



**ESTIMATION DE L'IMPACT DES CHANGEMENTS
CLIMATIQUES ANTICIPÉS SUR LE RÉGIME
HYDROLOGIQUE DE BASSINS VERSANTS DE TAILLES
VARIANT ENTRE 25 ET 500 KM²**

Projet CC12.1

**Didier Haguma,
Samah Larabi,
Robert Leconte**

**Département de génie civil et de génie du bâtiment
Université de Sherbrooke**

Décembre 2019

Table des matières

Table des matières.....	i
Tables des figures.....	iii
Tables des tableaux.....	vi
Résumé.....	ix
1 Introduction.....	1
1.1 Problématique.....	1
1.2 Objectifs	2
1.3 Méthodologie générale.....	2
1.3.1 Mise en œuvre du modèle hydrologique	3
1.3.2 Simulation des scénarios hydrologiques	4
1.3.3 Analyse des indicateurs hydrologiques	5
1.3.4 Régionalisation.....	5
1.4 Zone d'étude	6
2 Données.....	11
2.1 Plateforme de modélisation hydrologique	11
2.2 Données hydrométriques.....	14
2.3 Données climatiques	15
2.3.1 Projections Cordex.....	15
2.3.2 Trajectoires RCP	17
2.3.3 Info-Climat	17
3 Méthodologie	18
3.1 Paramétrage du modèle.....	18
3.1.1 Paramètres de Calage	18
3.1.2 Procédure de calage et de validation	18
3.1.3 Régionalisation des paramètres	20
3.2 Mise à l'échelle et correction de biais.....	21
3.2.1 Mises à l'échelle temporelle	21
3.2.2 Correction de biais	21
3.3 Simulations hydrologiques.....	22
3.3.1 Ensemble de jeux de paramètres	22
3.3.2 Crues maximales saisonnières	24
3.4 Courbes de fréquence de crue et facteurs de majoration.....	24
3.4.1 Courbes de fréquence de crue.....	24
3.4.2 Facteurs de majoration.....	24
4 Résultats	26
4.1 Calage et validation du modèle HYDROTEL	26
4.2 Mise à l'échelle temporelle et correction de biais.....	27
4.3 Changements de la température et des précipitations	27
4.4 Changements hydrologiques.....	31
4.5 Facteurs de majoration de débits	38
4.5.1 Courbes de fréquence de crue.....	38
4.5.2 Facteurs de majoration.....	48

5	Conclusion	65
	Références	68
	ANNEXE 1 : Liste des bassins versants du Québec de taille entre 25 et 500 km ²	70
	ANNEXE 2 : Facteurs de majoration pour les crues maximales avec les distributions de Gumbel et log-normale.....	72
	ANNEXE 3 : Variation géographique de la moyenne des facteurs de majoration avec la distribution Fréchet	89

Tables des figures

Figure 1 Zones hydrographiques, sud-ouest du Québec.....	7
Figure 2 Zones hydrographiques, sud-est du Québec.....	8
Figure 3 Bassins versants étudiés dont la superficie en amont est entre 25 et 500 km ² .	13
Figure 4 Stations hydrométriques qui ont participé au calage. Les points sont proportionnels à la taille des bassins versants	15
Figure 5 Changements mensuels de la température moyenne, sud-est du Québec.....	28
Figure 6 Changements mensuels de la température moyenne, sud-ouest du Québec...	29
Figure 7 Changements mensuels des précipitations, sud-est du Québec.....	30
Figure 8 Changements mensuels des précipitations, sud-ouest du Québec	31
Figure 9 Changements mensuels des débits, sud-est du Québec	33
Figure 10 Changements mensuels des débits, sud-ouest du Québec.....	34
Figure 11 Incertitude des débits journaliers simulés pour les périodes de référence et du climat futur, pour le bassin versant du tronçon 1493 et ses sous bassins, Montérégie ..	35
Figure 12 Incertitude des débits journaliers simulés pour les périodes de référence et du climat futur, pour le bassin versant du tronçon 60 et ses sous bassins, Côte-Nord B.....	36
Figure 13 Incertitude des débits journaliers simulés pour les périodes de référence et du climat futur, pour le bassin versant du tronçon 252 et ses sous bassins, Gaspésie.....	37
Figure 14 Incertitude des courbes de fréquence de crue pour les scénarios RCP4.5 du tronçon 1493 et ses sous-bassins, Montérégie	39
Figure 15 Incertitude des courbes de fréquence de crue pour les scénarios RCP8.5 du tronçon 1493 et ses sous-bassins, Montérégie	40
Figure 16 Incertitude des courbes de fréquence de crue pour les scénarios RCP4.5 du tronçon 252 et ses sous-bassins, Gaspésie.....	41
Figure 17 Incertitude des courbes de fréquence de crue pour les scénarios RCP8.5 du tronçon 252 et ses sous-bassins, Gaspésie.....	42
Figure 18 Incertitude des courbes de fréquence de crue pour les scénarios RCP4.5 du tronçon 60 et ses sous-bassins, Côte-Nord B	43

Figure 19 Incertitude des courbes de fréquence de crue pour les scénarios RCP8.5 du tronçon 60 et ses sous-bassins, Côte-Nord B	44
Figure 20 Incertitude des courbes de fréquence de crue pour les scénarios RCP4.5 du tronçon 355 et ses sous-bassins, Abitibi.....	45
Figure 21 Incertitude des courbes de fréquence de crue pour les scénarios RCP8.5 du tronçon 355 et ses-sous bassins, Abitibi.....	46
Figure 22 Incertitude des courbes de fréquence de crue pour les scénarios RCP4.5 du tronçon 612 et ses sous-bassins, Côte-Nord B	47
Figure 23 Incertitude des courbes de fréquence de crue pour les scénarios RCP8.5 du tronçon 612 et ses sous-bassins, Côte-Nord B	48
Figure 24 Facteurs de majoration (75 ^{ième} percentile) pour les régions hydroclimatiques situées au sud-est du Québec pour une de période de retour de 20 ans au printemps et en été	60
Figure 25 Facteurs de majoration (75 ^{ième} percentile) pour les régions hydroclimatiques situées au sud-est du Québec pour une de période de retour de 50 ans au printemps et en été	61
Figure 26 Facteurs de majoration (75 ^{ième} percentile) pour les régions hydroclimatiques situées au sud-ouest du Québec pour une de période de retour de 20 ans au printemps et en été	62
Figure 27 Facteurs de majoration (75 ^{ième} percentile) pour les régions hydroclimatiques situées au sud-ouest du Québec pour une de période de retour de 50 ans au printemps et en été	63
Figure 28 Facteurs de majoration (moyenne) pour les régions hydroclimatiques situées au sud-est du Québec pour une de période de retour de 20 ans au printemps et en été	90
Figure 29 Facteurs de majoration (moyenne) pour les régions hydroclimatiques situées au sud-est du Québec pour une de période de retour de 50 ans au printemps et en été	91

Figure 30 Facteurs de majoration (moyenne) pour les régions hydroclimatiques situées au sud-ouest du Québec pour une de période de retour de 20 ans au printemps et en été 92

Figure 31 Facteurs de majoration (moyenne) pour les régions hydroclimatiques situées au sud-ouest du Québec pour une de période de retour de 50 ans au printemps et en été 93

Tables des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques des bassins versants de la région Montérégie et bas Saint-Laurent.....	9
Tableau 2: Caractéristiques des bassins versants de la région Gaspésie, Saguenay, Outaouais, Côte-Nord, et Abitibi-Témiscamingue et Saint-Laurent Nord-Ouest.....	10
Tableau 3 Projets HYDROTEL des régions hydroclimatiques.....	12
Tableau 4 Nombre des bassins versants par classe.....	13
Tableau 5 Stations hydrométriques utilisées pour le calage.....	14
Tableau 6 Ensemble des projections climatiques du projet NA-CORDEX.....	16
Tableau 7 Liste des paramètres HYDROTEL ajustés.....	18
Tableau 8 Jeux de paramètres du modèle HYDROTEL.....	23
Tableau 9 Changement de la température moyenne et des précipitations.....	30
Tableau 10 Changement de ruissellement annuel (Q/Q).....	32
Tableau 11 Moyenne et écart type des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 et 50 ans avec la distribution de Fréchet.....	51
Tableau 12 75 ^{ième} et 90 ^{ième} percentiles des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 et 50 ans avec la distribution de Fréchet.....	52
Tableau 13 Moyenne des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Fréchet.....	53
Tableau 14 75 ^{ième} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Fréchet.....	54
Tableau 15 90 ^{ième} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Fréchet.....	55
Tableau 16 Moyenne des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 50 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Fréchet.....	56

