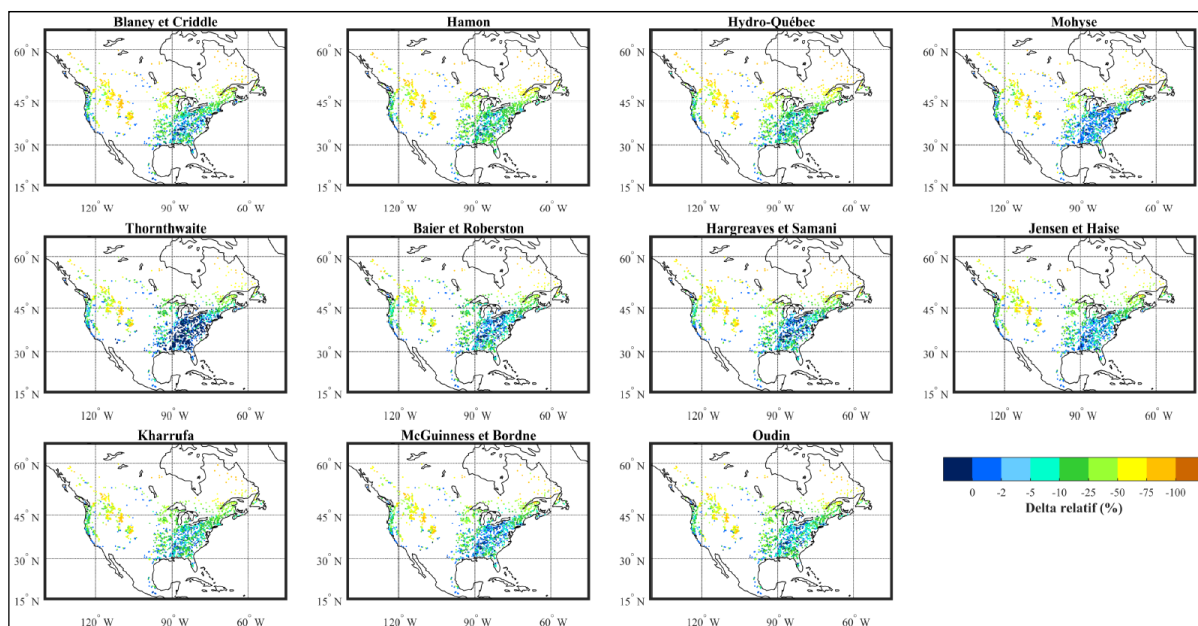


Figure 4.13 Cartes géographiques du delta relatif du 7Q10 entre la période de référence et l'horizon 2050 avec le RCP 4,5 en fonction de la formulation d'ETP

Contrairement aux deltas relatifs calculés directement sur les valeurs d'ETP, il y a plus de variabilité spatiale en ce qui concerne les indicateurs d'étiage. Pour le 7Q2 (Figure 4.12) et le 7Q10 (Figure 4.13), une diminution des débits d'étiage est observable, ce qui concorde avec l'augmentation de l'ETP. Le pourcentage de diminution est variable, principalement selon la zone climatique. C'est au Québec et dans les Rocheuses que la diminution est la plus importante, allant jusqu'à un pourcentage de changement au-delà de 100%. Même si les formulations de K et JH engendrent plus d'ETP en conditions futures, leurs débits d'étiage n'obtiennent pas des diminutions plus importantes que les autres formulations d'ETP. Pour la formule de T, une augmentation du 7Q2 et du 7Q10 est observable au Sud-Est des États-Unis.

Par la suite, la Figure 4.14 présente les deltas relatifs des valeurs moyennes du débit d'étiage sur une plage de 30 jours consécutifs et de récurrence cinq ans (30Q5). Les résultats diffèrent des deux autres indicateurs d'étiage. Malgré des diminutions pour la majorité des bassins versants, une augmentation du 30Q5 est observable pour une certaine quantité de bassins

situés à l'Est des États-Unis, pour l'ensemble des formulations d'ETP. Ainsi, sur une plus longue période (30 jours), le débit d'étiage n'a pas tendance à diminuer pour ce secteur.

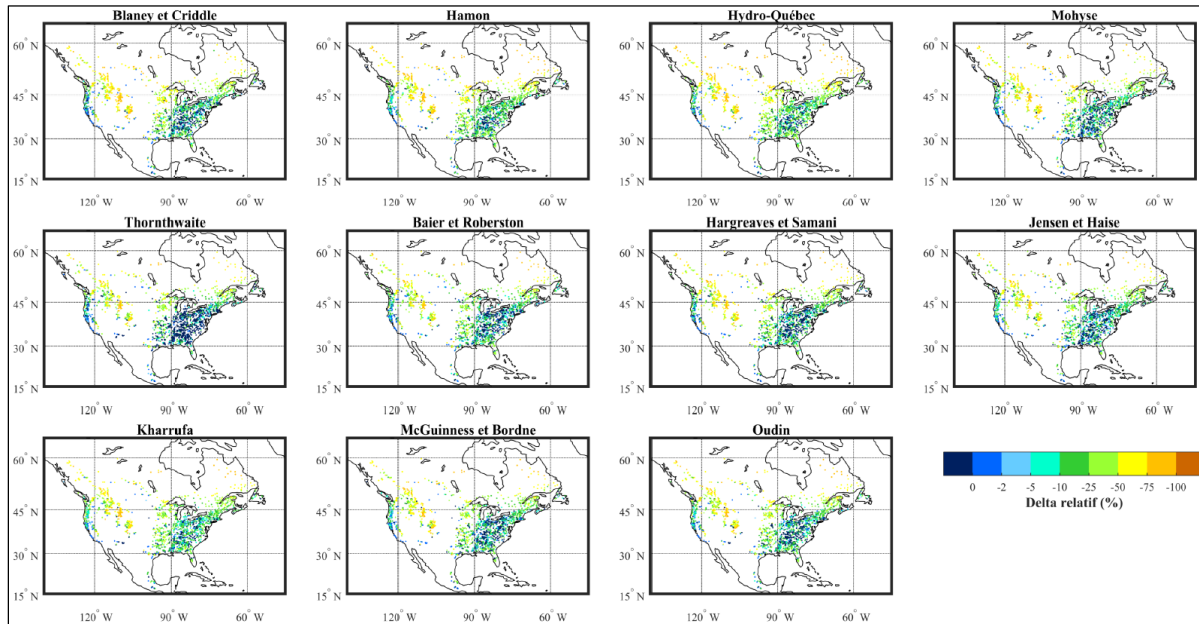


Figure 4.14 Cartes géographiques du delta relatif du 30Q5 entre la période de référence et l'horizon 2050 avec le RCP 4,5 en fonction de la formulation d'ETP

Les Figures 4.15 à 4.17 illustrent les différences entre le scénario de référence (Horizon 2050 avec le RCP 4,5) et le scénario le plus extrême, soit l'horizon 2080 avec le RCP 8,5, pour les trois indicateurs hydrologiques d'étiage (7Q2, 7Q10 et 30Q5). Pour les trois indices, les figures relatives aux scénarios intermédiaires (Horizon 2050 avec RCP 8,5 et Horizon 2080 avec RCP 4,5) sont présentées à l'Annexe III.

Ces trois figures sont similaires ce qui démontre que les changements entre l'horizon 2050 avec le RCP 4,5 et l'horizon 2080 avec le RCP 8,5 ont sensiblement les mêmes proportions pour les trois métriques d'étiage. Alors que des changements plus importants entre la période actuelle et l'horizon 2050 avec le RCP 4,5 étaient observables dans certaines zones tel que le Québec, il y a faible pourcentage de changement entre les différents scénarios futurs pour ce secteur pour l'ensemble des formulations d'ETP.

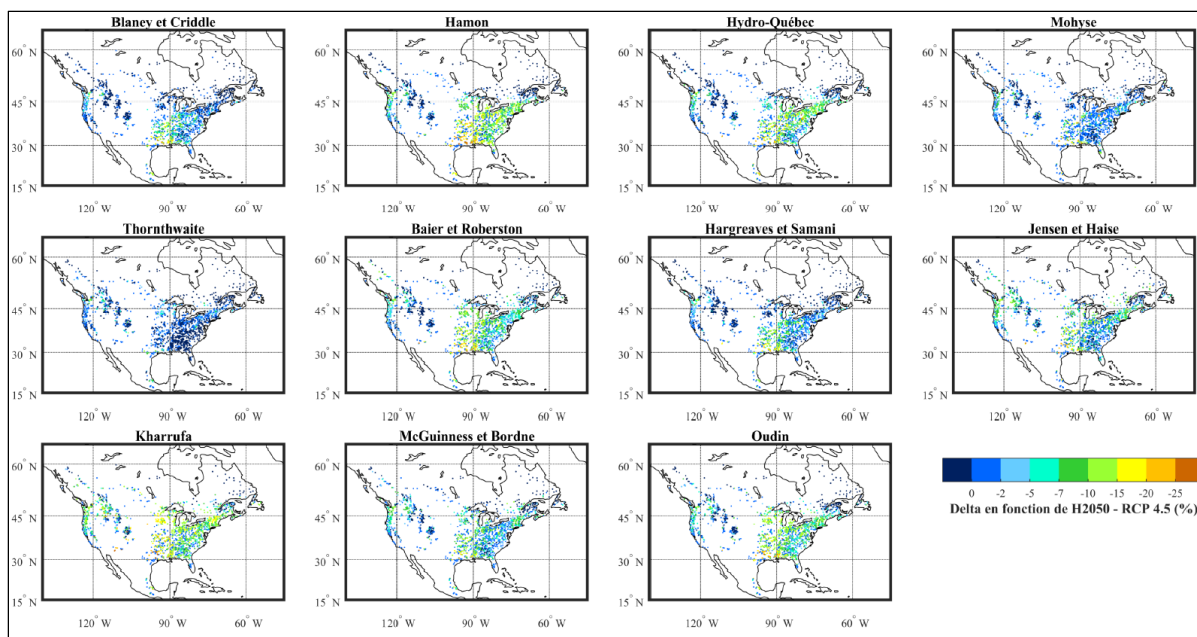


Figure 4.15 Cartes géographiques du delta du 7Q2 entre le delta relatif de H2050 avec RCP 4,5 et le delta relatif de H2080 avec RCP 8,5 en fonction de la formulation d'ETP

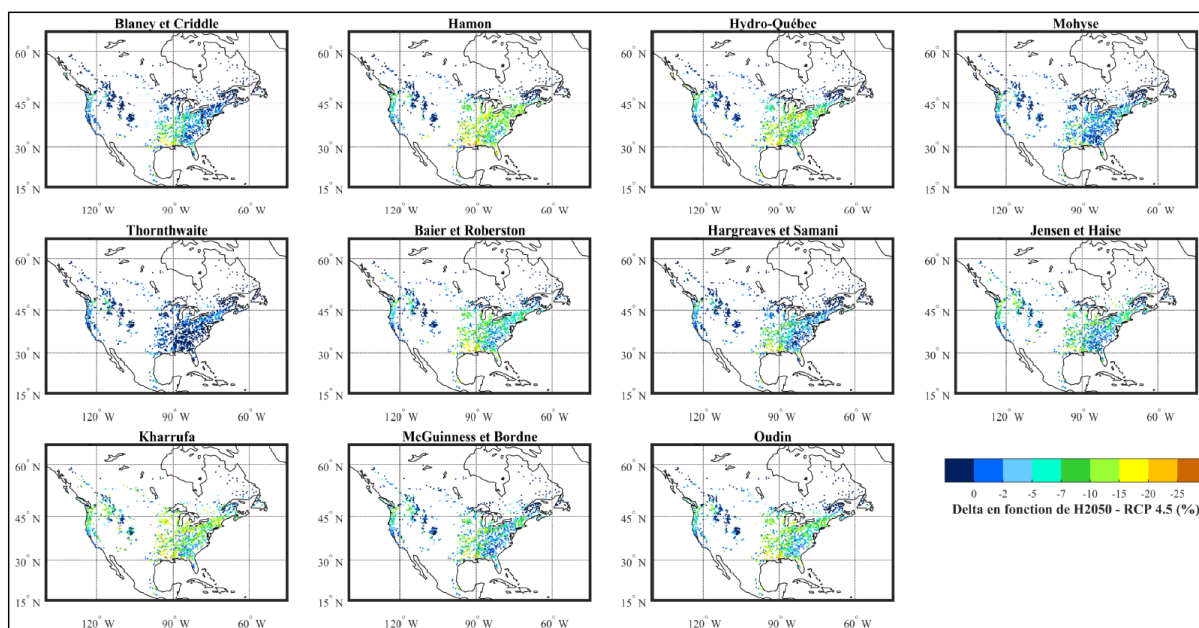


Figure 4.16 Cartes géographiques du delta du 7Q10 entre le delta relatif de H2050 avec RCP 4,5 et le delta relatif de H2080 avec RCP 8,5 en fonction de la formulation d'ETP

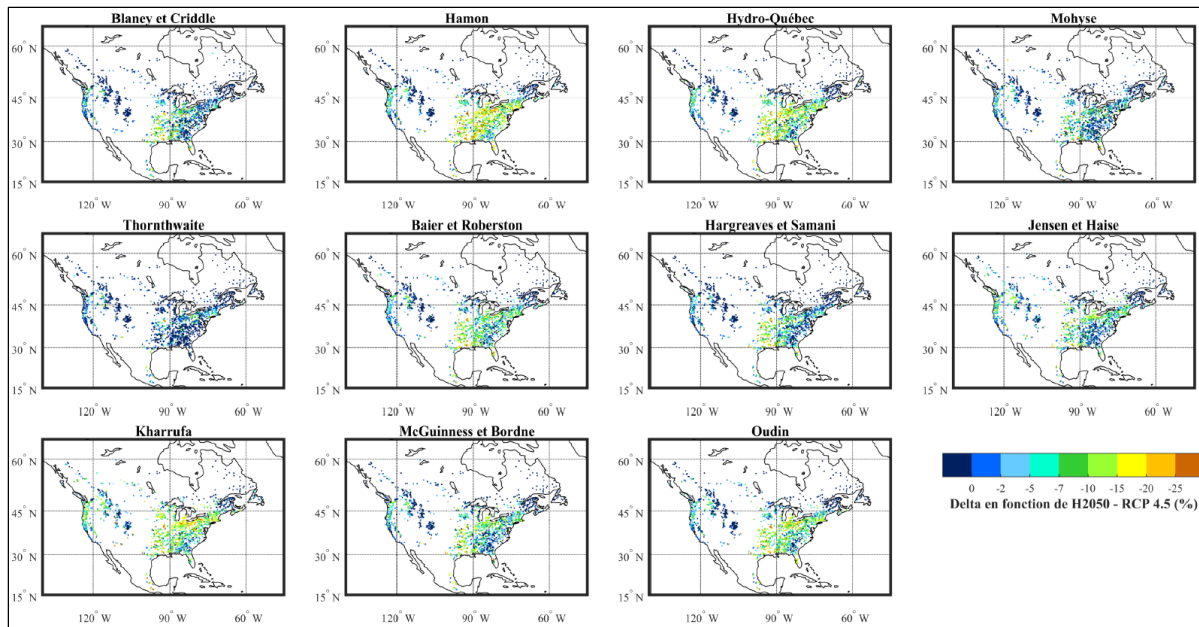


Figure 4.17 Cartes géographiques du delta du 30Q5 entre le delta relatif de H2050 avec RCP 4,5 et le delta relatif de H2080 avec RCP 8,5 en fonction de la formulation d'ETP

### 4.3.3 Formulation de Thornthwaite

Comme il est possible d'observer sur les figures précédentes, la formulation d'ETP de Thornthwaite (T) produit des résultats qui s'opposent à ceux des dix autres formulations, pour des bassins versants situés au Sud-Est des États-Unis et au Mexique principalement.

Pour ces zones, une diminution des valeurs d'ETP ainsi qu'une augmentation des débits d'étiage est à prévoir en climat futur selon T. Alors que les températures futures augmentent pour tous les modèles climatiques utilisés, il est surprenant d'observer une diminution de l'ETP, considérant que la formule de T est basée sur la température.

Dans les Équations 4.3 à 4.5,  $DL$  représente la durée du jour (h/j),  $T_m$  représente la température moyenne de l'air ( $^{\circ}\text{C}$ ) et  $T_{mm}$  représente la température mensuelle moyenne de l'air ( $^{\circ}\text{C}$ ). Alors que la partie  $(DL/360)$  de l'Équation 4.3 reste constante dans le futur, la troisième partie de cette équation est plus critique pour certains bassins versants. En étudiant la décomposition de la formule pour quelques bassins versants du secteur, il est observable

que les températures moyennes de l'air ( $T_m$ ) augmentent alors que les températures mensuelles moyennes ( $T_{mm}$ ) augmentent encore plus considérablement. Puisqu'un est divisé par l'autre, cette partie de l'équation diminue malgré l'effet de  $K$  qui augmente.

$$ETP_T = 16 \left( \frac{DL}{360} \right) \left( \frac{10T_m}{I} \right)^K \quad (4.3)$$

$$I = \sum_{n=1}^{12} \left( \frac{T_{mm}}{5} \right)^{1,514} \quad (4.4)$$

$$K = 0,49239 + 1,792 * I * 10^{-2} - 0,771 * I^2 * 10^{-4} \quad (4.5)$$

La formulation de Thornthwaite ne s'adapte pas bien en changements climatiques pour cette zone de l'Amérique du Nord. Il est donc conseillé d'utiliser cette formule avec précautions dans les études d'impact en climat futur.

#### 4.4 Enveloppe d'incertitude de la modélisation hydroclimatique

Dans le cadre de ce projet, l'analyse de décomposition de la variance (voir section 3.6) est utilisée afin d'estimer l'incertitude reliée à chaque composante de la chaîne de modélisation hydroclimatique. Ainsi, cette analyse a été réalisée dans plusieurs conditions afin d'évaluer l'impact d'éléments différents sur l'incertitude.

Les cinq composantes de la chaîne évaluées dans cette étude sont : (1) la formulation d'ETP (10 éléments), (2) le modèle hydrologique (3 éléments), (3) le modèle climatique (8 éléments), (4) la méthode de post-traitement (2 éléments) et (5) le RCP (2 éléments).

Pour les figures de la présente section, le pourcentage de variance d'un indicateur est illustrée par bassin versant pour chacune des composantes. L'analyse a été effectuée sur les valeurs des débits d'étiage en  $m^3/s$ . Les résultats des analyses pour les métriques relatives à l'ETP

( $E_{moy}$  et  $E_{max}$ ) ne sont pas présentés dans ce chapitre puisque plus de 95% de la variance est attribuable à la formulation d'ETP et que le modèle hydrologique n'a aucun impact sur ces indicateurs dans la chaîne de modélisation, ce qui est moins pertinent pour la présente étude.

Vu le comportement de la formule de Thornthwaite en climat futur (voir section 4.3.3), les résultats obtenus avec cette formule sont exclus des analyses de décomposition de la variance présentées dans ce chapitre. Comme cette analyse vise à déterminer la contribution du choix de la formule d'ETP dans la chaîne de modélisation hydroclimatique, l'utilisation de T dans l'analyse impacte l'estimation de l'incertitude liée à cette composante de la chaîne. À des fins de comparaison, les figures des analyses incluant la formule de T sont placées à l'Annexe IV.