Tableau 17 75 ^{ième} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 50 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Fréchet	57
Tableau 18 90 ^{ième} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 50 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Fréchet	58
Tableau 19: Liste des bassins versants ayant une taille entre 25 et 500 km ² de la région bas Saint-Laurent et Montérégie.....	70
Tableau 20: Liste des bassins versants ayant une taille comprise entre 25 et 500 km ² de la région Gaspésie, Saguenay, Outaouais, Côte Nord, et Abitibi-Témiscamingue et Saint-Laurent Nord-Ouest.....	71
Tableau 21 Moyenne et écart type des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 et 50 ans avec la distribution de Gumbel	73
Tableau 22 75 ^{ième} et 90 ^{ième} percentiles des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 et 50 ans avec la distribution de Gumbel	74
Tableau 23 Moyenne et écart type des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 et 50 ans avec la distribution log-normale.....	75
Tableau 24 75 ^{ième} et 90 ^{ième} percentiles des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 et 50 ans avec la distribution log-normale	76
Tableau 25 Moyenne des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Gumbel.....	77
Tableau 26 75 ^{ième} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Gumbel.....	78
Tableau 27 90 ^{ième} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Gumbel.....	79

Tableau 28 Moyenne des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution log-normale.....	80
Tableau 29 75 ^{ième} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution log-normale.....	81
Tableau 30 90 ^{ième} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution log-normale.....	82
Tableau 31 Moyenne des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 50 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Gumbel.....	83
Tableau 32 75 ^{ième} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 50 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Gumbel.....	84
Tableau 33 90 ^{ième} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 50 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Gumbel.....	85
Tableau 34 Moyenne des facteurs acteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 50 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution log-normale.....	86
Tableau 35 75 ^{ième} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 50 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution log-normale.....	87
Tableau 36 90 ^{ième} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 50 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution log-normale.....	88

Résumé

Le présent rapport expose l'impact des changements climatiques anticipés sur le régime hydrologique de bassins versants de taille dite moyenne, soit entre 25 et 500 km², de 12 principales régions hydroclimatiques situées dans le Québec méridional. Pour ces bassins versants, la taille revêt une importance considérable sur la réponse anticipée aux changements climatiques. Dépendamment des caractéristiques physiographiques, le temps de concentration des bassins versants peut varier de quelques heures à quelques jours. Il en résulte que généralement les plus petits bassins versants seront davantage influencés par les systèmes météorologiques à petite échelle, alors que les plus grands bassins versants verront leur réponse hydrologique davantage influencée par la fonte de neige printanière.

L'objectif est d'évaluer les changements climatiques anticipés sur les débits maximums annuels associés aux récurrences (ou périodes de retour) de 20 et 50 ans pour les bassins versants de taille moyenne et d'obtenir des facteurs de majoration des débits à considérer pour ces bassins. Ici, le facteur de majoration est un facteur multiplicatif que l'on applique à une crue de récurrence de T années en climat actuel pour obtenir la crue de récurrence de T années sous des conditions climatiques futures. On peut aussi le définir comme étant le rapport entre le débit du climat futur et celui du climat de référence de même période de retour. La méthodologie consiste à la mise en œuvre du modèle hydrologique HYDROTEL, à simuler des projections hydrologiques à partir des sorties de modèles régionaux du climat du projet CORDEX et à l'évaluation des facteurs de majoration des débits associés aux périodes de retour de 20 et 50 ans. Les facteurs de majoration des débits obtenus pour ces bassins sont régionalisés à l'ensemble des bassins versants de la zone d'étude.

D'après les projections CORDEX réalisées selon les trajectoires d'émission de gaz à effet de serre (GES) RCP4.5 et RCP8.5, les impacts des changements climatiques sur le climat de la zone d'étude seraient une augmentation de la température moyenne et un

changement des précipitations mensuelles. L'hiver connaîtrait des changements importants par rapport aux autres saisons et une plus grande incertitude tant pour la température que pour les précipitations. Il y aurait moins de changement de la température et des précipitations pendant l'été. En moyenne la température estivale augmenterait entre 2.1 et 2.7 °C et les précipitations connaîtraient une hausse comprise entre 2 et 5%.

Il y aurait un changement du régime hydrologique dans le climat futur par rapport à la période de référence: une importante augmentation du volume de ruissellement pendant l'hiver dans toutes les régions hydroclimatiques, un devancement de la crue printanière et une diminution du volume et du débit de pointe. Avec le scénario RCP4.5, le volume de ruissellement annuel augmenterait de 1% à 28%, dépendamment des régions considérées. Le scénario RCP8.5 montre une diminution du volume de ruissellement annuel pour certaines régions. Il y aurait aussi une faible augmentation du ruissellement pendant l'été pour toutes les régions.

Les valeurs de crues maximales saisonnières extraites des projections hydrologiques ont été utilisées pour déterminer les courbes de fréquence de crue. Ces valeurs ont été ajustées aux distributions de probabilité de Gumbel, log-normale et Fréchet. Les courbes de fréquence de crue ont été utilisées pour établir des débits associés aux périodes de retour de 20 et 50 ans pour le climat de référence et le climat futur. Les trois distributions ont donné des courbes de fréquence de crue comportant des différences quant à leur allure générale et dans l'estimation des débits.

Pour la majorité de bassins versants étudiés, les crues les plus importantes dans ces bassins seraient liées à la fonte de neige dans le climat futur. Pour une même période de retour, les débits du printemps seraient plus élevés par rapport aux débits d'été et les débits du climat futur seraient moins importants par rapport aux débits du climat de référence, et ce autant pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Des facteurs de majoration

ont été calculés pour tous les bassins versants d'étude. La moyenne des facteurs de majoration associés aux scénarios RCP4.5 et RCP8.5 est inférieure à 1 pour la plupart des régions hydroclimatiques, que ce soit pour la pointe printanière ou la crue estivale et pour les récurrences de 20 ou 50 ans.

Plutôt que de considérer la valeur moyenne des facteurs de majoration comme critère de conception, on peut choisir une approche plus conservatrice qui prenne en compte l'intervalle d'incertitude de ces facteurs liée à la structure des modèles de climat. Ainsi, les facteurs de majoration correspondant au 75ième percentile sont pour la plupart supérieurs à l'unité, que ce soit pour la pointe printanière ou la crue estivale. La variation géographique des facteurs de majoration montre une faible tendance générale nord-sud à la hausse dans chaque région et aussi pour l'ensemble des régions, pour toutes les périodes de retour, pour tous les scénarios de GES et pour les saisons printanière et estivale. On remarque une tendance à l'augmentation des crues maximales au nord et une diminution au sud de la zone d'étude, qui suit le changement de la température et des précipitations dans le climat futur.

1 Introduction

1.1 Problématique

L'analyse des impacts de changements climatiques sur les régimes hydrologiques de bassins versants a fait l'objet de nombreuses études au Québec et ailleurs au Canada et dans le monde. Au Québec, le Centre d'expertise hydrique du Québec (aujourd'hui la Direction de l'expertise hydrique et atmosphérique du Québec) a produit en 2013 le premier Atlas hydroclimatique du Québec méridional décrivant l'impact des changements climatiques sur les régimes de crues, d'étiages et d'hydraulicité à l'horizon 2050. Deux mises à jour ont eu lieu en 2015 (Centre d'expertise hydrique du Québec, 2015) et en 2018. La taille des versants investigués varie de 512 km² à 18754 km². Les résultats de cet Atlas ont permis de produire une fiche technique des facteurs de majoration à intégrer dans les normes du Ministère des Transports du Québec (MTQ) pour les bassins dont la taille est supérieure à 500 km². Quant aux bassins versants de taille inférieure à 25 km², le Manuel de conception des ponceaux du MTQ recommande l'usage de la méthode rationnelle pour le calcul des débits de pointe. Cette méthode fait appel à la détermination de l'intensité d'une précipitation de conception tirée de courbe IDF (intensité-durée-fréquence) établie aux stations météorologiques voisines du site d'étude. Un rapport publié par l'INRS-ETE suggère des recommandations sur les facteurs de majoration à appliquer aux courbes IDF en climat futur (Mailhot et al., 2014). Ces majorations sont intégrées dans les normes du MTQ.

Dans ces études, il ressort une lacune au sujet des impacts des changements climatiques sur les bassins versants de taille intermédiaire, soit entre 25 km² et 500 km². Pour ces bassins versants, la taille revêt une importance considérable sur la réponse anticipée aux changements climatiques. Le temps de concentration d'un bassin versant donne une indication de la rapidité de la réponse hydrologique du bassin. Dépendamment des caractéristiques physiographiques (par exemple l'aire du bassin versant, sa forme, sa

topographie et sa couverture végétale), ce temps peut varier de quelques heures à quelques jours. Il en résulte que généralement les plus petits bassins versants seront davantage influencés par les systèmes météorologiques à petite échelle, comme les orages et les tornades, de l'ordre de quelques heures, alors que les plus grands bassins versants verront leur réponse hydrologique davantage influencée par de grands systèmes météorologiques, ainsi que par la fonte de neige printanière.

1.2 Objectifs

Le but du présent projet est d'évaluer les changements climatiques anticipés pour les bassins versants de taille moyenne, soit entre 25 et 500 km², et obtenir des recommandations sur les facteurs de majoration des débits à considérer pour ces bassins. Ces majorations permettront au MTQ de considérer les changements climatiques pour la conception hydraulique des ponceaux et des ponts au-dessus des rivières. Les objectifs spécifiques sont :

- 1- Évaluer l'impact des changements climatiques sur le régime hydrologique de bassins versants dits 'témoins' localisés à l'intérieur de la zone d'étude;
- 2- Régionaliser les résultats obtenus sur ces bassins témoins à l'ensemble des bassins versants localisés dans la zone d'étude;
- 3- Proposer des critères de majoration des débits applicables aux bassins en fonction de leurs caractéristiques hydroclimatiques et physiographiques.

1.3 Méthodologie générale

La méthodologie adoptée pour l'étude du projet consiste dans un premier temps à la mise en œuvre d'un modèle hydrologique sur une série de bassins versants témoins. Ensuite, les projections hydrologiques sont simulées à partir des projections climatiques issues de modèles régionaux du climat (MRC). Ces projections hydrologiques permettent de calculer des facteurs de majoration des débits pour les bassins versants témoins. Les facteurs de majoration des débits obtenus pour ces bassins sont régionalisés pour l'ensemble des bassins versants de la zone d'étude.

1.3.1 Mise en œuvre du modèle hydrologique

La mise en œuvre du modèle hydrologique représente l'ensemble des étapes nécessaires pour le développement d'un modèle hydrologique qui permet de simuler les débits en reproduisant les processus hydrologiques à l'échelle d'un bassin versant. Pour les objectifs de cette étude, le modèle hydrologique HYDROTEL (Fortin et al., 2001) a été retenu. HYDROTEL, qui a été développé par l'Institut national de recherche scientifique, secteur eau terre et environnement (INRS-ETE), est un modèle hydrologique distribué et à pas de temps continu. Un modèle distribué tient compte explicitement de la variabilité spatiale à l'intérieur du bassin versant et il est capable de faire de simulations à des points d'intérieur sans calage explicite à ces points (Reed et al., 2004).

HYDROTEL modèle simule l'ensemble des processus hydrologiques des bassins versants méridionaux à savoir : accumulation et fonte de neige, écoulement à la surface et dans le sol, écoulement en rivière et évapotranspiration. HYDROTEL fonctionne à un pas de temps égal ou inférieur à 24 heures. Dans le cadre de ce projet, le temps de concentration typique de bassins versants de la zone d'étude est de l'ordre de 1 à 12h. Un pas de temps de 3h a été fixé pour les simulations avec le modèle HYDROTEL.

La variabilité spatiale des caractéristiques de bassins versants est obtenue à partir des données du modèle numérique d'élévation et d'occupation du sol. Un bilan hydrologique vertical est calculé pour différentes unités hydrologiques relativement homogènes (UHRH), qui sont les unités de base du modèle. Après le bilan vertical, l'eau produite par le ruissellement de surface et l'écoulement des couches du sol est acheminée vers le réseau hydrographique (tronçons). À la fin, l'écoulement dans les tronçons est acheminé vers l'exutoire du bassin versant. Les données requises pour la mise en œuvre d'HYDROTEL sont les données physiographiques, dont la topographie, la couverture végétale, l'utilisation du territoire et les types de sol. Des observations

hydrométriques et météorologiques de précipitation et de température, compatibles avec le pas de temps utilisé par HYDROTEL, sont aussi nécessaires pour le calage et pour faire tourner le modèle.

Pour cette étude, le modèle HYDROTEL a été calé sur un ensemble de bassins versants témoins choisis pour chacune des principales régions hydroclimatiques du Québec. La sélection des bassins versants témoins est faite selon la disponibilité des observations hydrométriques au pas de temps de 3 heures et la qualité du modèle hydrologique sur le bassin versant. L'approche de calage automatique '*Dynamically Dimensioned Search algorithm*' (DDS) (Tolson & Shoemaker, 2008) a été utilisée. Pour chaque région hydroclimatique, des jeux de paramètres performants obtenus du calage sur les bassins versants témoins ont été transposés sur l'ensemble des bassins versants.

1.3.2 Simulation des scénarios hydrologiques

La production des scénarios hydrologiques en climat futur a été réalisée en faisant appel à des sorties de modèles régionaux du climat pour alimenter le modèle HYDROTEL. Les sorties de modèles utilisées sont les intrants du modèle HYDROTEL, à savoir les précipitations et températures minimales et maximales. Des projections climatiques issues du projet CORDEX (Mearns, 2017) ont été employées. Les simulations du projet CORDEX sont réalisées par différents modèles régionaux du climat pilotés par différents modèles de circulation générale. Ces réalisations sont disponibles pour un pas de temps journalier. Des méthodes de désagrégation temporelle au pas de temps de 3h ont été employées pour la mise à l'échelle temporelle de ces simulations. Des méthodes de correction de biais ont été aussi utilisées pour éliminer le biais entre les projections climatiques et les précipitations et la température observées sur une même période.

1.3.3 Analyse des indicateurs hydrologiques

Le principal indicateur hydrologique qui a été analysé est le débit maximal saisonnier. Pour chacun des scénarios hydrologiques produits sur la période de référence (1975-2005) et la période future (2040-2070), les valeurs de débit maximum pour la saison du printemps et pour la saison d'été ont été extraites. La crue maximale annuelle dans les bassins méridionaux correspond habituellement à la crue printanière. Cependant, la crue maximale annuelle peut occasionnellement se produire durant l'été, en particulier dans les plus petits bassins en raison des orages qui sont plus localisés que la fonte. Ces valeurs ont été par la suite utilisées dans une analyse statistique pour établir les débits associés à des périodes de retour de 20 et 50 ans en climat actuel et futur. À partir de ces débits, des facteurs de majoration ont été tirés en fonction de la période de retour. Cette analyse a été effectuée pour l'ensemble des scénarios hydrologiques, ce qui a permis d'établir la variabilité de cette majoration, ainsi que d'analyser son incertitude en fonction de la structure des MRC et de l'évolution des gaz à effet de serre (GES).