#### **4.4.1 Climat passé récent**

L'analyse de décomposition de la variance a premièrement été effectuée en climat passé récent, c'est-à-dire en considérant les formulations d'ETP et les modèles hydrologiques, pour chacun des indicateurs d'étiage étudiés.

Pour le 7Q2 (Figure 4.18), la médiane des variances associées à l'ETP (E) est de 35,8% alors qu'elle est de 92,2% pour le modèle hydrologique (H). Pour les bassins versants canadiens uniquement, ces pourcentages se situent à 15,2% (E) et à 95,7% (H). Aux États-Unis, les valeurs sont de 38,5% (E) et 91,5% (H), tandis qu'au Mexique, elles se situent à 50,0% (E) et à 89,0% (H). Ainsi, la contribution de la formulation d'ETP au Canada est fortement inférieure à celle du Mexique. Les pourcentages de variance des composantes ont une somme totale supérieure à 100 % puisque les pourcentages de variance des interactions entre les composantes sont aussi pris en compte dans la valeur de variance d'une composante. Ainsi, dans le cas de la période de référence, le pourcentage de variance de l'ETP (E) comprend la variance de E (7,9 %) uniquement et de l'interaction E-H (25,9 %). Ce constat est valable pour l'ensemble des pourcentages de l'étude. Ainsi, la majorité de la variance de la formule d'ETP est associée à l'interaction entre le modèle hydrologique et la formule d'ETP.

En ce qui concerne le 7Q10 (Figure 4.19), l'incertitude associée à la formulation d'ETP diminue (variance médiane = 26,2%) alors que celle associée au modèle hydrologique reste semblable à celle du 7Q2 (variance médiane = 92,8%).

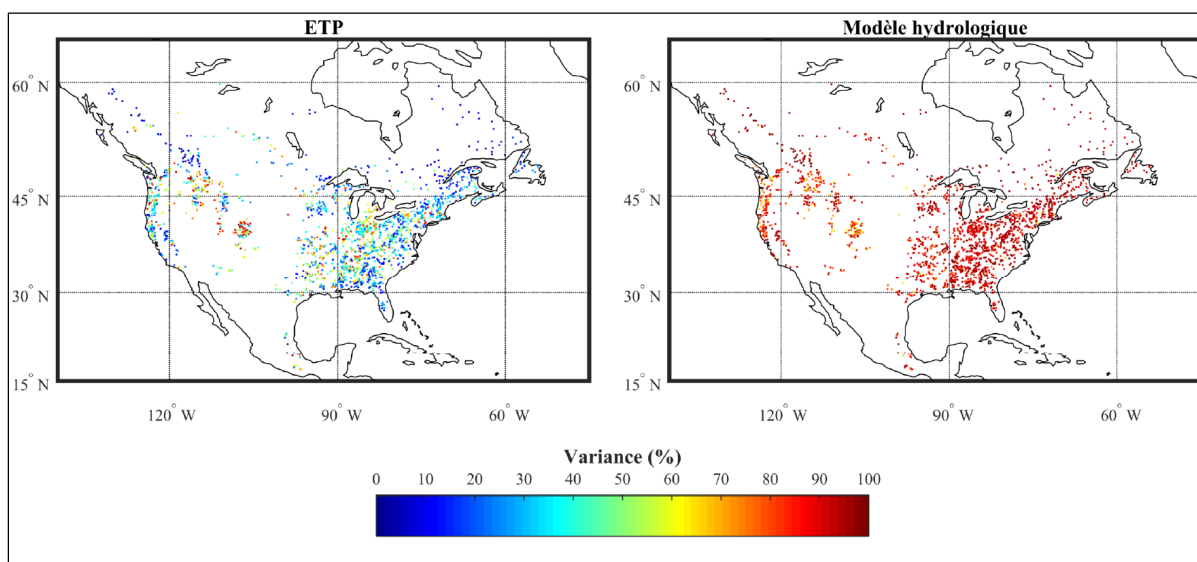


Figure 4.18 Analyse de décomposition de la variance pour l'indicateur 7Q2 et pour la période passée récente

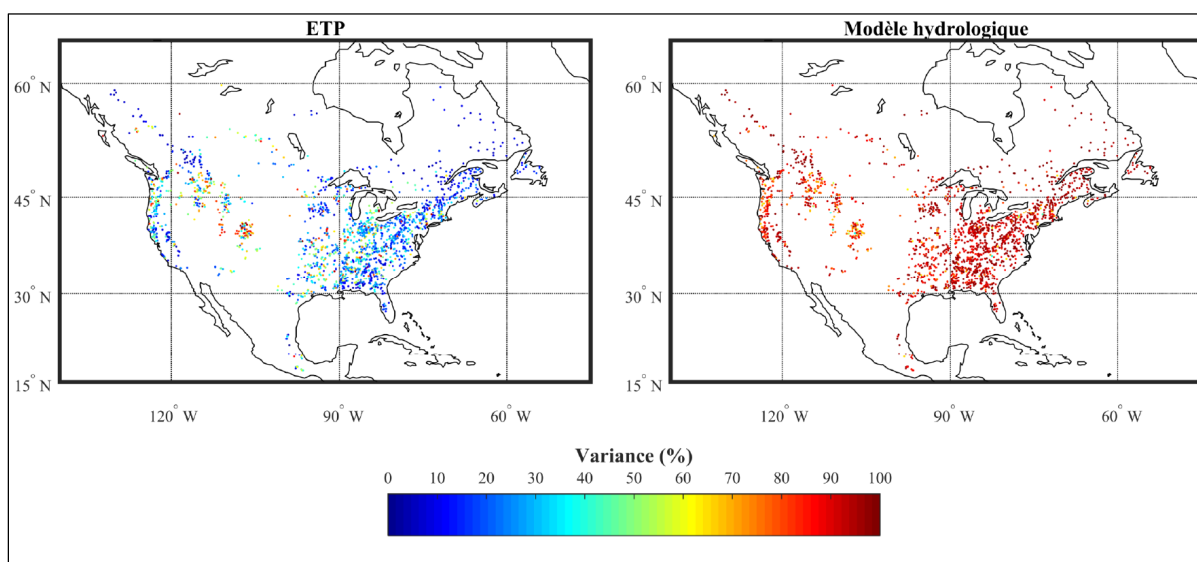


Figure 4.19 Analyse de décomposition de la variance pour l'indicateur 7Q10 et pour la période passée récente

Il est possible d’observer à la Figure 4.20 que l’incertitude reliée à la formulation d’ETP est plus grande lorsqu’elle est évaluée sur une plus grande période (30 jours pour le 30Q5 versus 7 jours pour le 7Q2 et 7Q10). Pour le 30Q5, la variance médiane de l’ETP est de 48,8% alors que celle du modèle hydrologique est de 81,8%.

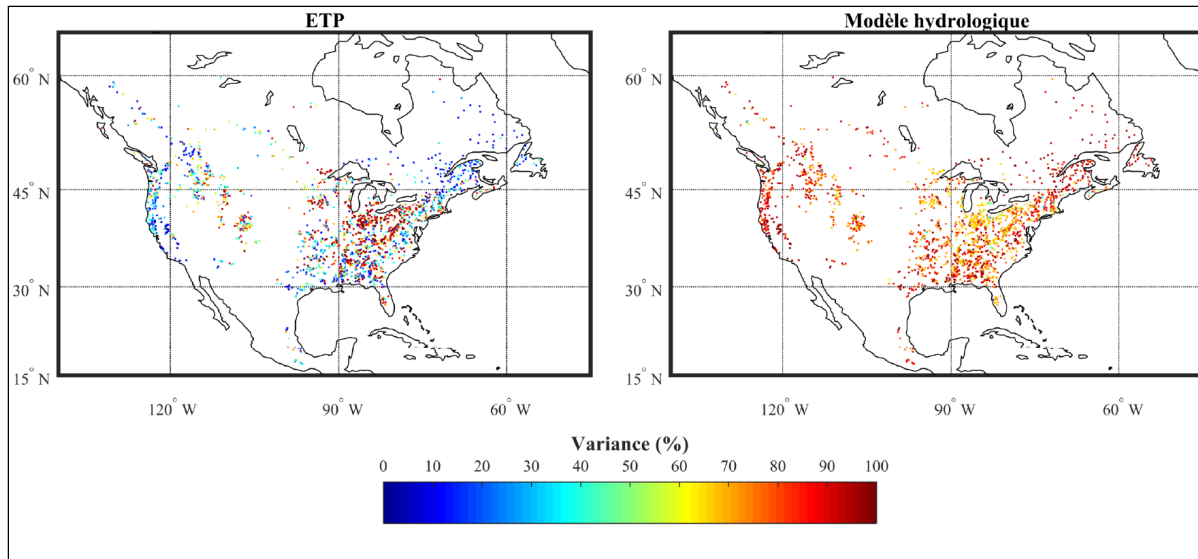


Figure 4.20 Analyse de décomposition de la variance pour l’indicateur 30Q5 et pour la période passée récente

#### 4.4.2 Climat futur

Afin d’évaluer la variance des composantes en contexte climatique futur, l’analyse de décomposition de la variance a été réalisée pour les deux périodes futures (2041-2070 et 2071-2100). Les figures suivantes présentent uniquement les résultats pour l’horizon 2080. Les figures relatives à l’horizon 2050 sont disponibles à l’Annexe V.

Les diagrammes à moustaches présentés à la Figure 4.21 démontrent la distribution des variances de chacune des composantes de la chaîne de modélisation hydrologique pour les trois indicateurs d’étiage. Alors que les distributions pour le 7Q2 et le 7Q10 sont semblables, les diagrammes du 30Q5 démontrent des résultats différents. En effet, pour ce dernier indicateur, une plus grande part de la variance expliquée est associée à la formulation d’ETP,

de même qu'au modèle climatique, à la méthode de post-traitement et au RCP. La variance expliquée par le modèle hydrologique, bien qu'elle demeure importante, est diminuée.

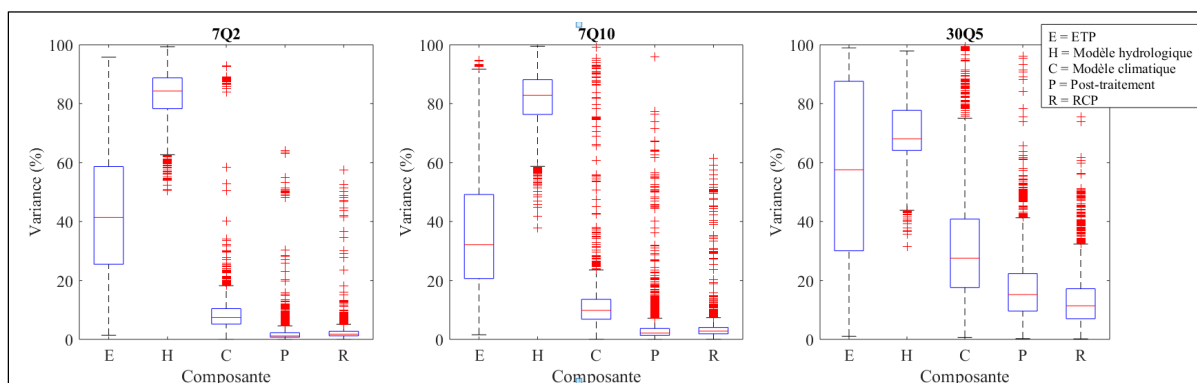


Figure 4.21 Diagrammes à moustaches de la variance des composantes de la chaîne hydroclimatique par indicateur d'étiage pour l'ensemble des bassins versants (Horizon 2080)

La Figure 4.22 montre la distribution spatiale de la variance expliquée du 7Q2 par les composantes de la chaîne de modélisation pour l'horizon 2080. Le modèle hydrologique montre la plus grande variance pour la majorité du territoire avec une médiane de 84,3 %. La médiane de la variance pour la formulation d'ETP est de 41,4 % tandis que celle du modèle climatique est 7,4 %. Les médianes de la variance pour la méthode de post-traitement et le RCP sont, respectivement, de 1,2 % et 1,8 %.

Si la formulation de T est incluse dans l'analyse de décomposition de la variance, le pourcentage médian de la variance de la formulation d'ETP augmente à 50,9 % tandis que celle du modèle hydrologique diminue à 79,3 %. Les médianes des variances pour les composantes demeurent semblables avec des pourcentages de 6,9 % pour le modèle climatique, 1,1 % pour la méthode de post-traitement et 1,6 % pour le RCP. Ainsi, cette formulation a beaucoup d'influence sur les résultats vu sa divergence, c'est pourquoi elle est exclue des analyses.

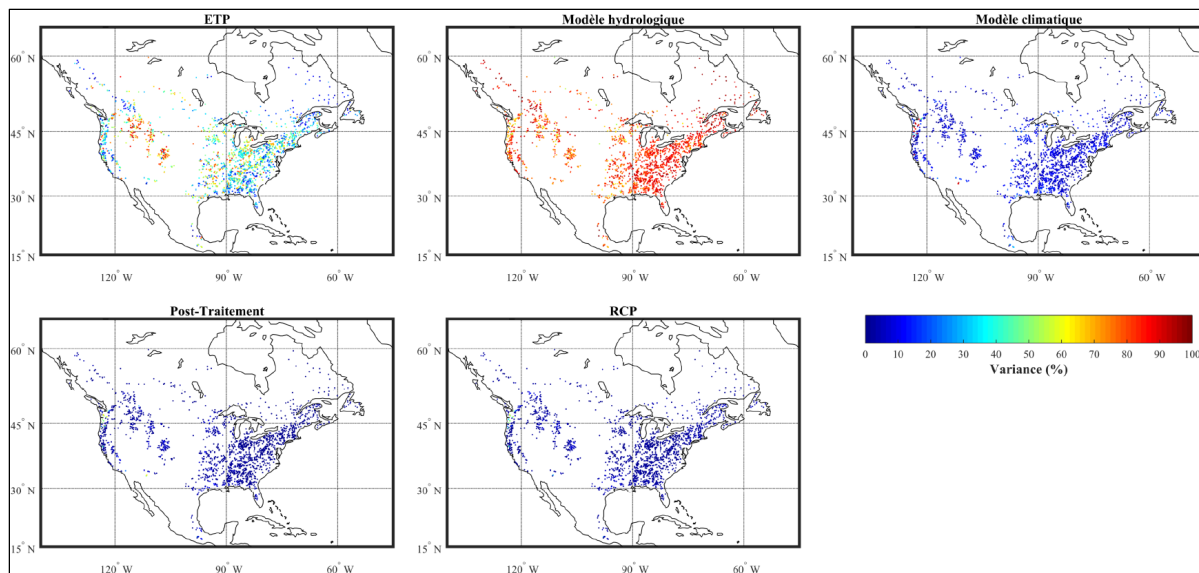


Figure 4.22 Analyse de décomposition de la variance du 7Q2 pour l'horizon 2080

La Figure 4.23 illustre la distribution spatiale des pourcentages de variance du 7Q10 pour l'horizon 2080. Les résultats sont semblables à ceux de la figure précédente malgré que la variance associée à l'ETP diminue un peu avec une valeur médiane de 32,1 %. La médiane de la variance est de 82,8 % pour le modèle hydrologique, de 9,8 % pour le modèle climatique, de 2,1 % pour la méthode de post-traitement et de 2,8 % pour le RCP.

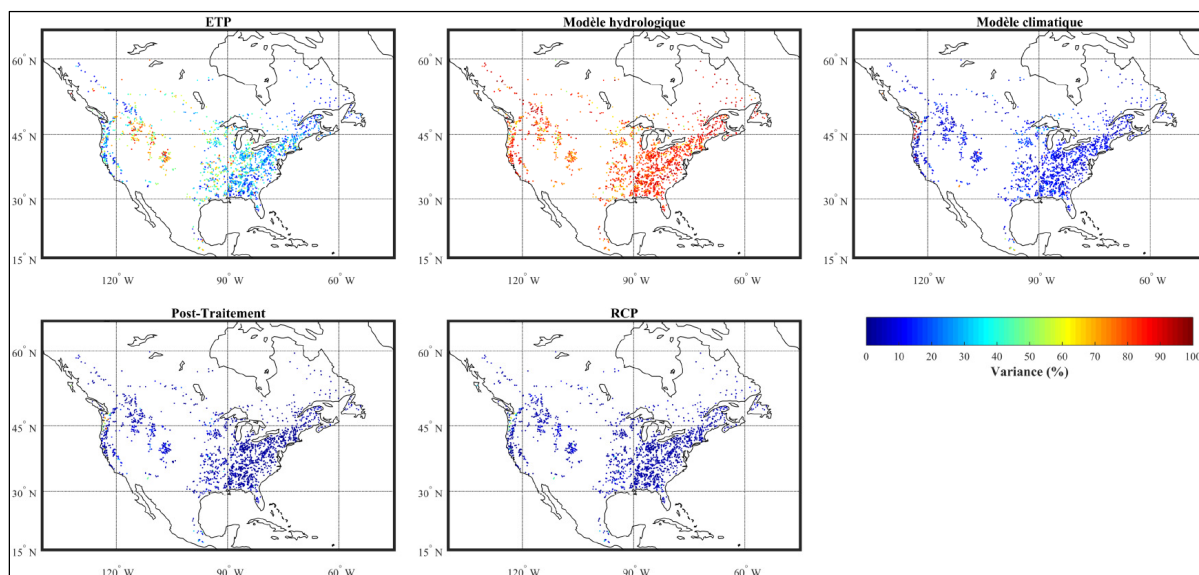


Figure 4.23 Analyse de décomposition de la variance du 7Q10 pour l'horizon 2080

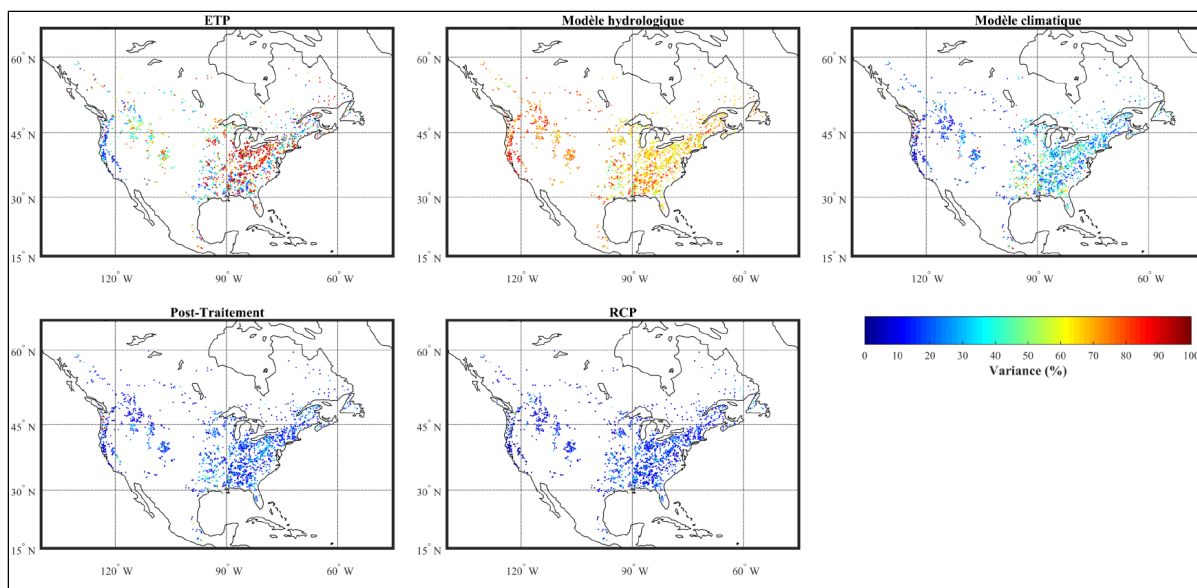


Figure 4.24 Analyse de décomposition de la variance du 30Q5 pour l'horizon 2080

Finalement, la Figure 4.24 montre les pourcentages de variance du 30Q5 en fonction de l'emplacement du bassin versant. Comme il est aussi possible de le remarquer sur les diagrammes à moustaches de la Figure 4.21, les variances expliquées par les composantes de la modélisation climatique (C, R et P) augmentent considérablement pour cette métrique. Alors que la médiane de la variance du modèle climatique passe à 27,5 %, la méthode de post-traitement et le RCP augmentent respectivement à 15,2 % et 11,4 %. La contribution du modèle hydrologique diminue, passant à une médiane de 68,1 %, alors que la contribution de l'ETP augmente à 57,6 %.

Le Tableau 4.1 résume les pourcentages médians de variance selon les trois indicateurs d'étiage ce qui permet de bien différencier les résultats. Ainsi, les pourcentages de variance des composantes ne somment pas à une valeur de 100 % puisque les valeurs dans le tableau suivant représentent la somme de toutes les interactions possibles avec les autres composantes.

Tableau 4.1 Pourcentages médians des variances des composantes en fonction de l'indicateur d'étiage pour l'horizon 2080

	<b>E</b>	<b>H</b>	<b>C</b>	<b>P</b>	<b>R</b>
<b>7Q2</b>	41,4%	84,3%	7,4%	1,2%	1,8%
<b>7Q10</b>	32,1%	82,8%	9,8%	2,1%	2,8%
<b>30Q5</b>	57,6%	68,1%	27,5%	15,2%	11,4%

#### 4.4.2.1 Étude selon quatre formulations d'ETP

La contribution de l'ETP à l'enveloppe d'incertitude est significative, autant en période actuelle que future, pour les trois indicateurs d'étiage considérés. Vu la performance inférieure de certaines formulations lors de l'étape de calage pour un ou plusieurs modèles hydrologiques, l'incertitude liée à ces combinaisons peut être augmentée. Ainsi, l'analyse de décomposition de la variance a été testée sur un échantillon de formulations qui performant généralement bien en calage pour les trois modèles hydrologiques. Quatre formulations d'ETP ont été sélectionnées, soit deux basées sur la température (Hamon et Kharrufa) et deux basées sur la radiation (McGuinness et Bordne, et Oudin). Cette analyse a été uniquement exécutée sur l'indice 7Q2 pour l'horizon 2080. Les résultats de ce test sont présentés à la Figure 4.25.

En comparant la figure suivante à celle équivalente avec les dix formulations d'ETP (Figure 4.22), il y a une diminution de plus de 50 % de la contribution de l'ETP passant d'une médiane de 41,4 % avec toutes les formulations à 22,1 %. Ce constat porte à croire que certaines formules sont plus influentes dans le calcul de la variance. La médiane de la variance du modèle hydrologique est de 83,4 %, celle du modèle climatique est de 10,9 % tandis que celles de la méthode de post-traitement et du RCP sont respectivement de 1,5 % et 2,9 %.

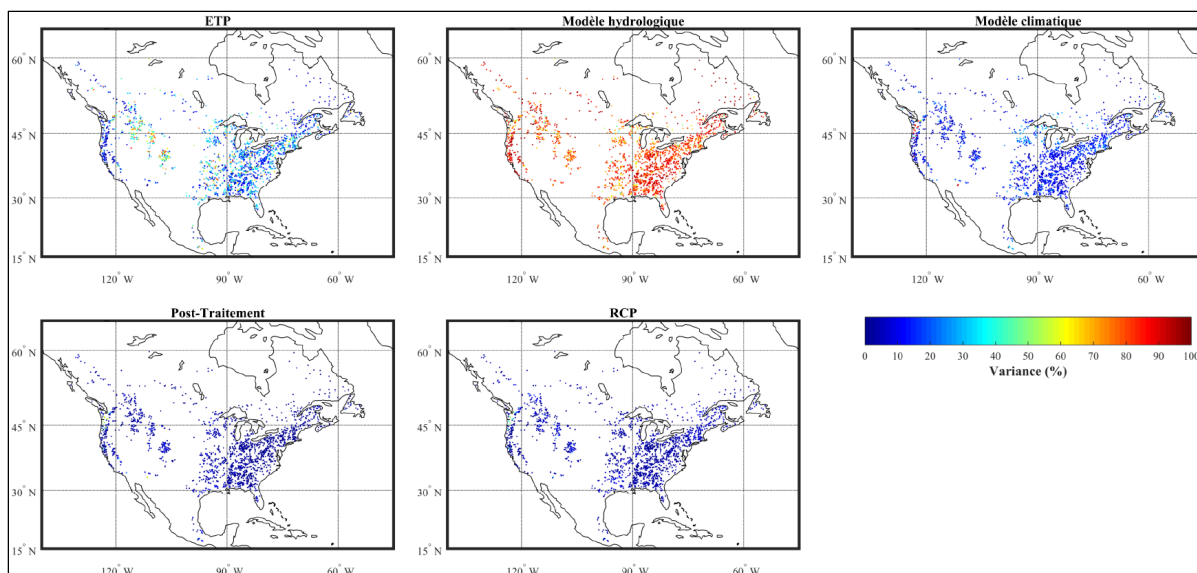


Figure 4.25 Analyse de décomposition de la variance du 7Q2 selon les quatre formulations d'ETP (H, K, MB et O) pour l'horizon 2080

#### 4.4.2.2 Étude selon différentes combinaisons de modèles hydrologiques

Lors de l'étape de calage, GR4J est le modèle hydrologique qui a obtenu les performances les plus robustes. Les deux autres modèles hydrologiques ont démontré des distributions de performance plus étendues ainsi que des valeurs de NSE inférieures. Comme la contribution à l'incertitude est différente entre les modèles, l'analyse de décomposition de la variance pour deux combinaisons de modèles hydrologiques a été testée dans cette section. Ces tests ont été faits uniquement sur les valeurs de 7Q2 pour l'horizon 2080.

La Figure 4.26 illustre les résultats avec la prise en compte des modèles hydrologiques GR4J et HMETs. En retirant le modèle Mohyse, les pourcentages de variance des composantes demeurent semblables à ceux de la Figure 4.22 lorsque les trois modèles sont inclus à l'analyse. La médiane associée à l'ETP est de 49,4 % alors que celle du modèle hydrologique est de 80,5 %. Ainsi, l'ajout de Mohyse ne modifie pas significativement l'incertitude liée à la composante H de l'analyse. La médiane de la variance du modèle climatique est de 5,4 %, celle de la méthode de post-traitement est de 0,9 % et celle du RCP est de 1,3 %.

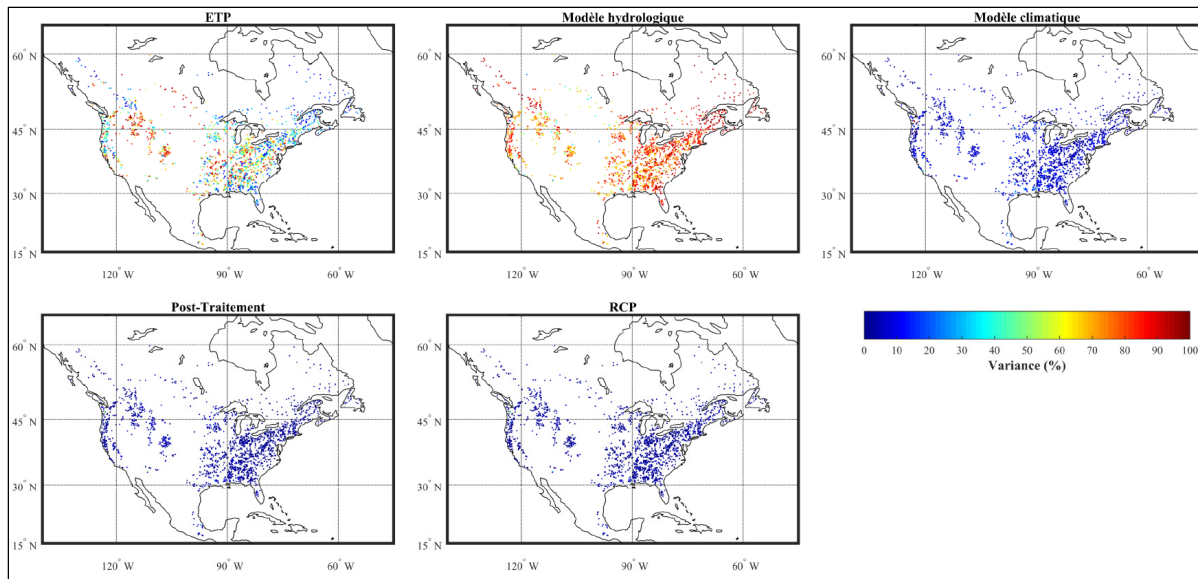


Figure 4.26 Analyse de décomposition de la variance du 7Q2 selon les modèles hydrologiques GR4J et HMETS (Horizon 2080)

La Figure 4.27 illustre les résultats avec la prise en compte des modèles hydrologiques GR4J et Mohyse. En comparaison avec la Figure 4.26, les résultats de la variance associée au modèle hydrologique diminuent considérablement à une valeur médiane de 65,4% tandis que celle de la formulation d'ETP augmente à 60,2 %. Ainsi, HMETS apporte une importante contribution à la variance expliquée par la modélisation hydrologique. La médiane de la variance expliquée par le modèle climatique augmente à 10,9 % alors que celles de la méthode de post-traitement et du RCP sont de 2,0 % et 2,8 %.

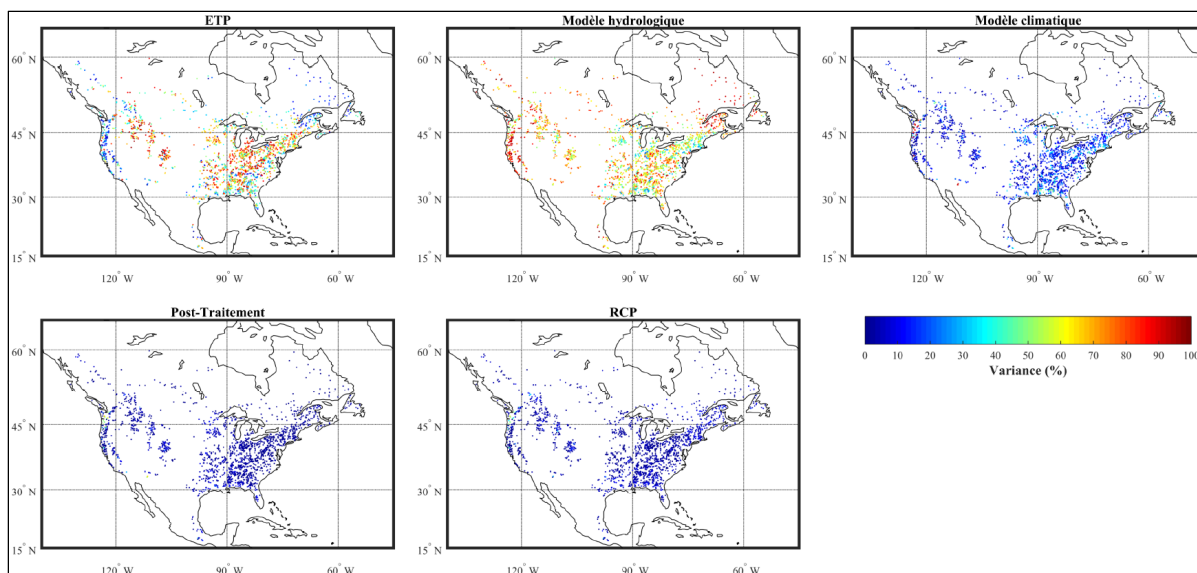


Figure 4.27 Analyse de décomposition de la variance du 7Q2 selon les modèles hydrologiques GR4J et Mohyse (Horizon 2080)

Le Tableau 4.2 résume les pourcentages médians des variances selon les modèles hydrologiques pris en compte dans l'analyse de décomposition de la variance. Ce tableau illustre les différences entre les combinaisons.

Tableau 4.2 Pourcentages médians des variances des composantes en fonction des modèles hydrologiques utilisés dans l'analyse pour l'horizon 2080

	<b>E</b>	<b>H</b>	<b>C</b>	<b>P</b>	<b>R</b>
<b>GR4J / HMETS / Mohyse</b>	41,4 %	84,3 %	7,4 %	1,2 %	1,8 %
<b>GR4J / HMETS</b>	49,4 %	80,5 %	5,4 %	0,9 %	1,3 %
<b>GR4J / Mohyse</b>	60,2 %	65,4 %	10,9 %	2,0 %	2,8 %



## **CHAPITRE 5**

### **ANALYSE DES RÉSULTATS ET DISCUSSION**

Suite à la présentation des résultats au chapitre précédent, ce chapitre en fait l'analyse. Plusieurs aspects du projet sont également approfondis et sont discutés. Le chapitre se termine sur les limites relatives aux travaux qui ont été réalisés.

#### **5.1 Performance de la modélisation hydrologique**

La modélisation hydrologique permet de prévoir les débits à l'exutoire d'un bassin versant et ce, à n'importe quelle période de l'année. Par contre, la période d'étiage est plus sensible lors du calage car les modèles ont plus de difficulté à simuler les faibles débits.

Vu les valeurs du critère de performance présentées aux Figures 4.2 et 4.3, il est pertinent de discuter de la robustesse de la méthodologie, principalement pour HMETS et Mohyse. En effet, si le modèle hydrologique ne simule pas bien les débits en climat actuel, il est légitime de se questionner sur sa capacité à simuler adéquatement les débits dans le futur.

L'élimination du paramètre de calage lié à l'évapotranspiration dans les modèles Mohyse et HMETS mérite une discussion plus approfondie. Dans le cas de HMETS, ce paramètre intervient dans le calcul de l'évapotranspiration réelle. Il s'agit d'un paramètre multiplicatif qui est appliqué directement à l'ETP fournie au modèle. Dans le cas de Mohyse, le paramètre intervient dans le calcul de l'ETP via la formulation qui est propre au modèle (testée parmi les 11 formulations étudiées le présent mémoire et notée M). Les deux paramètres ont, essentiellement, des fonctions différentes. Seiller (2013), dans le cadre de sa thèse de doctorat, a utilisé le modèle Mohyse alimenté par l'ETP provenant de formulations diverses (24 au total), incluant celle de Mohyse. Dans son cas, le paramètre a été fixé à une valeur représentative des bassins étudiés pour la formulation M et n'a pas été inclus dans la paramétrisation de Mohyse lorsque d'autres formulations étaient utilisées. Dans le cas de HMETS, le choix de ne pas considérer le paramètre multiplicatif de l'ETP lors du calage a

certainement pu avoir un impact sur la performance du modèle. Ceci dit, cet aspect mériterait d'être investigué davantage afin, par exemple, de mieux comprendre comment et dans quelle mesure les différents modèles (GR4J, HMETs et Mohyse, notamment), à travers leurs processus internes et le calage de leurs paramètres, arrivent à « s'adapter » à différentes séries d'ETP qui leur sont fournies en entrée, avec et sans paramètre multiplicatif de l'ETP.

Au Mexique, la transférabilité en conditions futures est discutable étant donné les piètres performances des trois modèles hydrologiques. Par contre, la qualité des observations hydrométriques pourrait expliquer ces performances. Au Canada, la performance hydrologique est largement supérieure. Ainsi, les conclusions tirées des bassins versants canadiens sont plus robustes.

## **5.2 Tendances futures**

La section 4.3 du chapitre précédent illustre les changements futurs en lien avec l'évapotranspiration et les débits en période d'étiage. En général, en conditions futures, l'augmentation des températures entraîne une augmentation de l'ETP. Sur des périodes plus courtes (7Q2 et 7Q10), les débits diminueront lors des étiages alors que c'est plus variable pour le 30Q5. Les formulations d'ETP engendrent des tendances convergeant généralement vers une diminution, malgré l'intensité des changements qui varie.

Le Canada ainsi que le centre-ouest des États-Unis obtiennent les changements les plus radicaux avec les pourcentages de changement par rapport à la période actuelle les plus élevés en ce qui concerne l'ETP ainsi que les débits d'étiage. Ce constat est valable pour l'ensemble des formulations d'ETP. Pour le Québec en particulier, les résultats montrent des diminutions des indices d'étiage pouvant atteindre -50 % à -75 % entre la période de référence et l'horizon 2050 pour le RCP 4.5 (Figures 4.12 à 4.14). Ces résultats sont supérieurs aux pourcentages de changement de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional (CEHQ, 2015) qui vont jusqu'à -54 %. Ainsi, les gestionnaires hydriques

québécois devront en tenir compte et proposer des changements, autrement, ces résultats indiquent que notre système hydrologique souffrira des changements climatiques.

Pour les deux indices d'ETP, les résultats montrent peu de variabilité entre les bassins versants situés dans une même zone. Par contre, lorsqu'il est question des métriques d'étiage, il y a plus de variabilité pour une même zone. De plus, contrairement à l'ETP, il n'y a pas beaucoup de différence entre les 11 formulations. Ainsi, la variabilité entre les formulations est atténuée par les modèles hydrologiques. Par exemple, une formule qui obtient des résultats d'ETP plus extrêmes comme K, n'engendre pas nécessairement des étiages plus extrêmes (Figures 4.7 et 4.8 ainsi que 4.12 à 4.14).

Puisque l'étude effectuée en période d'étiage, au moment où l'ETP peut jouer un rôle important dans la simulation des débits, il aurait également pu être intéressant d'étudier l'ETR. Cette dernière est comptabilisée à l'intérieur des modèles hydrologiques, à partir des valeurs d'ETP fournies et en fonction des conditions hydrométéorologiques (voir aussi la section 5.7 qui expose les limites du projet).

Par la suite, les différences entre les scénarios climatiques pour l'ensemble des métriques démontrent que le choix du RCP a un fort impact comparativement à la période future. Ceci confirme que les impacts des changements climatiques sont moins critiques à l'horizon 2080 avec un RCP plus faible qu'à l'horizon 2050 avec un RCP plus fort. De là l'importance de réduire les émissions de gaz à effet de serre afin de diminuer les impacts.

### **5.3 Formulations d'ETP**

Il est difficile de déterminer si une formulation d'ETP est plus performante qu'une autre. Plusieurs paramètres influent sur le choix de la formulation d'ETP. Premièrement, l'emplacement du bassin versant a un impact sur le choix alors qu'il a été démontré que la formulation de T s'adapte mal dans le Sud du territoire nord-américain. De plus, en modélisation hydrologique et climatique, c'est plutôt des combinaisons de formules et de

modèles qui auront de bonnes ou moins bonnes performances et non pas une méthode en particulier.