1.3.4 Régionalisation

La régionalisation réfère au processus par lequel l'information hydrologique est transférée d'un bassin versant à un autre et peut s'avérer satisfaisante si les bassins versants sont similaires d'un point de vue hydrologique. Ceci implique que des bassins versants caractérisés par une similarité climatique et physiographique devraient généralement produire une réponse hydrologique similaire. Différentes approches de régionalisation ont été proposées, dont la proximité géographique et la similitude physiographique (Razavi & Coulibaly, 2013). Les deux grandes catégories d'approches sont les approches qui dépendent d'un modèle hydrologique et les approches qui sont indépendantes d'un modèle hydrologique. Pour cette étude, la première approche de régionalisation a été considérée.

La régionalisation des facteurs de majoration a nécessité de faire tourner HYDROTEL sur des bassins versants autres que les bassins témoins en utilisant un ensemble de jeux de

paramètres. Les bassins versants de la zone d'étude ont été groupés en trois classes selon leur taille : 25 à 100 km², 100 à 300 km² et 300 à 500 km². Dans chaque région hydroclimatique, des dizaines de bassins versants de la classe de 300-500 km² ont été choisis et ils ont été simulés avec HYDROTEL avec au moins 3 jeux de paramètres. Les sorties du modèle hydrologique ont permis de calculer des facteurs de majoration pour ces bassins versants et leurs sous bassins de 25-100 et 100-300 km² et d'en déduire des facteurs de majoration pour toutes les régions hydroclimatiques.

1.4 Zone d'étude

Le but du présent projet de recherche est d'évaluer l'impact des changements climatiques sur le régime hydrique des bassins versants de tailles intermédiaires du Québec. L'étude a été consacrée aux bassins versants du Québec ayant une superficie comprise entre 25 et 500 km², en particulier aux bassins versants des affluents du fleuve Saint-Laurent, la rivière des Outaouais, la rivière Saguenay, de la Gaspésie, de la Côte-Nord et l'Abitibi-Jamésie, régions couvertes par la plateforme hydrologique produite par la Direction de l'expertise hydrique et atmosphérique du Québec (DEHA) (Centre d'expertise hydrique du Québec, 2015). La plateforme de modélisation hydrologique comprend des bassins versants de douze régions hydroclimatiques: Abitibi, Côte-Nord A, Côte-Nord B, Côte-Nord C, Côte-Nord D, Côte-Nord E, Gaspésie, Montérégie, Outaouais Aval, Saguenay, Saint-Laurent Nord-Ouest et Saint-Laurent Sud-Ouest. Les figures 1 et 2 ci-dessous présentent la zone d'étude et les régions hydroclimatiques. L'ensemble des bassins versants qui ont des données hydrométriques observées avec une taille entre 25 et 500 km² ont été identifiés à partir des bassins versants gérés par la DEHA. L'annexe 1 présente la liste des 53 bassins versants identifiés.