#### 5.4 Contributions de l'ETP à l'enveloppe d'incertitude

L'objectif principal du présent projet consiste à déterminer la contribution du choix de la formulation d'ETP dans l'enveloppe d'incertitude de la chaîne de modélisation hydroclimatique. Ainsi, l'analyse de la décomposition de la variance a permis d'évaluer la variance associée à toutes les interactions de l'ETP dans la chaîne.

Suite aux différentes analyses effectuées, les composantes reliées à la partie hydrologique de la chaîne (ETP et modèle hydrologique) contribuent plus fortement à l'incertitude que les composantes climatiques. La Figure 5.1 montre la pyramide de la contribution à l'enveloppe d'incertitude de la chaîne de modélisation hydroclimatique évaluée dans le cadre de ce projet.

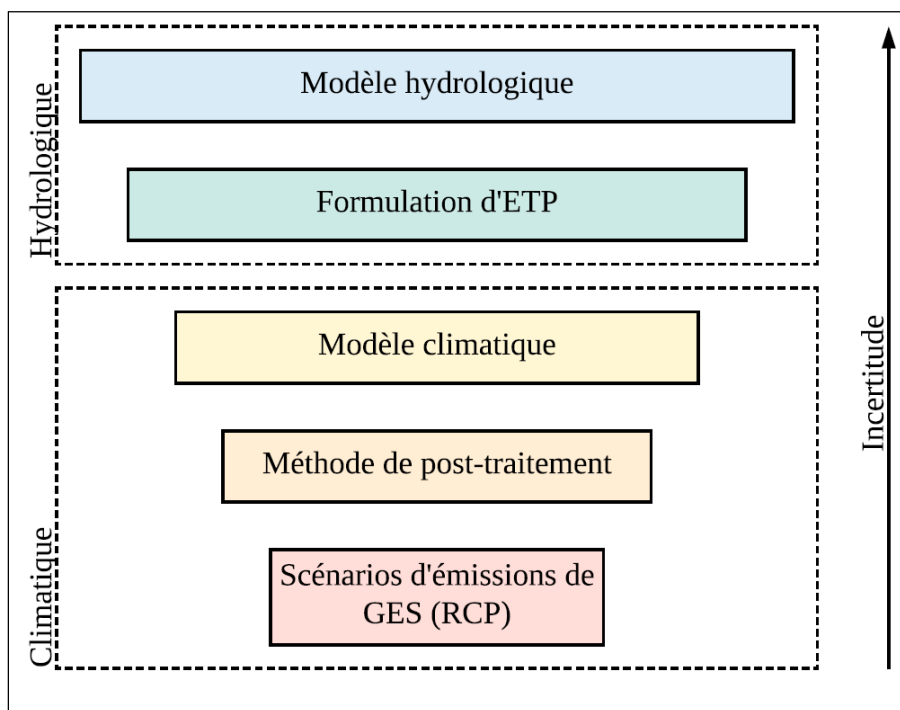


Figure 5.1 Pyramide de contribution à l'enveloppe d'incertitude de la chaîne de modélisation hydroclimatique

Le modèle hydrologique engendre les pourcentages de variance les plus élevées, suivi par la formulation d'ETP. Alors que la variance totale des composantes individuelles a été montrée au Chapitre 4, l'interaction entre les composantes a aussi un impact. La Figure 5.2 illustre la décomposition de la variance pour les interactions de 1<sup>e</sup> et 2<sup>e</sup> ordres, en ce qui concerne le 7Q2 pour l'horizon 2080. Sur cette figure, il est possible d'observer que la variance associée à l'interaction entre l'ETP et le modèle hydrologique (EH) a un grand impact sur la variance totale.

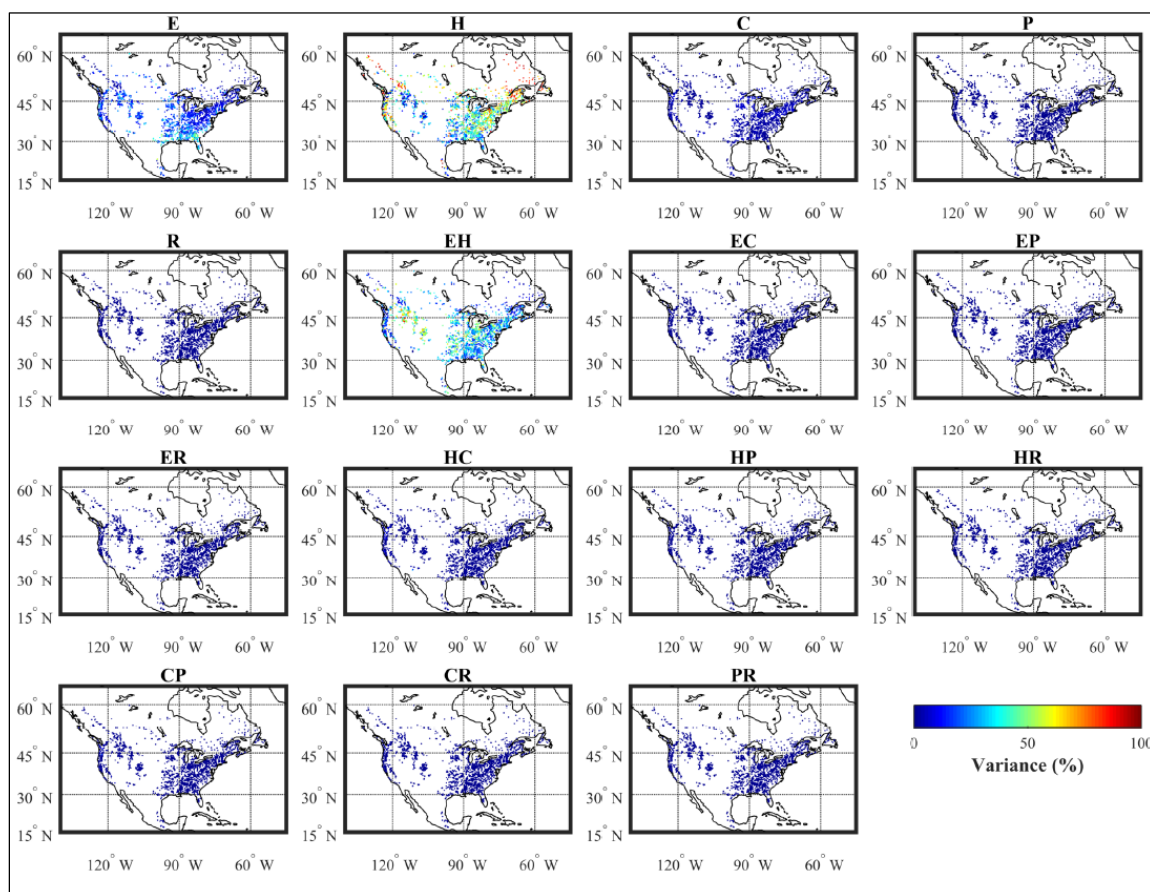


Figure 5.2 Décomposition de la variance pour les interactions de 1<sup>e</sup> et 2<sup>e</sup> ordres pour l'indice 7Q2 et pour l'horizon 2080

En analysant les valeurs du Tableau 5.1, il est possible d'observer que l'interaction EH représente la grande majorité de la variance associée à la formule d'ETP.

Tableau 5.1 Pourcentages de variance de E, de H et de l'interaction EH en fonction de l'indicateur d'étiage pour l'horizon 2080

	Variance de E (%)	Variance de H (%)	Variance de EH (%)
<b>7Q2</b>	9,0	49,5	28,5
<b>7Q10</b>	7,9	56,8	20,4
<b>30Q5</b>	11,0	20,1	20,6

Par la suite, l'analyse des variances entre la période de référence et l'horizon 2050 montre que la contribution de l'ETP à l'incertitude augmente en changements climatiques alors que celle du modèle hydrologique diminue. Les Tableaux 5.2 et 5.3 présentent les pourcentages de variance associés aux composantes hydrologiques lors de la période de référence (Tableau 5.2) et pour l'horizon 2080 (Tableau 5.3).

Tableau 5.2 Pourcentages de variance de E et H pour la période de référence

	Variance de E (%)	Variance de H (%)
<b>7Q2</b>	35,8	92,2
<b>7Q10</b>	26,2	92,8
<b>30Q5</b>	48,8	81,8

Tableau 5.3 Pourcentages de variance de E et H pour l'horizon 2080

	Variance de E (%)	Variance de H (%)
<b>7Q2</b>	41,4	84,2
<b>7Q10</b>	32,1	82,8
<b>30Q5</b>	57,6	68,0

Il est probable qu'il y ait moins de variabilité entre les modèles hydrologiques, pour le 30Q5, parce que la période de 30 jours retenue pour les calculs est plus similaire d'un modèle hydrologique à l'autre que pour les indices calculés sur sept jours comme le 7Q2 et le 7Q10. De plus, sur une plus longue période temporelle, on peut s'attendre à ce que la variabilité provenant des modèles climatiques soit plus importante (comme le montre la Figure 4.24).

Dans l'analyse de décomposition de la variance, chaque élément engendre sa contribution à la variance de la composante. De cette façon, le choix des formules ou des modèles a un impact sur la contribution de cette composante. C'est pourquoi quelques tests ont été effectués avec des combinaisons différentes d'éléments.

Le premier essai a été de faire l'analyse avec uniquement quatre formulations d'ETP qui ont relativement bien performé en calage pour les trois modèles hydrologiques. Évidemment, la formulation de T a été écartée malgré ses bons résultats de NSE. Les formulations utilisées (H, K, MB et O) ont obtenu une variance associée à l'ETP nettement inférieure à celle où toutes les ETP sont prises en compte. Le choix de la formule d'ETP a donc une influence sur les résultats et il ne faut pas utiliser une seule formule aveuglement dans une étude.

Le deuxième essai a été de faire l'analyse avec deux combinaisons de modèles hydrologiques : (1) GR4J et HMETS et (2) GR4J et Mohyse. Alors que le retrait de Mohyse n'a pas d'impact considérable, le retrait de HMETS contraste. En effet, pour GR4J et Mohyse uniquement, la variance de l'ETP augmente alors que celle du modèle hydrologique diminue. Les critères de performance inférieures et la variabilité obtenus par HMETS en calage pourraient expliquer ce comportement.

## **5.5 Contributions des composantes de la chaîne de modélisation hydroclimatique à l'incertitude, par rapport aux résultats d'autres études**

Les résultats des contributions des composantes de la chaîne de modélisation hydroclimatique concordent généralement avec les résultats obtenus dans la littérature scientifique. En effet, en ce qui concerne la partie climatique de la chaîne de modélisation, le modèle climatique engendre une plus grande incertitude que les autres composantes climatiques (méthode de post-traitement et RCP) comme il a aussi été conclu dans Minville et al. (2008) et Giuntoli et al. (2018).

Conformément à Bae et al. (2011), les composantes hydrologiques (formulation d’ETP et modèle hydrologique) engendrent plus d’incertitude que les composantes climatiques de la chaîne de modélisation hydroclimatique. De plus, la contribution du modèle hydrologique est supérieure à celle de la formulation d’ETP comme dans Troin et al. (2018).

Contrairement à Kay & Davies (2007), la contribution de la formulation d’ETP est supérieure à celle du modèle climatique. Comme il est démontré à la section 4.4.2.1, le choix des formulations d’ETP à l’étude a un grand impact sur sa contribution à l’incertitude. Comme Kay & Davies (2007) prennent en compte uniquement deux formulations, sa contribution à l’incertitude est diminuée par rapport à l’utilisation de 11 formulations, par exemple.

Finalement, la présente étude démontre l’intérêt de prendre en compte plusieurs méthodes pour quantifier l’incertitude de chaque composante. En effet, les sections 4.4.2.1 et 4.4.2.2 illustrent l’impact du choix des formulations d’ETP et des modèles hydrologiques sur l’incertitude expliquée. Ce constat concorde avec Minville et al. (2008), Kay & Davies (2007) ainsi que Giuntoli et al. (2015). Ceci dit, bien qu’il demeure pertinent d’inclure plusieurs éléments dans chacune des composantes de la chaîne de modélisation de façon à tenir compte de l’incertitude, il faut le faire de manière judicieuse. Il faut éviter d’inclure, dans l’analyse, des éléments qui, par leurs faibles performances ou comportements trop divergents, pourraient générer de la « fausse incertitude ».

## **5.6 Zones climatiques**

Les diversités hydriques et climatiques présentes sur le territoire à l’étude complexifient la généralisation des résultats. En effet, l’Amérique du Nord comporte des zones climatiques très variées et le choix d’une méthode dépend de l’emplacement à l’étude. Dans ce cas, il n’est pas nécessairement utile ou souhaitable d’établir une méthodologie applicable à l’ensemble des bassins versants nord-américains.

Les bassins ont été regroupés selon les zones climatiques du système de classification de Köppen-Geiger (voir section 2.2). Les 2080 bassins versants de l’étude sont distribués dans

14 zones climatiques différentes. Les 235 bassins canadiens se retrouvent dans cinq zones climatiques, les 1825 bassins versants des États-Unis sont situés dans 12 zones climatiques alors que les 20 bassins mexicains sont présents dans quatre zones climatiques. On observe par ailleurs que le nombre de bassins versants présents dans une même zone climatique est très variable allant de trois à 631 bassins. Les zones où l'échantillon est limité ne permettent pas de tirer des conclusions représentatives du climat.

Par exemple, les bassins versants auraient pu être choisis en fonction de leur zone climatique afin d'obtenir des échantillons représentatifs de chacune des zones climatiques mais cela n'était pas possible dans le cadre de la présente étude.

La Figure 5.3 illustre les zones climatiques de Köppen-Geiger en Amérique du Nord avec la localisation des 2080 bassins versants à l'étude. L'analyse de décomposition de la variance du 7Q2 pour l'horizon 2080 a été effectuée en fonction de la zone climatique. Les distributions des variances selon les zones climatiques sont présentées à la Figure 5.4. Sur cette figure, on observe que certaines zones climatiques (BSh, Cfb et Cwb) plus au sud, généralement au Mexique, obtiennent plus de variance des composantes climatiques de la chaîne. Pour l'ensemble des zones climatiques, le modèle hydrologique est la composante qui engendre la plus grande incertitude avec le moins de variabilité entre les bassins versants. En climat polaire de toundra (zone climatique ET), c'est presque uniquement le modèle hydrologique qui a un impact sur l'incertitude des résultats. Pour l'ensemble des zones climatiques, l'incertitude liée à la formulation d'ETP est très variables. Ce résultat démontre que le modèle hydrologique adapte l'ETR en fonction de la disponibilité en eau afin de faire la simulation des débits.

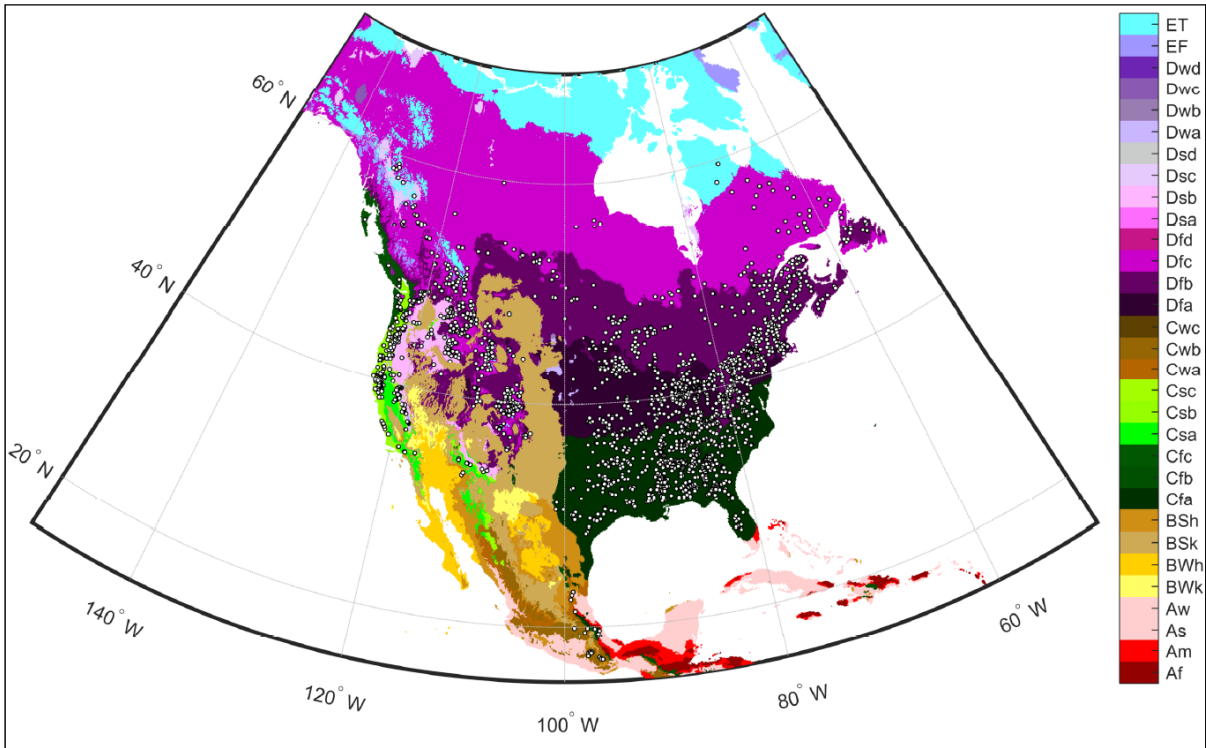


Figure 5.3 Zones climatiques de Köppen-Geiger en Amérique du Nord

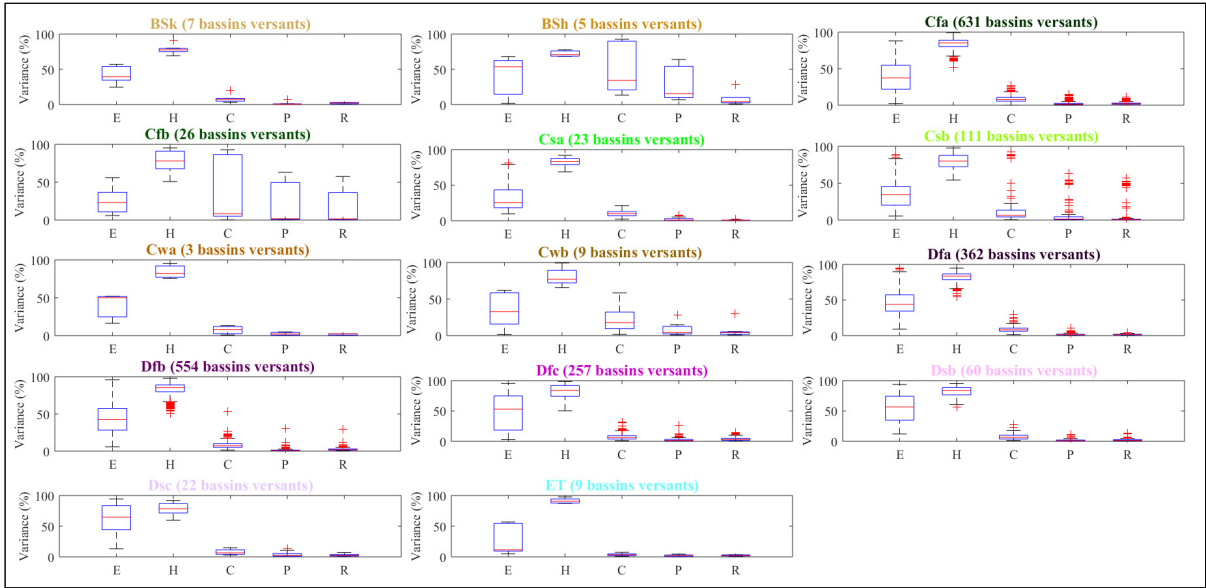


Figure 5.4 Analyse de décomposition de la variance du 7Q2 selon les zones climatiques de Köppen-Geiger pour l’horizon 2080

## 5.7 Limites du projet

Cette étude s'imbrique dans un projet de collaboration entre le Québec et le Mexique ayant pour but de produire des connaissances nouvelles en matière d'impacts des changements climatiques sur les extrêmes hydrologiques. De ce fait, les bassins versants à l'étude se situent sur ces deux territoires ainsi qu'au Canada et aux États-Unis. Les diversités hydrologiques et climatiques entre ces régions permettent d'élargir les conclusions et d'avoir une meilleure estimation de l'incertitude spatialement. Mais d'un autre côté, il est difficile d'utiliser les mêmes méthodes et d'établir des conclusions similaires avec autant de différences sur les plans hydrologique et climatique. En effet, le choix des formulations d'ETP et des modèles hydrologiques peut être satisfaisant pour le climat québécois mais moins adapté pour les climats du sud comme au Mexique. L'utilisation d'outils mieux adaptés à ces zones et/ou l'accès à une base de données hydrométriques de meilleure qualité permettraient de tirer des conclusions plus robustes. Ceci dit, la quantité importante de bassins étudiés permet de les regrouper et de distinguer les résultats par pays ou secteur géographique, ou encore en fonction de leurs similitudes hydroclimatiques.