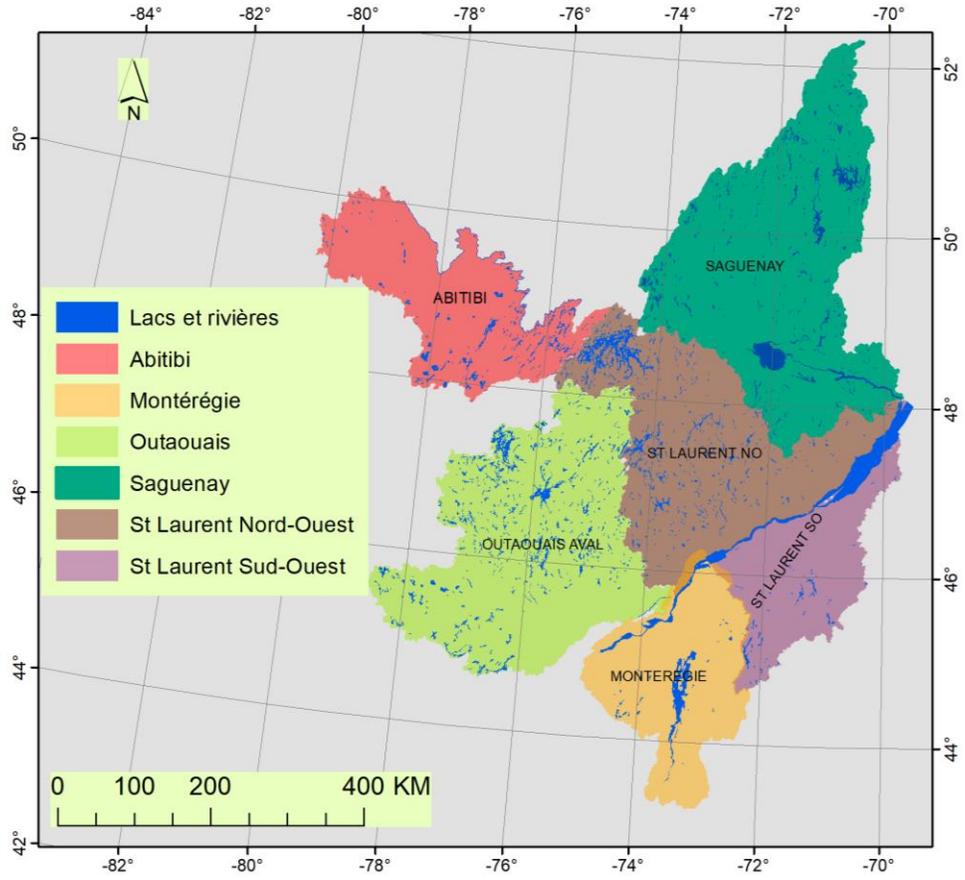


Figure 1 Zones hydrographiques, sud-ouest du Québec

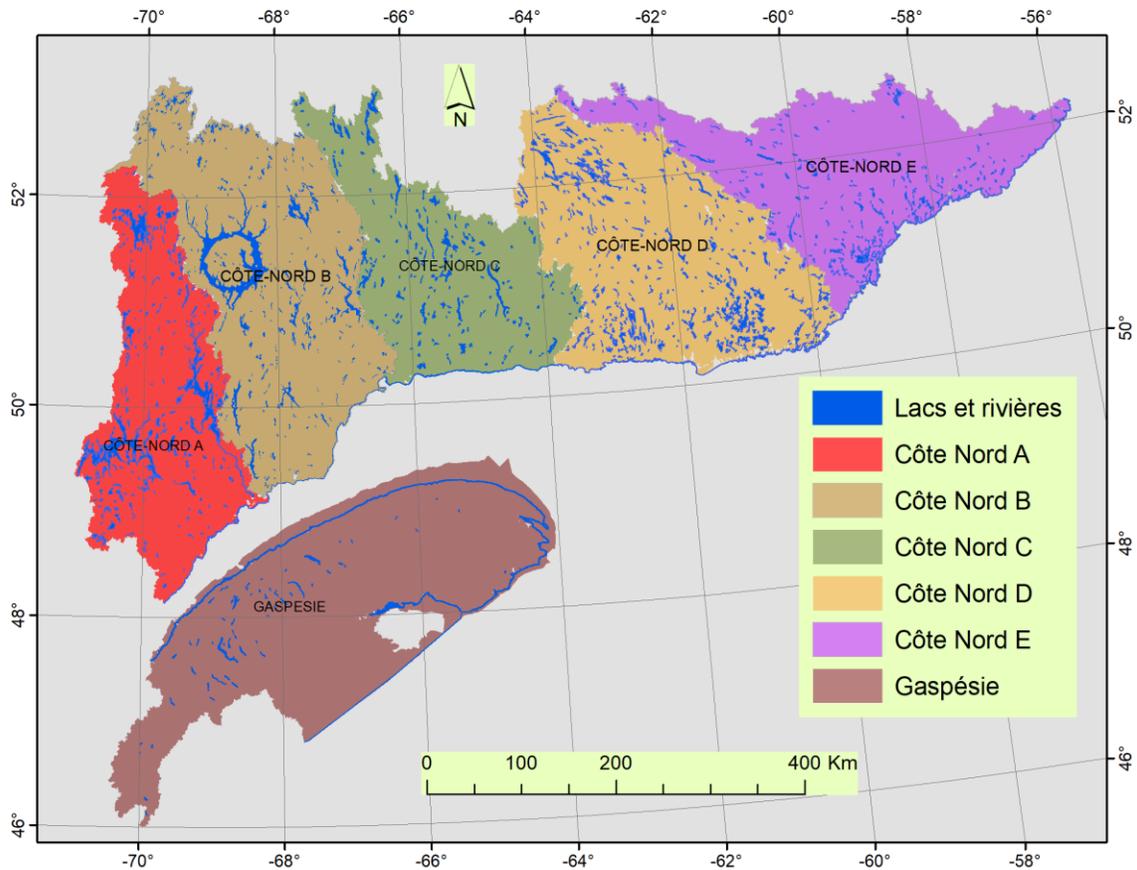


Figure 2 Zones hydrographiques, sud-est du Québec

La DEHA a fourni dans le cadre de ce projet les données hydrométriques aux pas de temps 3h. Certains de ces bassins versants, en particulier les bassins versants avec une taille environ 25 km², ne font pas partie de la plateforme 2020 produite par la DEHA. Les facteurs de majoration ont été régionalisés pour ces bassins versants. Pour la mise en œuvre de la plateforme de modélisation (calage et validation du modèle), 44 bassins versants ont été retenus avec des données hydrométriques aux 3h suffisamment longues. Les Tableaux 1 et 2 présentent leurs caractéristiques. La majorité des bassins versants ont une taille comprise entre 200 et 400 km² (environ 47% bassins) ou entre 40 et 100 km² (environ 30 % des bassins). Ceci permet de constater un profil diversifié de bassins versants. Le calage du modèle a été fait sur une sélection de bassin versants (Tableaux 1 et 2) parmi ces 44 bassins, qui représente chaque région du Québec

méridional. Les autres bassins versants servent pour l'évaluation de la performance du modèle calé.

Tableau 1: Caractéristiques des bassins versants de la région Montérégie et bas Saint-Laurent.

Station	Nom Station	Superficie BV (km ²)	Régime	Débit minimum (m ³ /s)	Débit médian (m ³ /s)	Débit maximum (m ³ /s)	Moyen annuel maximum (m ³ /s)
21702	Blanche	223	Influencé*	0.1	2.0	93.1	60.8
21916	Mitis	98.6	Naturel	0.02	0.9	31.7	16.2
22505	Fourchue	267	Influencé**	0.4	3.5	77.4	47.9
22601	Kamouraska ⁺⁺	213	Naturel	0.1	1.3	68.6	47.2
23002	Boyer Sud ⁺⁺	61	Naturel	0.02	0.6	74.8	36.2
23004	Boyer ⁺⁺	191	Naturel	0.1	2.2	219.6	108.6
23432	Bras d'Henri	154	Naturel	0.1	1.3	165.4	96.8
24015	Bourbon	48.10	Naturel	0.003	0.6	33.2	26.1
30309	Yamaska Nord	131	Influencé**	0.014	2.0	39.2	19.3
30314	Yamaska Sud-Est ⁺⁺	214	Influencé	0.034	2.5	230.3	94.3
30316	David	323	Naturel	0.009	1.8	141.0	110.5
30340	Yamaska Nord	235	Influencé*	0.04	3.3	83.5	56.2
30343	Yamaska Nord ⁺⁺	31	Influencé*	0.0002	0.4	12.6	8.1
30415	Des Hurons	308	Naturel	0.1	1.9	181.1	120.0
30421	L'Acadie	367	Naturel	0.031	1.8	177.8	96.4
30423	Morpions	94	Naturel	0.018	0.7	39.4	26.3
30425	De la Roche	73	Naturel	0.002	0.4	33.9	23.4
30920	Noire ⁺⁺	47	Naturel	0.017	0.3	16.2	11.2
30921	Des Anglais	246	Naturel	0.1	1.6	67.0	46.2
23702	Petite rivière du Chêne ⁺⁺	385	Naturel	0.3	3.6	207.4	132.9
30106	Bulstrode	344	Influencé	0.1	4.3	275.9	191

⁺⁺bassin versant utilisé pour le calage, * influencé jour, ** influencé mois

Tableau 2: Caractéristiques des bassins versants de la région Gaspésie, Saguenay, Outaouais, Côte-Nord, et Abitibi-Témiscamingue et Saint-Laurent Nord-Ouest.

Station	Nom Station	Superficie BV (km ²)	Régime	Débit minimum (m3/s)	Débit médian (m3/s)	Débit maximum (m3/s)	Moyen annuel maximum (m3/s)
40122	Du Nord ⁺⁺	311	Influencé ^{**}	0.7	5.2	77.2	54.1
40129	Doncaster	106	Naturel	0.3	1.6	37.5	26.7
40132	Décharge du lac Ludger	40.3	Influencé ^{**}	0.03	0.5	10.4	8.1
40212	Saint-Louis	40	Naturel	0.02	0.7	20.3	13.7
40409	Suffolk ⁺⁺	62.6	Naturel	0.03	0.6	28.6	17.8
50702	Portneuf	328	Naturel	1.2	5.5	106.4	86.3
50807	Ontaritzi	223	Influencé ^{**}	0.1	3.8	55.7	47.5
50812	Aux Pommes ⁺⁺	97.8	Naturel	0.3	1.5	33.4	25.4
50904	Saint-Charles	365	Influencé	0.1	5.2	97.1	67.7
50915	Nelson	58.4	Naturel	0.1	1.0	20.9	13.1
50916	Des Hurons	75.5	Naturel	0.3	1.7	89.5	47.1
51005	Montmorency ⁺⁺	267	Naturel	1.3	6.4	210.7	114.8
52228	Noire	188	Naturel	0.2	2.0	45.0	34.6
52401	Bayonne	194	Naturel	0.3	2.0	84.5	50.5
52606	Mastigouche ⁺⁺	205	Influencé [*]	0.1	2.3	56.7	43.1
60102	Petit Saguenay ⁺⁺	433	Naturel	0.7	7.7	184.4	111.7
60704	À Mars ⁺⁺	446	Naturel	1.9	7.3	178.3	96.1
60901	Du Moulin ⁺⁺	358	Naturel	1.0	4.5	77.6	52.5
61022	Pikauba ⁺⁺	490	Naturel	2.5	11.1	147.2	102.1
61024	Cyriac ⁺⁺	350	Naturel	1.4	6.1	125.8	74.2
61307	La Belle Rivière ⁺⁺	306	Naturel	0.4	4.3	59.9	41.3
71203	Aux Anglais ⁺⁺	431	Influencé	1.3	4.7	128.4	81.6
80106	Bourlamaque ⁺⁺	365	Naturel	0.2	5.1	62.5	46.4

⁺⁺bassin versant utilisé pour le calage, ^{*} influencé jour, ^{**} influencé mois

2 Données

2.1 Plateforme de modélisation hydrologique

Le modèle hydrologique utilisé est le modèle HYDROTEL. Ce modèle fait partie de la plateforme de modélisation à grande échelle développée par le Centre de l'expertise hydrique du Québec (aujourd'hui la DEHA) (CEHQ, 2014). Cette plateforme a servi pour produire les projections hydrologiques sur 50 bassins de grande taille ($> 500 \text{ km}^2$), qui ont servi à créer l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional. La plateforme couvre les bassins versants des affluents du fleuve Saint-Laurent, la rivière des Outaouais, la rivière Saguenay, de la Gaspésie, de la Côte-Nord et de l'Abitibi-Jamésie (Centre d'expertise hydrique du Québec, 2015). La plateforme modélise chaque zone hydrographique séparément (figures 1 et 2).

Un projet HYDROTEL pour chaque région hydrographique est alors construit. La DEHA a récemment complété une mise à jour de la plateforme pour la production de l'Atlas hydroclimatique 2020. Cette plateforme se caractérise par une résolution spatiale et temporelle (3h) plus fine que les versions précédentes. Cette plateforme, compatible avec les objectifs de l'étude, a été utilisée dans la présente étude. Le Tableau 3 montre les projets HYDROTEL des régions hydroclimatiques qui font partie de la plateforme de modélisation ainsi que leurs caractéristiques.

Tableau 3 Projets HYDROTEL des régions hydroclimatiques

Région	Superficie (km ²)	Nombre de UHRH	Nombre de Tronçons	Bassins versants de 25 à 500 km ²	
				Nombre	%
Abitibi	44 753.99	4 935	1 644	881	53.59
Côte-Nord A	46 397.12	3 522	1 078	794	73.65
Côte-Nord B	64 404.94	3 758	1 145	918	80.17
Côte-Nord C	42 898.35	2 817	920	678	73.70
Côte-Nord D	59 688.00	5 021	1 517	572	37.71
Côte-Nord E	49 984.90	3 324	1 050	633	60.29
Gaspésie	72 913.82	11 764	3 917	1547	39.49
Montérégie	38 934.55	5 564	1 916	711	37.11
Outaouais Aval	83 198.44	10 332	3 412	1712	50.18
Saguenay	87 467.67	6 824	2 212	1453	65.69
St Laurent Nord-Ouest	71 641.23	10 208	3 362	1923	57.20
St Laurent Sud-Ouest	34 570.46	8 623	2 889	1100	38.08

Les tronçons (rivières) dont la superficie en amont varie entre 25 et 500 km² ont été identifiés, dont certains ont été calés, selon la disponibilité des données hydrométriques. Trois classes de bassins versants ont été définies selon leur taille : 25-100, 100-300 et 300-500 km². Cette classification a permis de choisir des bassins versants à simuler situés dans différentes parties de la zone d'étude et de limiter le temps de calcul. En effet, comme le modèle hydrologique est distribué, ce sont seulement les bassins versants de 300-500 km² qui ont été simulés. Le Tableau 4 présente la classification des bassins versants par région hydroclimatique. Au total, 185 bassins versants de taille comprise entre 300 et 500 km² ont été simulés explicitement. Le nombre total des bassins versants considérés dans cette étude est 771 en y incluant les bassins de taille 25-100 et 100-300 km² imbriqués dans ceux de 300-500 km². Chaque bassin versant de 300-500 km² a été simulé avec un ensemble de jeux de paramètres (au moins 3) pour toutes les projections climatiques. La figure 3 montre la localisation géographique des bassins versants étudiés.

Tableau 4 Nombre des bassins versants par classe

Région	Taille des bassins versants (km ²)			Total
	25-100	100-300	300-500	
Abitibi	31	20	15	66
Côte-Nord A	24	17	16	57
Côte-Nord B	39	21	17	77
Côte-Nord C	23	26	20	69
Côte-Nord D	6	9	9	24
Côte-Nord E	28	23	18	69
Gaspésie	44	26	15	85
Montérégie	31	20	14	65
Outaouais Aval	22	23	14	59
Saguenay	33	19	14	66
St Laurent Nord-Ouest	20	21	15	56
St Laurent Sud-Ouest	33	27	18	78
Total	334	252	185	771

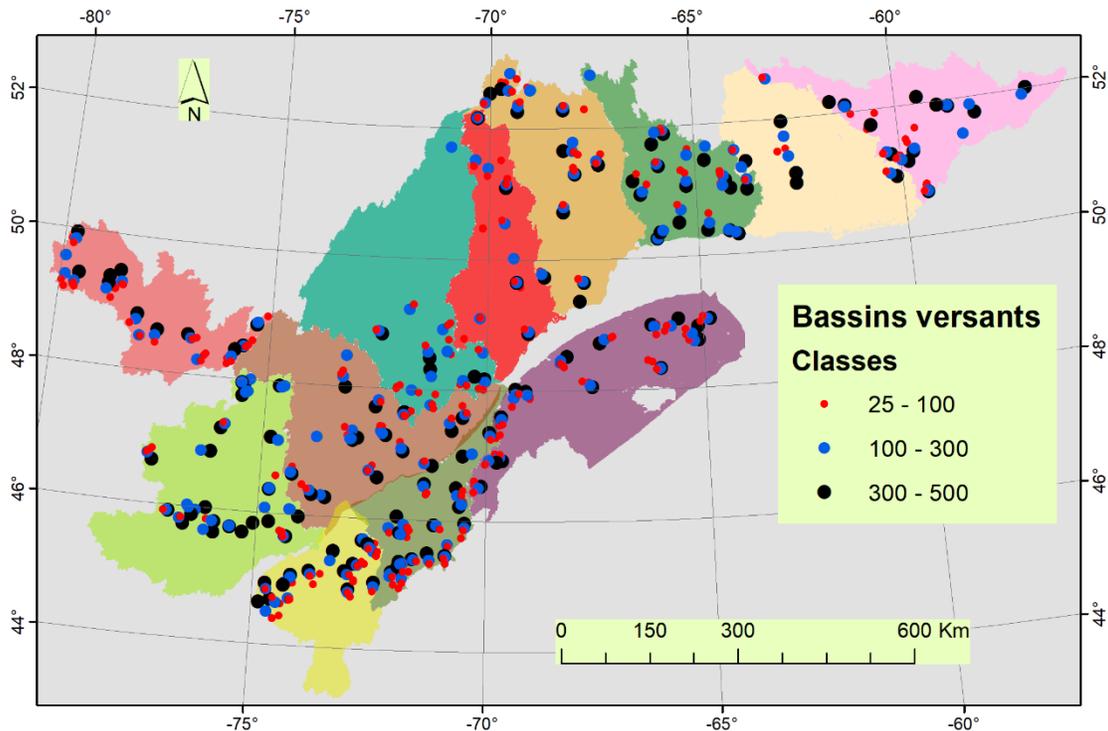


Figure 3 Bassins versants étudiés dont la superficie en amont est entre 25 et 500 km²

2.2 Données hydrométriques

La comparaison géographique de la plateforme de modélisation et les stations hydrométriques du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) gérés par la DEHA a permis d'identifier des stations potentielles pour le calage du modèle HYDROTEL. Une sélection a été faite selon les critères suivants : la superficie en amont des stations sélectionnées devait varier entre 25 et 500 km², les stations devaient avoir des données aux 3 heures, les stations devaient être situées à l'exutoire de l'UHRH et le nombre d'années d'enregistrements disponibles devait être supérieur ou égal à 5 années. La DEHA a fourni pour les buts de ce projet les données hydrométriques au pas de temps 3h. Le Tableau 5 et la figure 4 montrent les stations hydrométriques qui ont été sélectionnées pour le calage. Des 44 stations possédant des données aux 3 heures, 18 ont été retenues pour le calage du modèle, les autres ayant servi à la validation. On note que les régions Côte-Nord A, C, D et E ne possèdent aucune station rencontrant les critères de sélection pour le calage et la validation du modèle hydrologique.

Tableau 5 Stations hydrométriques utilisées pour le calage

Région	Nombre de stations	Stations
Abitibi	1	80106
Côte-Nord A		
Côte-Nord B	1	71203
Côte-Nord C		
Côte-Nord D		
Côte-Nord E		
Gaspésie	1	22601
Montérégie	3	30314, 30343, 30920
Outaouais Aval	2	40122, 40409
Saguenay	4	60102, 60704, 60901, 61022
St Laurent Nord-Ouest	3	50812, 51005, 52606
St Laurent Sud-Ouest	3	23002, 23004, 23702

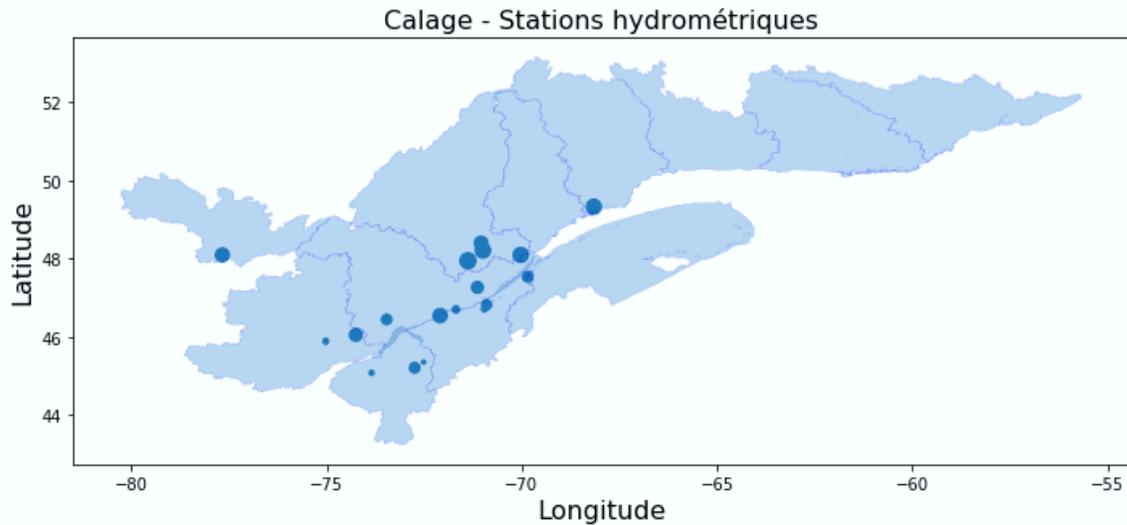


Figure 4 Stations hydrométriques qui ont participé au calage. Les points sont proportionnels à la taille des bassins versants