En ce qui concerne le Mexique, tel que mentionné ci-haut, la principale limite est la fiabilité de la base de données hydrométriques. En plus de contenir de longues séquences de données manquantes, les séries temporelles de plusieurs bassins versants contiennent des débits nuls. Et c'est encore plus critique dans le présent projet puisque les étiages sont à l'étude. Les modèles hydrologiques ont de la difficulté à obtenir des débits simulés performants ce qui peut remettre en question la transférabilité en climat futur. Pour contrer ce phénomène, des bassins versants du sud des États-Unis ont été utilisés.

Le choix des formulations d'ETP à l'étude comporte aussi des limites. Malgré qu'elles nécessitent peu d'intrants et qu'elles soient donc applicables à une grande quantité de bassins versants, plusieurs facteurs influant (surtout en changements climatiques) sur l'ETP ne sont pas pris en compte. Les formulations combinatoires et plus physiques auraient un impact sur l'incertitude et la robustesse des conclusions malgré que cela augmenterait la complexité du

projet. En lien avec la première limite, les formulations plus physiques auraient la possibilité de mieux s'adapter à la diversité climatique et ainsi, de mieux s'adapter aux changements climatiques.

L'utilisation de trois modèles hydrologiques conceptuels et globaux représente une autre limite du projet. En effet, la modélisation hydrologique faite avec d'autres modèles que GR4J, HMETs et Mohyse aurait certainement un impact sur les résultats. Un plus grand nombre de modèles augmenterait la fiabilité de l'incertitude liée à cette composante. De plus, l'utilisation de modèles plus physiques et distribués offrirait la possibilité de mieux prendre en compte les processus liés à l'évaporation et à la transpiration dans le modèle hydrologique et ainsi, de voir l'impact sur les débits simulés. Par contre, le choix d'utiliser des modèles simples résulte principalement des données d'entrée nécessaires (températures seulement), du nombre de bassins versants à l'étude et donc, du temps de calcul ainsi que de l'espace de stockage des données. Ainsi, l'utilisation de modèles hydrologiques physiques et distribués restreindrait la quantité de bassins versants de l'étude.

Pour continuer avec les modèles hydrologiques, HMETs en particulier a fort possiblement ont été pénalisés puisque son paramètre de calage en lien avec l'ETP a été fixé à une valeur de un. Ces modèles n'ont donc pas performé à leur plein potentiel. Par contre, cela illustre la capacité d'adaptation des modèles hydrologiques lors du calage qui pourrait être problématique en climat futur. Également, puisque Mohyse n'a pas été pris en compte pour le choix des bassins versants, la performance de ce modèle hydrologique constitue une limite.

Une seule approche de calage des modèles hydrologiques est utilisée dans ce projet. Puisque le NSE favorise particulièrement les périodes de crues (Gupta et al., 2009 ; Krause et al., 2005), ce n'est pas la meilleure métrique pour ce projet. Il serait pertinent de tester d'autres approches de calage comme de calibrer uniquement sur les périodes d'étiage, de calibrer sur la période estivale (difficile vu la diversité climatique) ou d'utiliser une autre fonction-objectif. De plus, malgré que deux calages des paramètres ont été effectués, uniquement le

plus performant selon le NSE a été conservé ce qui engendre aussi une limite liée aux valeurs des paramètres.

Une autre limite du projet est le choix du système de classification climatique. Les zones climatiques de Köppen-Geiger (KG) ont permis de regrouper les bassins versants selon leurs caractéristiques climatiques. Par contre, étant donné que le nombre de bassins versants par zone climatique est très hétérogène, les conclusions tirées des zones où il y a seulement 5 bassins versants sont moins robustes. De plus, la résolution de l'ensemble climatique CMIP5 étant plus grande que celle des zones climatiques de KG, le choix de ce système de classification est discutable. Malgré qu'il ne couvre pas le Mexique, l'utilisation du système de classification de Bukovsky (Bukovsky, 2011) serait une solution. Les équations de base de ce système pourraient être utilisées pour définir les zones mexicaines.

Par la suite, la méthode des polygones de Thiessen ou de l'inverse de la distance pour l'extraction des données des modèles climatiques globaux (MCG) pourrait être une meilleure méthode que l'utilisation de la moyenne arithmétique des quatre points de grille les plus près du centre d'un bassin versant. Comme la résolution des MCG est grande (voir Tableau 3.2), les petits bassins versants ont donc des données climatiques moins représentatives du secteur.

Exclusivement cinq indices (deux pour l'ETP et trois pour les étiages) ont été pris en compte dans ce projet. Les possibilités d'indices sont pratiquement infinies et ce choix a des répercussions directes sur les résultats. Certaines options de métriques permettraient d'approfondir l'analyse de ce projet. Comme les métriques en lien avec l'ETP sont totalement indépendantes du modèle hydrologique, elles ne sont pas pertinentes dans l'analyse de décomposition de la variance. Ainsi, il aurait été pertinent de prendre en compte les valeurs d'évapotranspiration réelle (ETR) déterminées à l'intérieur du modèle hydrologique afin de pouvoir comparer le comportement du modèle face aux intrants d'ETP. Il serait aussi pertinent de conserver la valeur du débit moyen annuel afin d'avoir une idée du régime hydrologique du bassin versant et ainsi, de pouvoir le comparer avec les valeurs en étiage.

Finalement, afin d'estimer l'incertitude de la chaîne de modélisation hydroclimatique, il est préférable d'avoir plusieurs cas pour chacune des composantes de la chaîne. Ainsi, le RCP et la méthode de post-traitement sont limités puisqu'ils présentent uniquement deux possibilités. Afin de mieux les représenter, les quatre RCP de CMIP5 ainsi que d'autres méthodes de correction pourraient être ajoutés à la chaîne de modélisation.

## CONCLUSION

En contexte de changements climatiques, les événements météorologiques extrêmes comme les sécheresses seront plus sévères et fréquents, ce qui aura des conséquences sur la disponibilité de la ressource en eau. Alors que l'évapotranspiration est un processus particulièrement influant en période d'étiage, son impact sur la modélisation hydrologique pourrait gagner en importance en conditions climatiques futures. Ainsi, l'objectif de cette étude était de déterminer la contribution de la formulation d'ETP dans l'enveloppe d'incertitude de la chaîne de modélisation hydroclimatique en période d'étiage. Ce projet a donc permis d'évaluer les tendances associées aux changements climatiques lors des périodes d'étiage et également, d'étudier l'impact du choix de la formulation d'ETP en climat futur.

Pour atteindre cet objectif, 11 formulations d'ETP basées sur la température ou sur la radiation ont été appliquées sur 2080 bassins versants d'Amérique du Nord. Par la suite, la modélisation hydrologique des bassins versants a été faite selon trois modèles hydrologiques conceptuels et globaux (GR4J, HMETs et Mohyse) calibrés selon le critère de Nash-Sutcliffe. L'étude de transférabilité en conditions futures a été réalisée avec des simulations issues de huit modèles climatiques globaux et suivant deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre. Finalement, les sorties des simulations climatiques ont été post-traitées selon deux méthodes avant d'être introduites dans les modèles hydrologiques afin de simuler les débits en climat futur.

Suite à l'évaluation de la chaîne de modélisation hydroclimatique, différentes métriques relatives à l'ETP et aux débits d'étiage ont été déterminées. Ces métriques servent de comparatifs entre les différents scénarios climatiques et ce, selon les formulations d'ETP. Afin d'évaluer l'incertitude liée à la formule d'ETP dans la chaîne, l'analyse de décomposition de la variance sur les valeurs des métriques d'étiage a été réalisée.

Les tendances futures sont généralement similaires soit : une augmentation des quantités d'ETP, ainsi qu'une diminution des débits en période d'étiage. L'intensité des changements

varie en fonction de l'emplacement du bassin versant et de la formulation d'ETP utilisée. Alors que le Québec et les Rocheuses subissent des changements plus drastiques, le Sud-Est des États-Unis ainsi que le Mexique obtiennent des changements de moins grande amplitude. De plus, il a été démontré dans cette étude que certaines formulations d'ETP s'adaptent mal à certaines conditions climatiques. Il est donc essentiel de choisir une méthode qui convient à la zone climatique à l'étude.

Malgré le fait que la contribution de l'ETP à l'enveloppe d'incertitude soit plus importante qu'anticipé, l'analyse de décomposition de la variance démontre que le modèle hydrologique est la composante la plus influente.

En plus d'être basé sur le processus d'évapotranspiration, ce projet se démarque de la littérature scientifique dans le domaine de l'hydrologique par son hétérogénéité climatique, sa quantité de bassins versants prise en compte, ainsi que son analyse en période d'étiage.

Vu sa diversité climatique, ce projet a permis d'établir que certains outils de modélisation s'adaptent mal dans quelques conditions climatiques. En contexte de changements climatiques, il est important d'utiliser des méthodes polyvalentes ou adaptées aux différentes conditions.

Afin de diminuer la vulnérabilité des systèmes hydriques face aux changements climatiques, les gestionnaires de systèmes hydriques devront mettre en place des mesures d'adaptation visant à revoir les pratiques liées à la modélisation de l'ETP ainsi qu'à son intégration dans les modèles hydrologiques. Ce changement permettrait notamment de mieux prévenir l'assèchement d'une source d'approvisionnement en eau ou la diminution de la production d'une centrale hydroélectrique lors de sécheresses.

## RECOMMANDATIONS

Les recherches potentielles découlant de la présente étude sont nombreuses. Ainsi, des recommandations de travaux futurs sont présentées ci-dessous.

Dans le cas où la présente méthodologie est conservée, il est suggéré de choisir un ensemble de bassins versants avec des propriétés climatiques moins variables. Par exemple, de refaire l'étude sur l'ensemble des bassins présents dans la base de données CANOPEX.

Afin de rendre l'analyse de l'incertitude plus robuste, l'ajout d'éléments aux différentes composantes de la chaîne de modélisation hydroclimatique est suggéré. L'utilisation de plusieurs scénarios d'émissions de gaz à effet de serre, de plusieurs méthodes de post-traitement ainsi que de formulations d'ETP et de modèles hydrologiques plus complexes permettraient d'approfondir les conclusions.

Il est aussi suggéré de tester des approches de calage des modèles hydrologiques qui mettraient plus en valeur les périodes d'étiage. Choisir un critère de performance différent ou calibrer sur la période d'étiage sont des solutions potentielles pour améliorer la qualité de la modélisation hydrologique en climat futur.

Comme mentionné dans les limitations, il est recommandé d'ajouter certains indices d'analyse comme l'évapotranspiration réelle (ETR) déterminée dans les modèles hydrologiques et le débit annuel moyen. De plus, l'analyse de la période à laquelle se produisent les étiages au cours de l'année est conseillée afin de comparer les périodes entre elles.

Dans les études hydrologiques, les périodes de crue sont souvent à l'honneur. Il serait intéressant d'évaluer la contribution de la formulation d'ETP cet autre extrême hydrologique ainsi que d'établir des liens avec les étiages en changements climatiques.

Il a été démontré dans ce projet que les résultats sont hétérogènes sur le territoire nord-américain. Une exploration des corrélations entre les formulations d'ETP et les zones climatiques, la superficie des bassins versants ou leur emplacement (latitude) est proposée.

Finalement, plusieurs bassins versants, notamment ceux du Mexique, disposent de données d'évaporation observées. Il est donc suggéré d'utiliser ces valeurs comme comparaison à celles calculées ou de les intégrer à la méthode de calage.

## ANNEXE I

### PARAMÈTRES ET BORNES DE CALAGE

Tableau-A I-1 Paramètres et bornes de calage pour le modèle hydrologique GR4J

Paramètres		Borne inférieure	Borne supérieure
1	Capacité du réservoir de production (mm)	1	750
2	Coefficient d'échanges souterrains (mm)	-10	10
3	Capacité à un jour du réservoir de routage (mm)	1	400
4	Temps de base de l'hydrogramme unitaire (j)	0,5	10

Tableau-A I-2 Paramètres et bornes de calage pour le modèle de fonte de neige CemaNeige

Paramètres		Borne inférieure	Borne supérieure
1	Facteur degré-jour (mm/°C)	0	10
2	Coefficient de pondération de l'état thermique du manteau neigeux	0	1

Tableau-A I-3 Paramètres et bornes de calage pour le modèle hydrologique HMETs

Paramètres		Borne inférieure	Borne supérieure
1	Paramètre de forme de l'hydrogramme unitaire de surface	0,3	20
2	Paramètre de mode de l'hydrogramme unitaire de surface	0,01	5
3	Paramètre de forme de l'hydrogramme unitaire de la zone vadose	0,5	13
4	Paramètre de mode de l'hydrogramme unitaire de la zone vadose	0,15	1,5
5	Facteur degré-jour minimum (mm/°C/j)	0	20
6	Différence en les facteurs degré-jour minimum et maximum (mm/°C/j)	0	20
7	Température de base pour la fonte de la neige (°C)	-2	3
8	Paramètre empirique pour le calcul du facteur degré-jour (mm <sup>-1</sup> )	0,01	0,2
9	Fraction minimale la capacité de rétention d'eau dans le couvert neigeux	0	0,1
10	Différence entre les fractions minimale et maximale de la capacité de rétention d'eau dans le couvert neigeux	0,01	0,25
11	Paramètre pour le calcul de la capacité de rétention d'eau de la neige (mm <sup>-1</sup> )	0,005	0,05
12	Température de base pour le regel (°C)	-5	2
13	Facteur degré-jour pour le regel (mm/°C/j)	0	5
14	Exposant empirique pour l'équation du regel	0	1
15	Fraction de l'ETP	0,9999999	1,0000001
16	Fraction de l'eau de surface et de ruissellement	0	1
17	Fraction de l'eau dans la recharge souterraine	0,00001	0,02
18	Fraction de l'eau de l'écoulement hypodermique	0	0,1
19	Fraction de l'eau de l'écoulement souterrain	0,00001	0,01
20	Niveau maximal de la zone vadose (mm)	0	500
21	Niveau maximal de la zone phréatique (mm)	0	2000

Tableau-A I-4 Paramètres et bornes de calage pour le modèle hydrologique Mohyse

<b>Paramètres</b>		<b>Borne inférieure</b>	<b>Borne supérieure</b>
<b>1</b>	Coefficient d'ajustement de l'ETP (mm/j)	0,9999999	1,0000001
<b>2</b>	Coefficient d'ajustement de la transpiration ( $j^{-1}$ )	0,01	1
<b>3</b>	Taux de fonte (mm/°C/j)	0,01	20
<b>4</b>	Taux maximal d'infiltration (mm/j)	-5	5
<b>5</b>	Coefficient de vidange de la zone vadose vers l'aquifère ( $j^{-1}$ )	0,01	500
<b>6</b>	Coefficient de vidange de la zone vadose vers le cours d'eau ( $j^{-1}$ )	0,01	1
<b>7</b>	Coefficient de vidange de l'aquifère vers le cours d'eau ( $j^{-1}$ )	0,01	1
<b>8</b>	Paramètre de forme de l'hydrogramme unitaire	0,01	1
<b>9</b>	Paramètre d'échelle de l'hydrogramme unitaire	0,01	15
<b>10</b>	Coefficient d'ajustement de l'ETP (mm/j)	0,01	15



## ANNEXE II

### ANALYSE DES DIFFÉRENCES ENTRE LES SCÉNARIOS CLIMATIQUES SUR L'INDICE $E_{\max}$

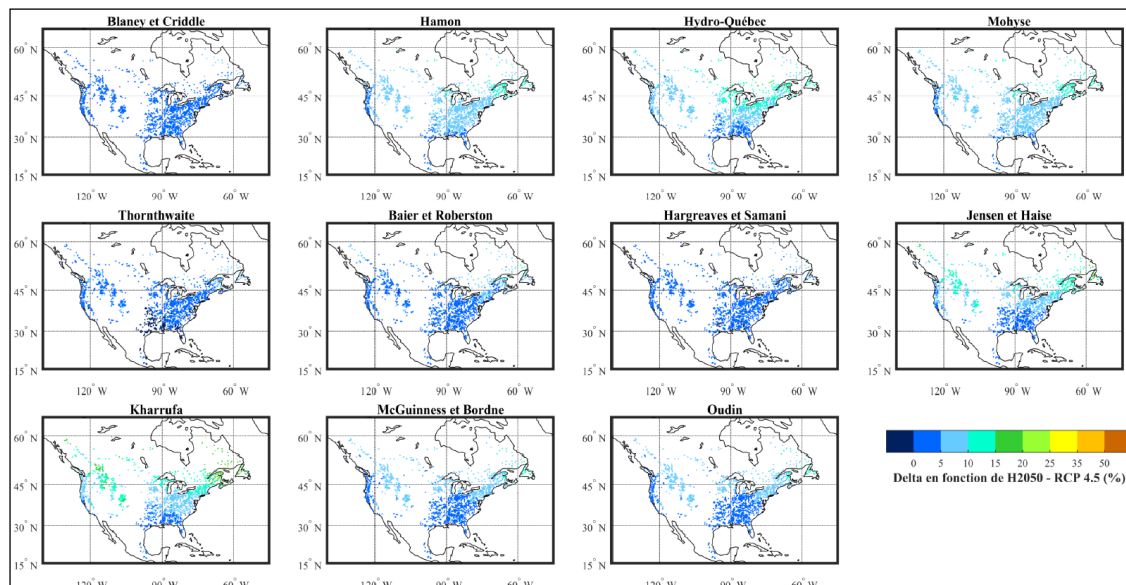


Figure-A II-1 Cartes géographiques du delta de  $E_{\max}$  entre le delta relatif de H2050 avec RCP 4,5 et le delta relatif de H2050 avec RCP 8,5 selon l'ETP