2.3 Données climatiques

Les projections climatiques consistent en un ensemble multi-modèles provenant de la base de données CORDEX. L'ensemble comprend différents modèles régionaux du climat (MRC) dont les conditions aux frontières sont prescrites par divers modèles de circulation générale (MCG) et de scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (*Representative Concentration Pathways* - RCP). Au total, 21 combinaisons de modèles-RCP ont été considérées. Le Tableau 6 montre les 21 combinaisons ainsi que leurs caractéristiques.

2.3.1 Projections Cordex

Les données issues du projet NA-CORDEX (North American Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) sont des réalisations d'une combinaison de modèles régionaux du climat (MRC) pilotés par des modèles de circulation générale (MCG) (Mearns, 2017). La liste de ces combinaisons est présentée dans le Tableau 6. Ces différentes projections climatiques couvrent l'Amérique du nord à une résolution spatiale de 0.22° ou 0.44° (équivalent de 25 km ou 50 km) pour la période comprise

entre 1950 et 2100. Ces simulations sont réalisées selon les deux trajectoires d'émission de GES, appelées '*Representative Concentration Pathways*' (RCP), soient RCP4.5 et RCP8.5 (le nombre réfère au forçage radiatif en W/m^2). Comme ces simulations sont disponibles à un pas de temps journalier, des méthodes de désagrégation temporelle et de correction de biais ont été employées pour une mise à l'échelle temporelle qui soit compatible avec le pas de temps de la plateforme hydrologique. Pour chaque scénario de forçage radiatif, l'utilisation de simulations issues de différents modèles permet de tenir compte la variabilité et de l'incertitude du signal de changement résultant de la structure des modèles de climat.

Tableau 6 Ensemble des projections climatiques du projet NA-CORDEX

Modèle Global	Modèle Régional	Institution	RCP	Résolution spatiale
CanESM2	CanRCM4	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	4.5	0.44°
			8.5	0.22°
	CRCM5-UQAM	Université du Québec à Montréal	4.5	0.44°
			8.5	0.22°
RCA4	Swedish Meteorological and Hydrological Institute	4.5	0.44°	
	CRCM5-OURANOS	Ouranos	8.5	0.22°
EC-EARTH	HIRHAM5	Danish Meteorological Institute	4.5	0.44°
	RCA4	Swedish Meteorological and Hydrological Institute	4.5	0.44°
GEMatm-Can	CRCM5-UQAM	Université du Québec à Montréal	8.5	0.22°
GEMatm-MPI			8.5	0.22°
GFDL-ESM2M	CRCM5-OURANOS	Ouranos	8.5	0.22°
	RegCM4	Iowa State	8.5	25km
	WRF	University of Arizona	8.5	25km
HadGEM2-ES	RegCM4	Iowa State	8.5	25km
	WRF	University of Arizona	8.5	25km
MPI-ESM-LR	CRCM5-UQAM	Université du Québec à Montréal	4.5	0.44°
	CRCM5-OURANOS	Ouranos	8.5	0.22°
	CRCM5-UQAM	Université du Québec à Montréal	8.5	0.22°
	RegCM4	Iowa State	8.5	25km
	WRF	University of Arizona	8.5	25km
MPI-ESM-MR	CRCM5-UQAM	Université du Québec à Montréal	8.5	0.22°

2.3.2 Trajectoires RCP

Les trajectoires RCP sont une description de l'évolution possible du forçage radiatif qui permet de produire des scénarios possibles de l'évolution de concentration de gaz à effet de serre (GES). Dans son cinquième rapport AR5, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a établi quatre trajectoires RCP : RCP2.6, RCP4.5, RCP6 et RCP8.5. Les scénarios RCP4.5 et RCP8.5, qui ont été utilisés dans cette étude, correspondent à un forçage radiatif qui ne dépassera pas $+4.5 \text{ W/m}^2$ et $+8.5 \text{ W/m}^2$ en 2100. Le scénario RCP4.5 est considéré comme un scénario optimiste tandis que le RCP8.5 est considéré comme un scénario pessimiste. Le forçage radiatif est la différence entre l'énergie radiative reçue (rayonnement solaire) et l'énergie radiative émise (infrarouge) par un système climatique donné. Plus le forçage est élevé, plus le système Terre-atmosphère reçoit d'énergie.

2.3.3 Info-Climat

Les données météorologiques de température et de précipitation totale (liquide et solide) aux 3 et aux 24 heures pour la zone d'étude ont été fournies par le service Info-climat du Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques (MELCC) (Bergeron, 2016). La base de données Info-Climat consiste en des données climatologiques sur une grille de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ couvrant tout le territoire du Québec situé sous le 53° parallèle, qui ont été estimées par interpolation avec une méthode de krigeage aux nœuds d'un quadrillage. La base de données a été produite par la Direction de l'information sur le milieu atmosphérique (DIMAT) de la Direction générale du suivi de l'état de l'environnement (DGSEE) du MELCC. Les données sources sont des mesures prises aux stations météorologiques.

3 Méthodologie

3.1 Paramétrage du modèle

3.1.1 Paramètres de Calage

Les paramètres qui nécessitent un ajustement sont les paramètres des sous-modèles d'HYDROTEL qui régissent les processus hydrologiques: interpolation des données météorologiques, accumulation et fonte du couvert nival, évapotranspiration potentielle, bilan vertical, écoulement sur la partie terrestre du bassin, écoulement par le réseau hydrographique. Le Tableau 7 présente ces paramètres avec les bornes minimales et maximales fixées. Ces paramètres sont ajustés séparément pour chaque région du Québec méridional (Figure 1 et 2).

Tableau 7 Liste des paramètres HYDROTEL ajustés

Paramètre	Description	Borne minimale	Borne maximale
THI	Température de passage pluie en neige (°C)	-5	3
TFNS	Taux de fonte entre la neige et le sol (mm/jour)	0.1	2
DCN	Densité maximale du couvert nival (kg/m ³)	250	550
SFC	Seuil de fonte en zone de conifères (°C)	-3	3
SFF	Seuil de fonte en zone feuillus (°C)	-3	3
SFO	Seuil de fonte en zone ouverte (°C)	-3	3
TFC	Taux de fonte en zone de conifères (mm/jour/°C)	0	10
TFF	Taux de fonte en zone de feuillus (mm/jour/°C)	0	10
TFO	Taux de fonte en zone ouverte (mm/jour/°C)	0	10
ETP	Facteur multiplicatif de l'évapotranspiration potentielle	0.7	1.5
Z1	Profondeur de la limite inférieure de la couche 1 (m)	0.05	1
Z2	Profondeur de la limite inférieure de la couche 2 (m)	0.05	1
Z3	Profondeur de la limite inférieure de la couche 3 (m)	0.05	10
CR	Coefficient de récession (m/h)	0.00000001	0.0001
HGM	Lame de référence pour hydrogramme géomorphologique	0.00025	0.006

3.1.2 Procédure de calage et de validation

Pour le calage du modèle hydrologique HYDROTEL, le package Ostrich (Matott, 2017) a été utilisé. Ce dernier est un outil d'optimisation/calage conçu pour les modèles dont les intrants et extrants sont sous formats texte tel le modèle HYDROTEL. Par conséquent, il

permet d'automatiser le calage de tels modèles sans devoir coder des routines supplémentaires. Ostrich offre un vaste choix d'algorithmes d'optimisation dont des algorithmes déterministes, des algorithmes heuristiques mono-objectif et multi-objectifs et des procédures d'échantillonnage. Il permet aussi de configurer plusieurs options, entre autres le calcul parallèle, le calcul des statistiques de paramètres, l'analyse de sensibilité et d'incertitude. Pour le calage de la plateforme hydrologique, Ostrich a été configuré pour une analyse d'incertitude.