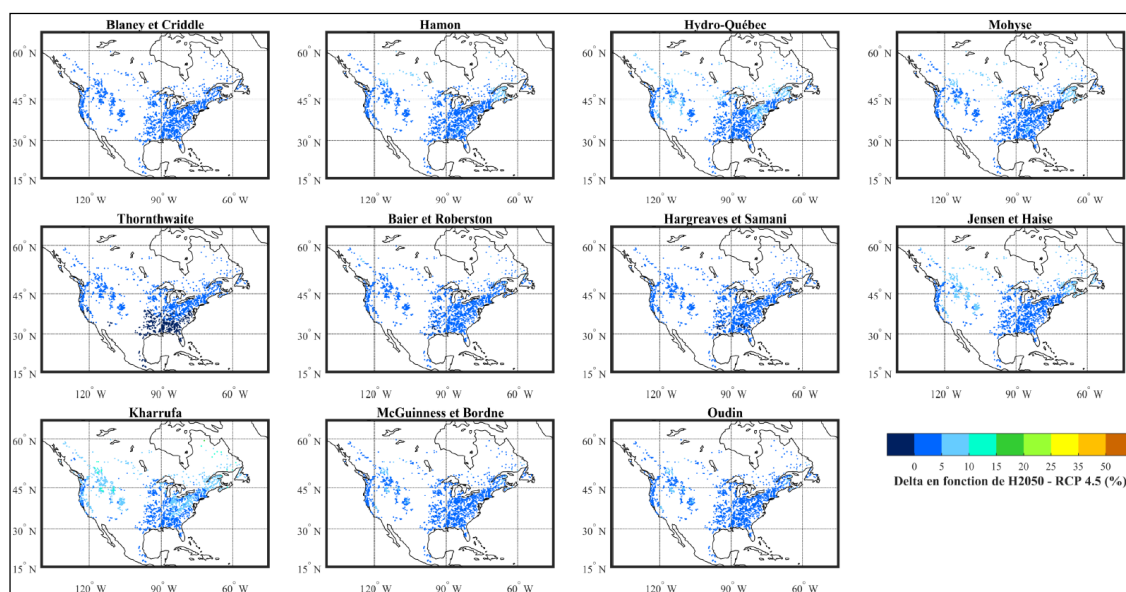


Figure-A II-2 Cartes géographiques du delta de  $E_{\max}$  entre le delta relatif de H2050 avec RCP 4,5 et le delta relatif de H2080 avec RCP 4,5 selon l'ETP

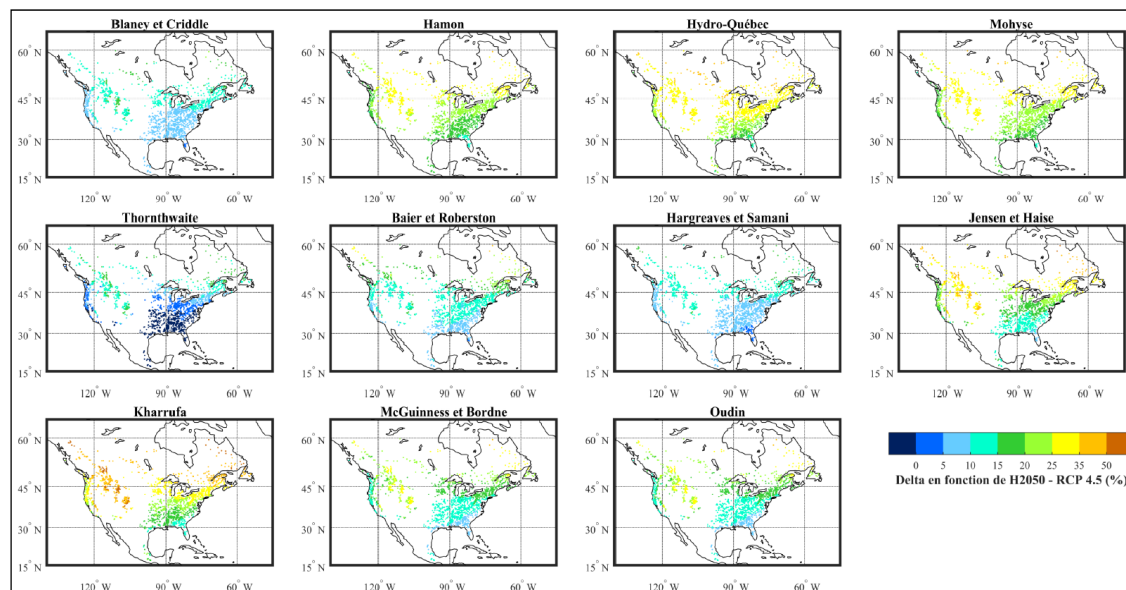


Figure-A II-3 Cartes géographiques du delta de  $E_{\max}$  entre le delta relatif de H2050 avec RCP 4,5 et le delta relatif de H2080 avec RCP 8,5 selon l'ETP

## ANNEXE III

### ANALYSE DES DIFFÉRENCES ENTRE LES SCÉNARIOS CLIMATIQUES SUR LES INDICES DE DÉBITS D'ÉTIAGE (7Q2, 7Q10 ET 30Q5)

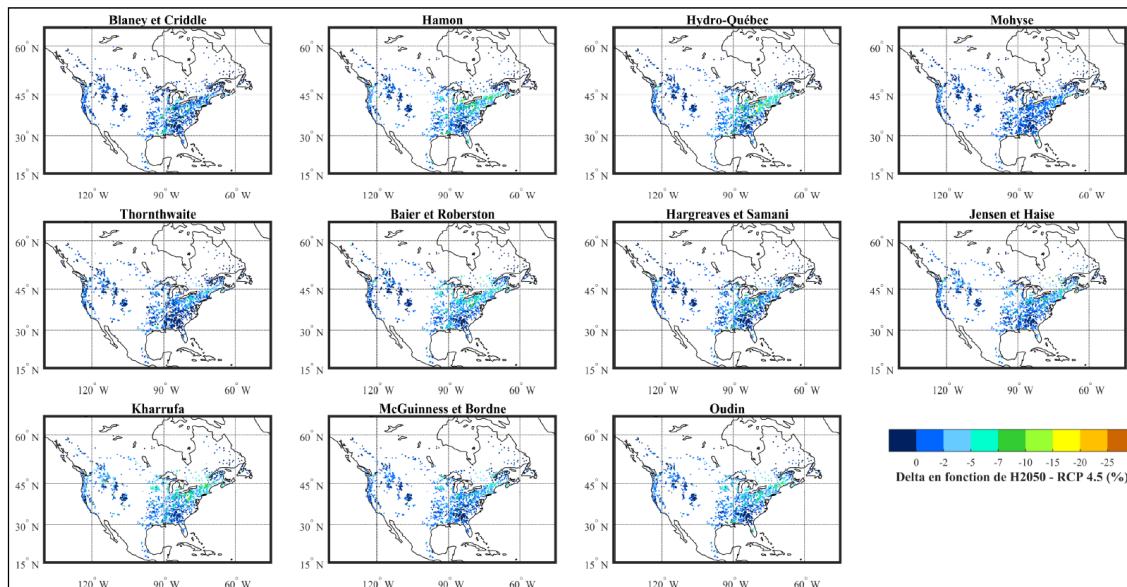


Figure-A III-1 Cartes géographiques du delta de 7Q2 entre le delta relatif de H2050 avec RCP 4,5 et le delta relatif de H2050 avec RCP 8,5 selon l'ETP

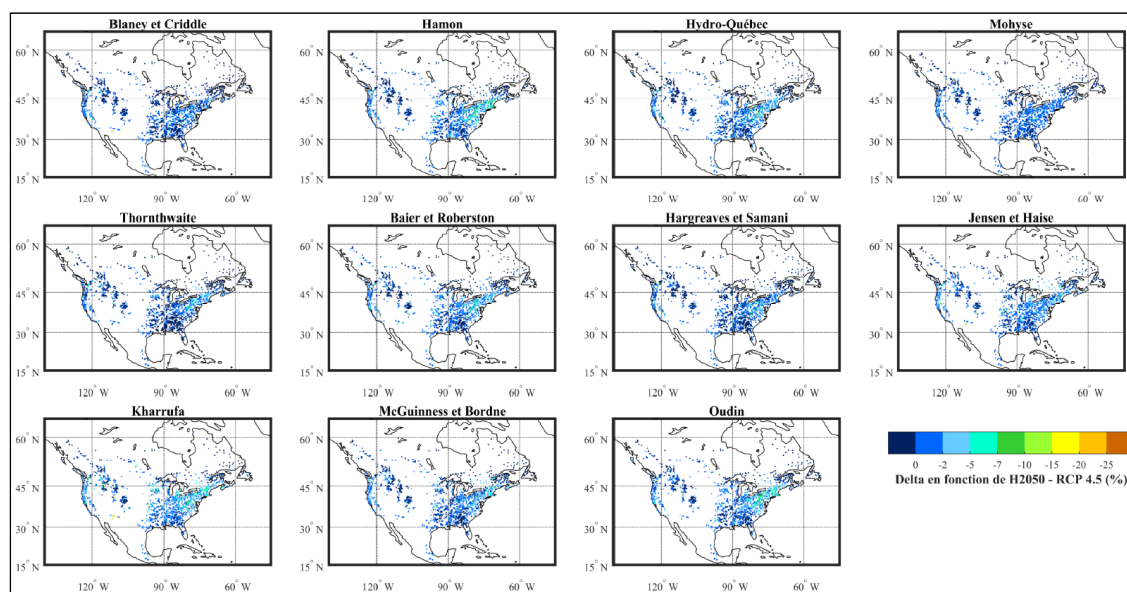


Figure-A III-2 Cartes géographiques du delta de 7Q2 entre le delta relatif de H2050 avec RCP 4,5 et le delta relatif de H2080 avec RCP 4,5 selon l'ETP

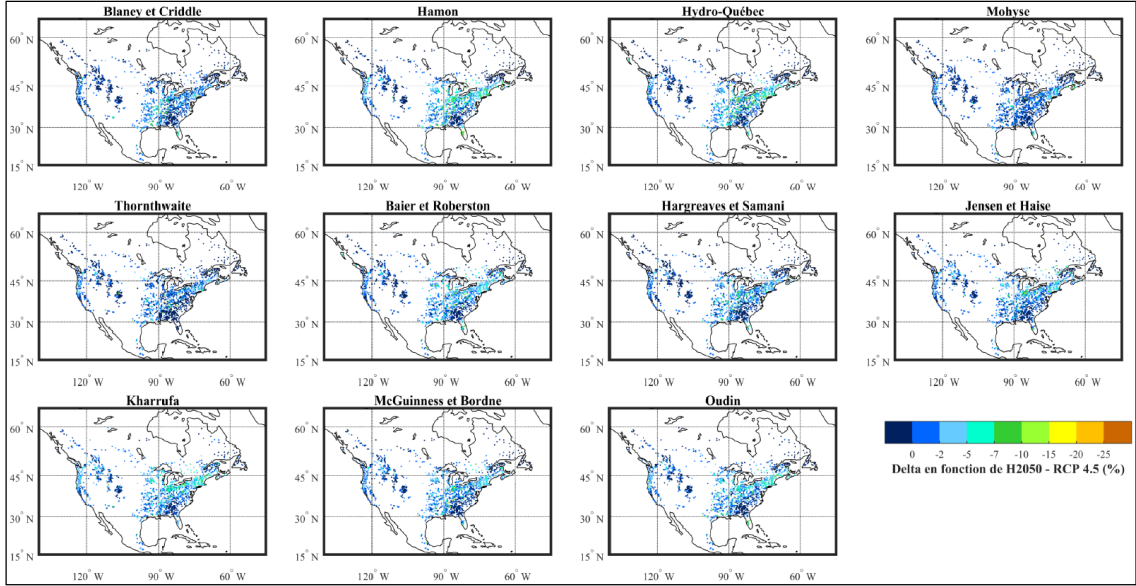


Figure-A III-3 Cartes géographiques du delta de 7Q10 entre le delta relatif de H2050 avec RCP 4,5 et le delta relatif de H2050 avec RCP 8,5 selon l'ETP

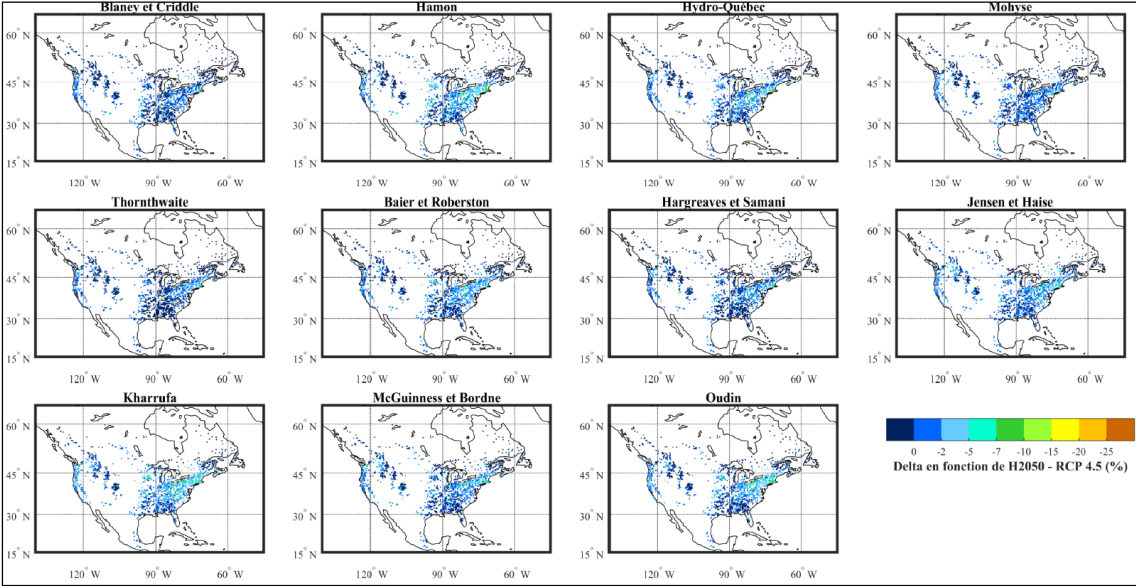


Figure-A III-4 Cartes géographiques du delta de 7Q10 entre le delta relatif de H2050 avec RCP 4,5 et le delta relatif de H2080 avec RCP 4,5 selon l'ETP

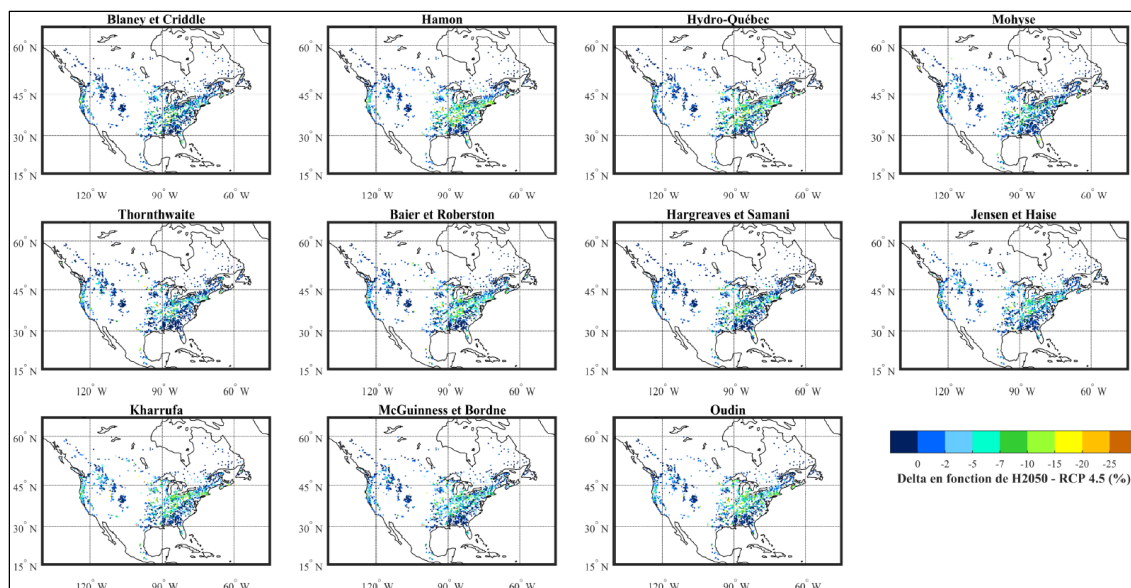


Figure-A III-5 Cartes géographiques du delta de 30Q5 entre le delta relatif de H2050 avec RCP 4,5 et le delta relatif de H2050 avec RCP 8,5 selon l'ETP

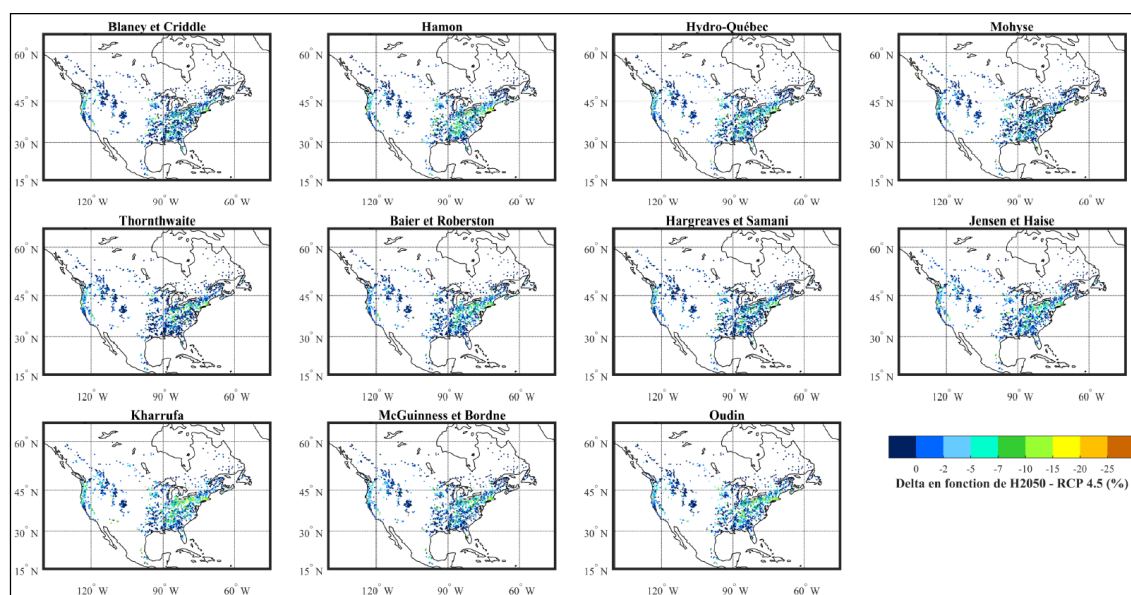


Figure-A III-6 Cartes géographiques du delta de 30Q5 entre le delta relatif de H2050 avec RCP 4,5 et le delta relatif de H2080 avec RCP 4,5 selon l'ETP



## ANNEXE IV

### ANALYSE DE DÉCOMPOSITION DE LA VARIANCE INCLUANT LA FORMULATION DE THORNTHWAITE POUR LES PÉRIODES ACTUELLE ET FUTURES

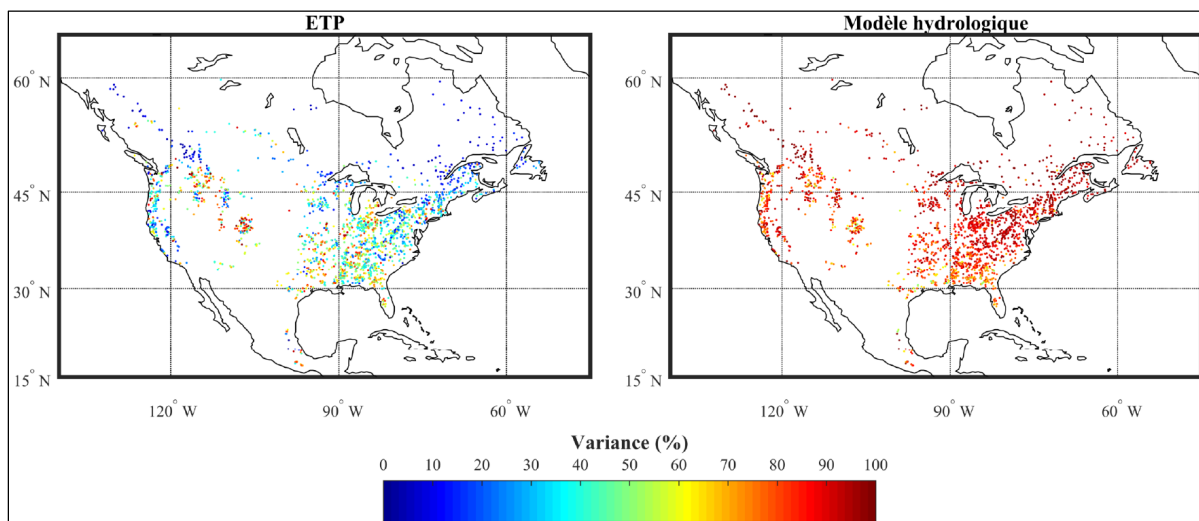


Figure-A IV-1 Analyse de décomposition de la variance du 7Q2 pour la période passée récente, incluant la formulation de T

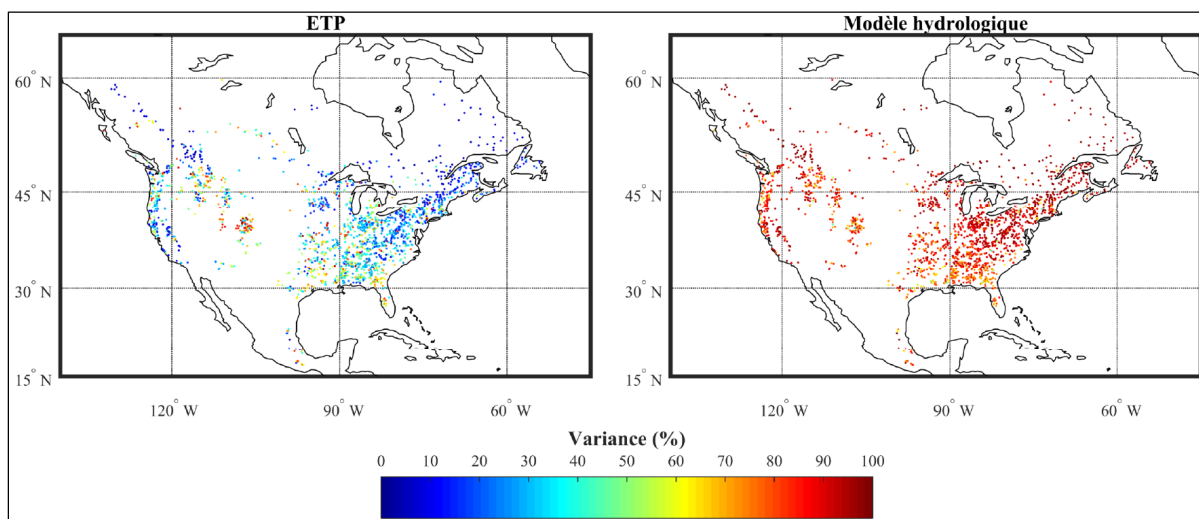


Figure-A IV-2 Analyse de décomposition de la variance du 7Q10 pour la période passée récente, incluant la formulation de T

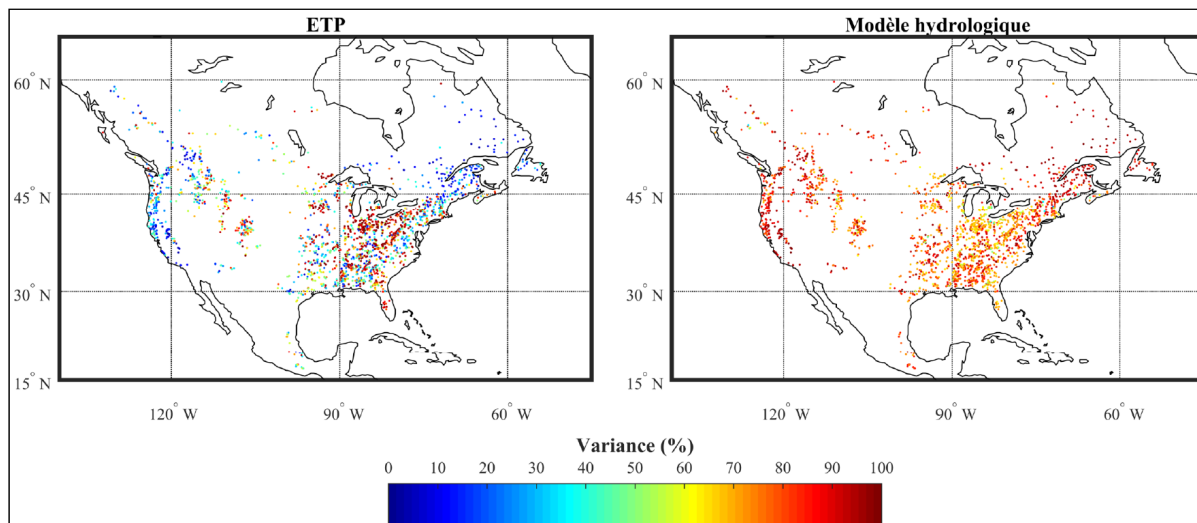


Figure-A IV-3 Analyse de décomposition de la variance du 30Q5 pour la période passée récente, incluant la formulation de T

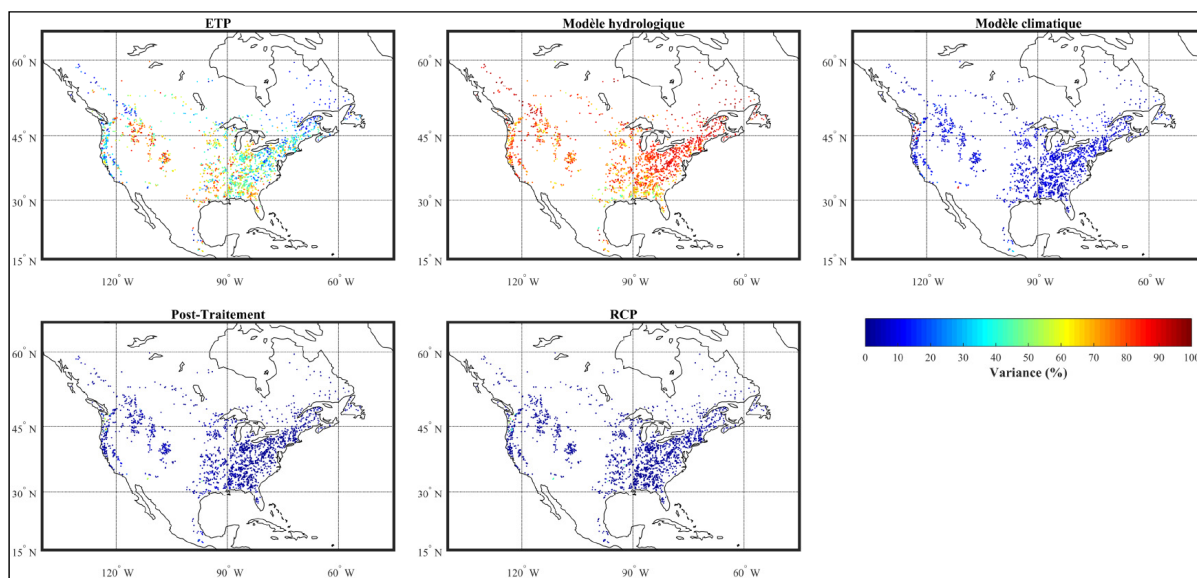


Figure-A IV-4 Analyse de décomposition de la variance du 7Q2 pour l'horizon 2050, incluant la formulation de T

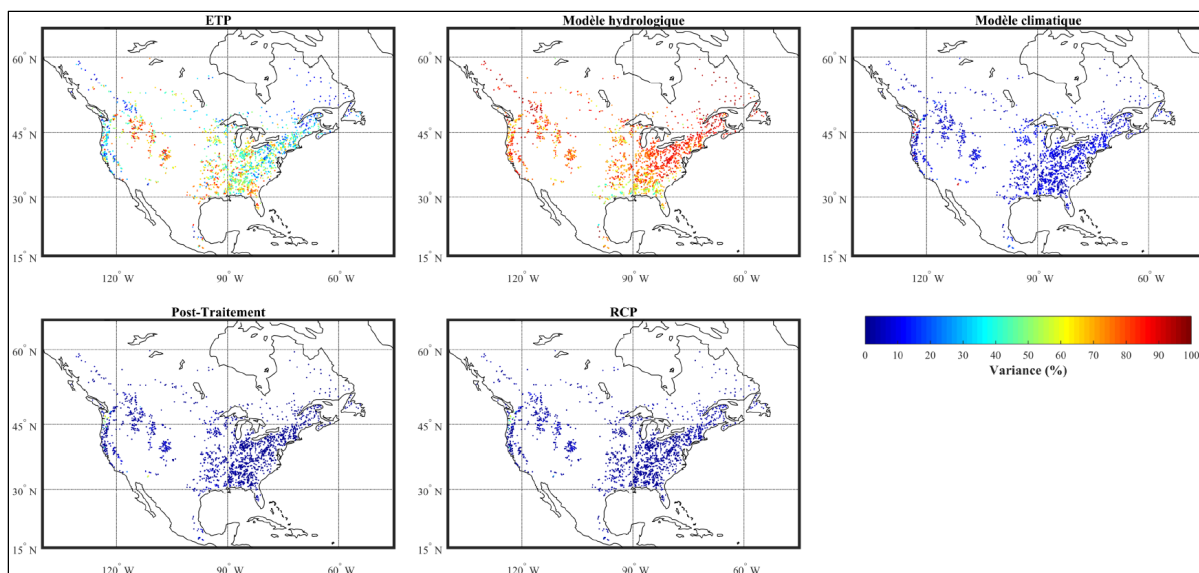


Figure-A IV-5 Analyse de décomposition de la variance du 7Q2 pour l'horizon 2080, incluant la formulation de T

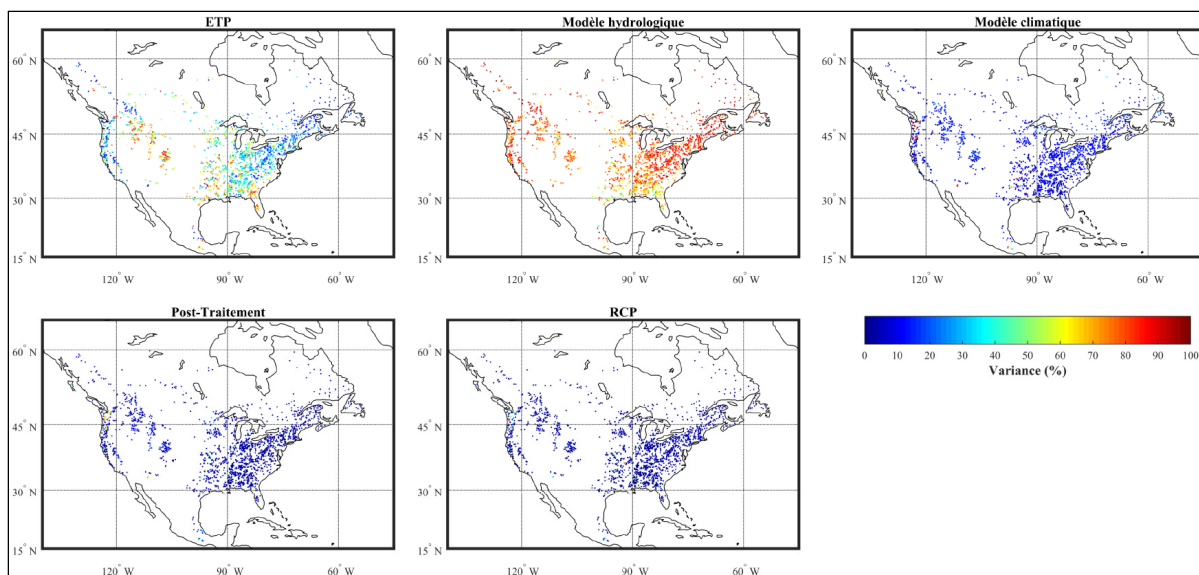


Figure-A IV-6 Analyse de décomposition de la variance du 7Q10 pour l'horizon 2050, incluant la formulation de T

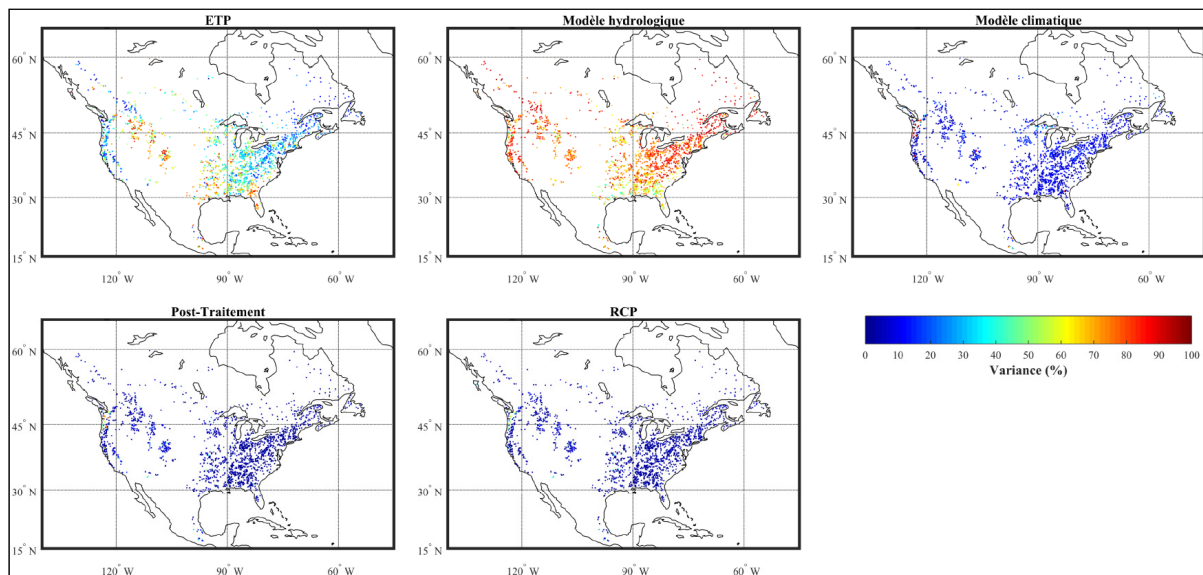


Figure-A IV-7 Analyse de décomposition de la variance du 7Q10 pour l'horizon 2080, incluant la formulation de T

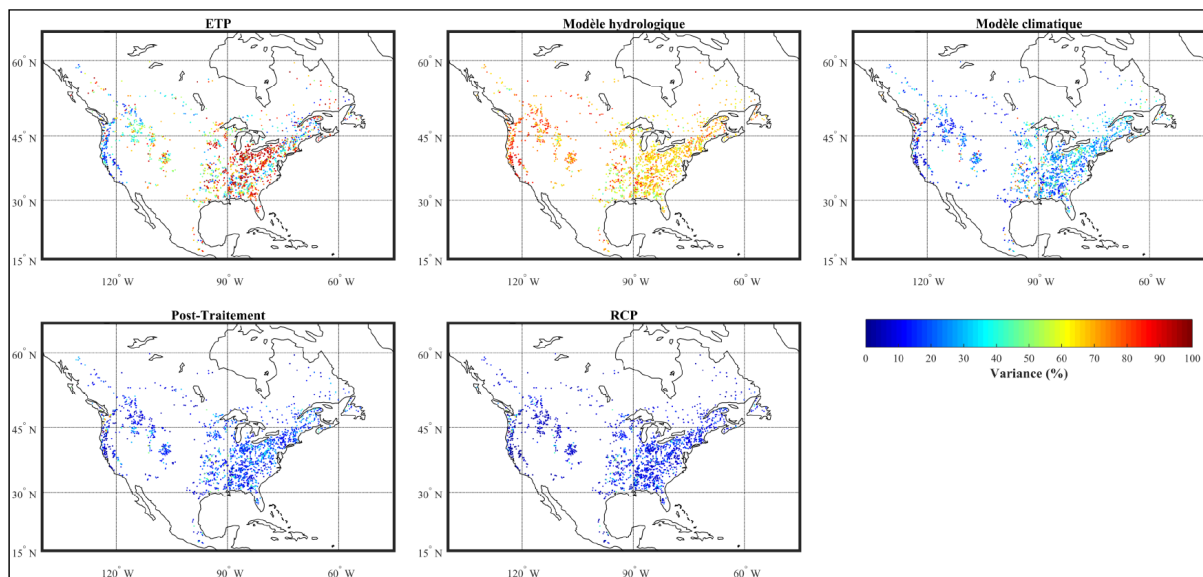


Figure-A IV-8 Analyse de décomposition de la variance du 30Q5 pour l'horizon 2050, incluant la formulation de T

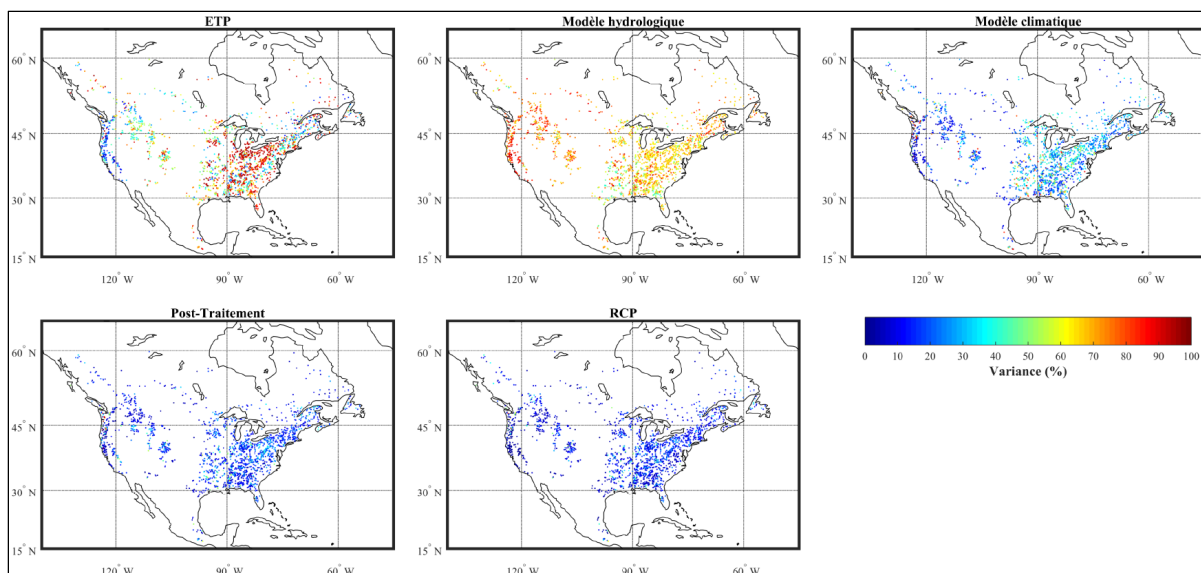


Figure-A IV-9 Analyse de décomposition de la variance du 30Q5 pour l'horizon 2080, incluant la formulation de T



## ANNEXE V

### ANALYSE DE DÉCOMPOSITION DE LA VARIANCE POUR L'HORIZON 2050

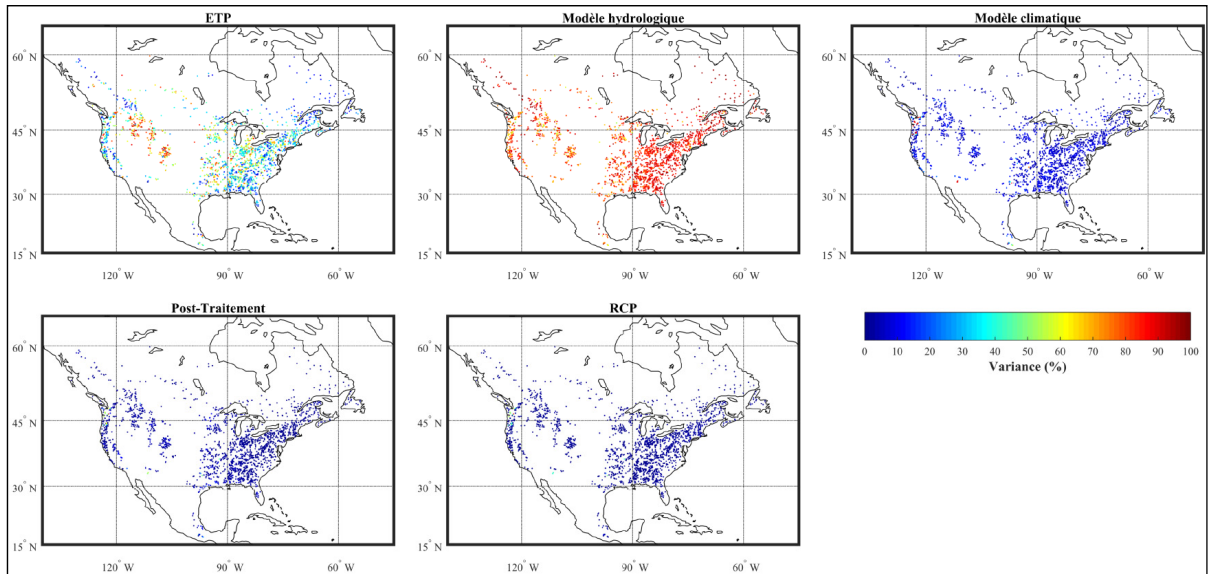


Figure-A V-1 Analyse de décomposition de la variance du 7Q2 pour l'horizon 2050

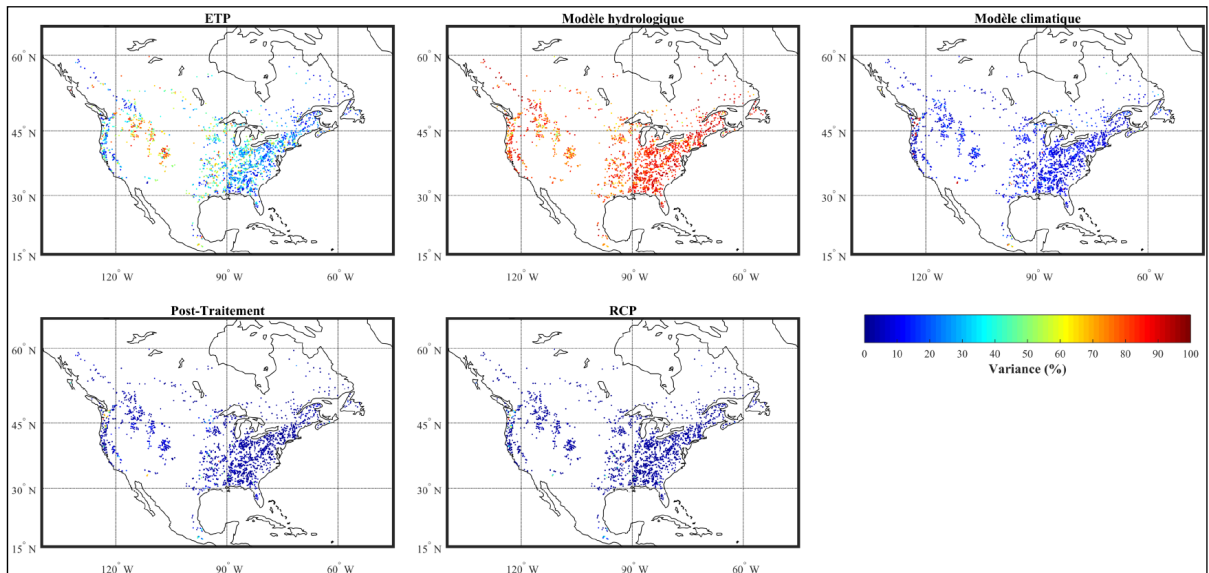


Figure-A V-2 Analyse de décomposition de la variance du 7Q10 pour l'horizon 2050

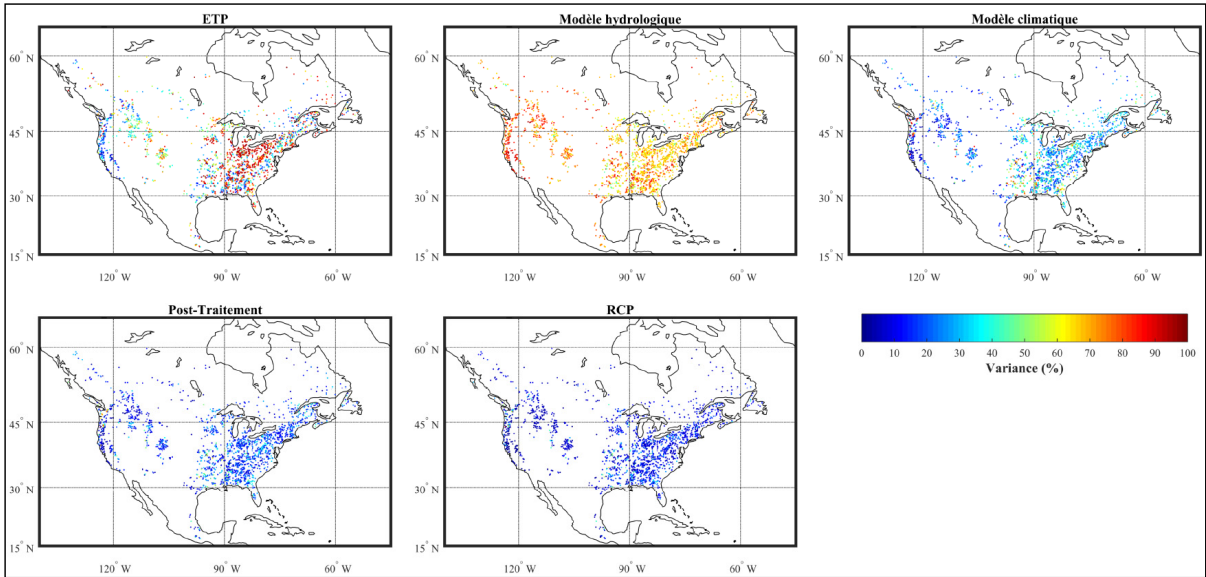


Figure-A V-3 Analyse de décomposition de la variance du 30Q5 pour l’horizon 2050

## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anctil, F., Rousselle, J., & Lauzon, N. (2012). *Hydrologie : Cheminements de l'eau* (2<sup>e</sup> éd.). Québec, QC : Presses internationales Polytechnique.
- Arsenault, R., Bazile, R., Ouellet Dallaire, C., & Brissette, F. (2016). CANOPEX: A Canadian hydrometeorological watershed database. *Hydrological Processes*, 30(15), 2734-2736. doi: 10.1002/hyp.10880
- Arsenault, R., Brissette, F., & Martel, J. L. (2018). The hazards of split-sample validation in hydrological model calibration. *Journal of Hydrology*, 566, 346-362. doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.09.027
- Arsenault, R., Poulin, A., Côté, P., & Brissette, F. (2013). Comparison of stochastic optimization algorithms in hydrological model calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19(7), 1374-1384. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000938
- Bae, D. H., Jung, I. W., & Lettenmaier, D. P. (2011). Hydrologic uncertainties in climate change from IPCC AR4 GCM simulations of the Chungju Basin, Korea. *Journal of Hydrology*, 401(1-2), 90-105. doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.02.012
- Baier, W., & Robertson, G. W. (1965). Estimation of latent evaporation from simple weather observations. *Canadian journal of plant science*, 45(3), 276-284. doi: 10.1139/cjss-2017-0112
- Beven, K. (2001). On hypothesis testing in hydrology. *Hydrological Processes*, 15(9), 1655-1657. doi: 10.1002/hyp.436
- Beven, K. J. (2011). *Rainfall-runoff modelling: the primer* (2<sup>e</sup> éd.). Lancaster, Royaume-Uni: John Wiley & Sons.
- Blaney, H. F., & Criddle, W. D. (1950). *Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data*. Washington, DC: US Department of Agriculture, Soil Conservation Service.
- Brigode, P., Oudin, L., & Perrin, C. (2013). Hydrological model parameter instability: A source of additional uncertainty in estimating the hydrological impacts of climate change?. *Journal of Hydrology*, 476, 410-425. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.11.012
- Bukovsky, M.S. (2011). Masks for the Bukovsky regionalization of North America. Repéré à <http://www.narccap.ucar.edu/contrib/bukovsky/>
- CEHQ. (2015). Lignes directrices pour l'estimation des débits d'étiage sur le territoire québécois. Repéré à <https://www.cehq.gouv.qc.ca/debit-etiage/methode/index.htm>

- Charron, I. (2016). *Guide sur les scénarios climatiques : Utilisation de l'information climatique pour guider la recherche et la prise de décision en matière d'adaptation* (Édition 2016). Montréal, QC : Ouranos.
- Chen, J., Brissette, F. P., Chaumont, D., & Braun, M. (2013a). Performance and uncertainty evaluation of empirical downscaling methods in quantifying the climate change impacts on hydrology over two North American river basins. *Journal of Hydrology*, 479, 200-214. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.11.062
- Chen, J., Brissette, F. P., Chaumont, D., & Braun, M. (2013b). Finding appropriate bias correction methods in downscaling precipitation for hydrologic impact studies over North America. *Water Resources Research*, 49(7), 4187-4205. doi: 10.1002/wrcr.20331
- Chen, J., Brissette, F. P., Poulin, A., & Leconte, R. (2011). Overall uncertainty study of the hydrological impacts of climate change for a Canadian watershed. *Water Resources Research*, 47(12). doi: 10.1029/2011WR010602
- Conagua. (2008). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)*. Repéré à <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>
- Conagua. (2019). *Programa Nacional contra la Sequía: Monitoreo de la Sequía*. Repéré à <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/programa-nacional-contra-la-sequia-a-monitoreo-de-la-sequia-64594>
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. K. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of hydrology*, 158(3-4), 265-284. doi: 10.1016/0022-1694(94)90057-4
- Ferro, C. A. (2004). *Attributing variation in a regional climate change modelling experiment* (Projet PRUDENCE). Repéré à [http://prudence.dmi.dk/public/publications/analysis\\_of\\_variance.pdf](http://prudence.dmi.dk/public/publications/analysis_of_variance.pdf)
- Fortin, V. (2000). *Le modèle météo-apport HSAMI: historique, théorie et application*. Varennes, QC : Institut de recherche d'Hydro-Québec.
- Fortin, V., & Turcotte, R. (2006). *Le modèle hydrologique MOHYSE*. SCA7420 : Modèles hydrologique. Université du Québec à Montréal.
- Giuntoli, I., Vidal, J. P., Prudhomme, C., & Hannah, D. M. (2015). Future hydrological extremes: the uncertainty from multiple global climate and global hydrological models. *Earth Syst. Dynam.*, 6, 267-285. doi: 10.5194/esd-6-267-2015

- Giuntoli, I., Villarini, G., Prudhomme, C., & Hannah, D. M. (2018). Uncertainties in projected runoff over the conterminous United States. *Climatic Change*, 150(3-4), 149-162. doi: 10.1007/s10584-018-2280-5
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), 2014. *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge, Royaume-Uni: Cambridge University Press.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2), 80-91. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003
- Hamon, W. R. (1960). *Estimating potential evapotranspiration*. (Thèse de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, États-Unis).
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, 1(2), 96-99. doi: 10.13031/2013.26773
- Jensen, M. E., & Haise, H. R. (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 89, 15-41.
- Kay, A. L., & Davies, H. N. (2008). Calculating potential evaporation from climate model data: A source of uncertainty for hydrological climate change impacts. *Journal of Hydrology*, 358(3-4), 221-239. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.06.005
- Kharrufa, N. S. (1985). Simplified equation for evapotranspiration in arid regions. *Beiträge zur Hydrologie*, 5(1), 39-47.
- Kingston, D. G., Todd, M. C., Taylor, R. G., Thompson, J. R., & Arnell, N. W. (2009). Uncertainty in the estimation of potential evapotranspiration under climate change. *Geophysical Research Letters*, 36(20). doi: 10.1029/2009GL040267
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259-263. doi: 10.1127/0941-2948/2006/0130
- Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in geosciences*, 5, 89-97.

- Livneh, B., Bohn, T. J., Pierce, D. W., Munoz-Arriola, F., Nijssen, B., Vose, R., ... & Brekke, L. (2015). A spatially comprehensive, hydrometeorological data set for Mexico, the US, and Southern Canada 1950–2013. *Scientific data*, 2, 150042. doi :10.1038/sdata.2015.42
- Martel, J. L., Demeester, K., Brissette, F., Poulin, A., & Arsenault, R. (2017). HMETS-A simple and efficient hydrology model for teaching hydrological modelling, flow forecasting and climate change impacts. *International Journal of Engineering Education*, 33(4), 1307-1316.
- McDonald, J.H. (2014). *Handbook of Biological Statistics* (3<sup>e</sup> éd.). Baltimore, MD: Sparky House Publishing.
- McGuinness, J. L., & Bordne, E. F. (1972). *A comparison of lysimeter-derived potential evapotranspiration with computed values* (No. 1452). Washington, DC: US Dept. of Agriculture.
- McMahon, T. A., Finlayson, B. L., & Peel, M. C. (2016). Historical developments of models for estimating evaporation using standard meteorological data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3(6), 788-818. doi: 10.1002/wat2.1172
- Minville, M., Brissette, F., & Leconte, R. (2008). Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed. *Journal of hydrology*, 358(1-2), 70-83. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.05.033
- Minville, M., Cartier, D., Guay, C., Leclaire, L. A., Audet, C., Le Digabel, S., & Merleau, J. (2014). Improving process representation in conceptual hydrological model calibration using climate simulations. *Water Resources Research*, 50(6), 5044-5073. doi: 10.1002/2013WR013857
- Mpelasoka, F. S., & Chiew, F. H. (2009). Influence of rainfall scenario construction methods on runoff projections. *Journal of Hydrometeorology*, 10(5), 1168-1183. doi: 10.1175/2009JHM1045.1
- Mundo-Molina, M. (2015). Climate change effects on evapotranspiration in Mexico. *American Journal of Climate Change*, 4(02), 163. doi: 10.4236/ajcc.2015.42012
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290. doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6
- Oudin, L. (2004). *Recherche d'un modèle d'évapotranspiration potentielle pertinent comme entrée d'un modèle pluie-débit global*. (Thèse de doctorat, École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF), Paris).

- Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005a). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. *Journal of hydrology*, 303(1-4), 290-306. doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.026
- Oudin, L., Michel, C., & Anctil, F. (2005b). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 1—Can rainfall-runoff models effectively handle detailed potential evapotranspiration inputs?. *Journal of Hydrology*, 303(1-4), 275-289. doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.025
- Penman, H. L. (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. R. Soc. Lond. A*, 193(1032), 120-145. doi: 10.1098/rspa.1948.0037
- Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of hydrology*, 279(1-4), 275-289. doi: 10.1016/S0022-1694(03)00225-7
- Schaake, J., Cong, S., & Duan, Q. (2006). The US MOPEX data set. *IAHS publication*, 307(9).
- Schmidli, J., Frei, C., & Vidale, P. L. (2006). Downscaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 26(5), 679-689. doi: 10.1002/joc.1287
- Seiller, G., & Anctil, F. (2016). How do potential evapotranspiration formulas influence hydrological projections?. *Hydrological Sciences Journal*, 61(12), 2249-2266. doi: 10.1080/02626667.2015.1100302
- Seiller, G., Anctil, F., & Perrin, C. (2012). Multimodel evaluation of twenty lumped hydrological models under contrasted climate conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(4), p-1171. doi: 10.5194/hess-1116-1171-2012
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94. doi : 10.2307/210739
- Troin, M., Arsenault, R., Martel, J. L., & Brissette, F. (2018). Uncertainty of hydrological model components in climate change studies over two Nordic Quebec Catchments. *Journal of Hydrometeorology*, 19(1), 27-46. doi: 10.1175/JHM-D-17-0002.1
- Valéry, A., Andréassian, V., & Perrin, C. (2014). ‘As simple as possible but not simpler’: What is useful in a temperature-based snow-accounting routine? Part 2—Sensitivity analysis of the Cemaneige snow accounting routine on 380 catchments. *Journal of hydrology*, 517, 1176-1187. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.058

- Valipour, M., Sefidkouhi, M. A. G., & Raeini, M. (2017). Selecting the best model to estimate potential evapotranspiration with respect to climate change and magnitudes of extreme events. *Agricultural Water Management*, 180, 50-60. doi: 10.1016/j.agwat.2016.08.025
- Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... & Masui, T. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109(1-2), 5. doi: 10.1007/s10584-011-0148-z
- Xu, C. Y., & Singh, V. P. (2002). Cross comparison of empirical equations for calculating potential evapotranspiration with data from Switzerland. *Water Resources Management*, 16(3), 197-219. doi: 10.1023/A:1020282515975