L'approche 'Dynamically Dimensioned Search - Approximation of Uncertainty) (DDS-AU) proposée par Tolson et Shoemaker (2008) a été retenue. Cette approche consiste à identifier un ensemble de jeux de paramètres résultant de différentes optimisations indépendantes avec DDS (Tolson & Shoemaker, 2007), dont la performance dépasse un seuil fixé. On notera cet ensemble « ensemble de jeux de paramètres acceptable ». Les différentes optimisations sont initialisées avec des jeux de paramètres aléatoires différents et /ou un 'seed' aléatoire différent. Puisque DDS est un algorithme stochastique, à chaque optimisation il suit une trajectoire différente et converge vers une solution différente. Les jeux de paramètres identifiés par DDS comme optimaux ont été retenus pour l'analyse d'incertitude.

La procédure d'optimisation a été appliquée avec les trois mesures de performance pour chaque bassin versant témoin. Ces mesures sont le '*Nash-Sutcliffe Efficiency*' (NSE) (Nash & Sutcliffe, 1970), le '*Kling-Gupta Efficiency*' (KGE) (Gupta et al. , 2009) et la mesure de consistance (COM) qui maximise le critère NSE tout en réduisant le biais des débits très élevés et le volume annuel (Shafii & Tolson, 2015). Ces critères visent à évaluer la performance du modèle à simuler l'occurrence et la pointe du débit maximum, la variabilité ainsi que les débits avec probabilité de dépassement inférieur à 20%. Les jeux de paramètres obtenus ont été classifiés comme acceptables ou non-acceptables selon la mesure de performance utilisée lors du calage. Les jeux de paramètres retenus comme acceptables pour chaque bassin versant ayant fait l'objet

d'un calage ont été ensuite évalués sur les autres bassins versants de la même région. Ensuite parmi cet ensemble, on a retenu l'ensemble des paramètres acceptables pour les bassins versants de la région en question. Cet ensemble a servi pour l'analyse d'incertitude et la simulation des scénarios futurs dans cette région.

L'analyse d'incertitude inclut la caractérisation des bornes d'incertitudes identifiées à partir des maximums et minimums simulés pour chaque pas de temps par le modèle hydrologique avec l'ensemble des paramètres identifiés comme acceptables. Pour la majorité des bassins versants, les données hydrométriques aux 3h sont disponibles à partir de 2009 jusqu'à présent. La période entre 2008 à 2013 a été retenue pour le calage avec l'année 2008 comme année de chauffe pour le modèle hydrologique. La période comprise entre 2014 et 2017 a été utilisée pour la validation du modèle. Cette période a été choisie parce que c'est la période où les données sont disponibles pour toutes les stations. En effet, choisir une période commune pour le calage et la validation du modèle sur les différents bassins versants permet une évaluation objective de la performance du modèle. Dans un contexte de changements climatiques, le modèle calibré a été utilisé pour la simulation de scénarios hydrologiques futurs sous l'hypothèse que les paramètres estimés sont stationnaires.

3.1.3 Régionalisation des paramètres

Le calage des bassins versants témoins a donné un ensemble des jeux de paramètres pour chaque région hydroclimatique. Les bassins versants de chaque région ont été groupés en trois classes selon leur taille tel que mentionné à la section 2.1 . Pour la régionalisation des paramètres du modèle HYDROTEL, des dizaines de bassins versants de 300-500 km² ont été choisis. Une sélection a été aussi faite pour leurs sous-bassins de taille de 25-100 et 100-300 km². Pour éviter une redondance et limiter le temps de calcul, les bassins versants et les sous-bassins choisis ne devraient avoir de sous-bassin de la même classe. Ainsi, des simulations ont été faites seulement pour bassins versants de 300-500 km² de chaque région hydroclimatique avec 3 à 5 jeux de

paramètres. Les sorties du modèle hydrologique de ces bassins et leurs sous-bassins sélectionnés ont été analysées pour déterminer les facteurs de majoration et leur variation géographique pour chaque région.

3.2 Mise à l'échelle et correction de biais

3.2.1 Mises à l'échelle temporelle

Pour la désagrégation des données de précipitation et température journalières CORDEX au pas de temps 3h, on a utilisé la méthode de rééchantillonnage avec le k-plus proche voisin. La méthodologie adoptée pour les précipitations est comme suit. On définit la fraction de précipitations sous-journalière à partir des données d'observation journalières. Ensuite, on procède à un échantillonnage selon le k-plus proche voisin aux précipitations du jour i qu'on souhaite désagréger. La fraction du jour le plus proche (i.e. similaire) au jour i est appliquée pour estimer les données sous-journalière au même jour.

Pour les températures, on applique le même algorithme en considérant la variation de la température sous-journalière par rapport à la température journalière. Autrement dit, on définit les écarts entre la température journalière et les températures sous-journalières à partir des observations. Les écarts du jour similaire au jour qu'on souhaite désagréger (i.e. ayant des températures similaires) sont appliqués pour estimer et reproduire la variabilité de la température sous-journalière.

3.2.2 Correction de biais

Les données des MRC ont été ajustées afin d'enlever le biais entre les MRC et les observations à la période 1990-2005. Les sorties des modèles climatiques sont généralement biaisées par rapport aux observations, rendant ainsi nécessaire la correction de biais. Les paramètres de correction de biais sont considérés comme étant stationnaires. Autrement dit, ces paramètres estimés lors de la période de référence, 1975-2005, sont appliqués pour la correction de biais pour la période future, 2040-2070.

La correction des biais a été effectuée pour les précipitations et les températures minimales et maximales aux 3 heures. Les biais ont été corrigés à l'aide de la méthode de la correction par quantiles ('Quantile mapping') (Teutschbein & Seibert, 2012). La correction par quantiles a pour objectif de corriger la fonction de la distribution des variables climatiques simulées par le MRC afin qu'elle corresponde à la fonction de distribution observée. Des facteurs de correction sont définis pour différents quantiles et appliqués aux variables simulées. Une distribution gamma a été utilisée pour la précipitation alors qu'une distribution normale a été utilisée pour les températures.

3.3 Simulations hydrologiques

Le modèle HYDROTEL a été utilisé pour la production des projections hydrologiques. Un ensemble de jeux de paramètres a été utilisé pour représenter l'incertitude des paramètres du modèle. Les simulations hydrologiques ont permis l'estimation des changements entre l'hydrologie de la période de référence, 1975-2005, et l'hydrologie de la période future, 2040-2070. C'est à partir des projections hydrologiques que les crues maximales ont été obtenues.

3.3.1 Ensemble de jeux de paramètres

Le calage des bassins versants témoins avec l'approche DDS-AU a permis d'identifier un ensemble de jeux de paramètres résultant de différentes optimisations indépendantes. Parmi les stations hydrométriques qui ont des données aux 3 heures certaines ont été gardées car leurs jeux de paramètres étaient acceptables. Le nombre de stations gardées variait entre 2 et 4 par région hydroclimatique, voir le Tableau 8. Le calage a donné un ensemble de jeux de paramètres variant entre 16 et 121 par région. Tel que mentionné à la section 2.2, il y avait aucune station pour les régions de la Côte-Nord A, C, D et E. En appliquant le principe de la transposabilité du modèle dans l'espace et dans le temps, qui se fonde sur l'hypothèse d'avoir une performance similaire avec d'autres bassins versants sous les mêmes conditions climatiques, les jeux de paramètres de la

région de la Côte-Nord B ont été transposés aussi aux régions de la Côte-Nord A, C, D et E.

Tous les membres de l'ensemble de jeux de paramètres n'ont pas été utilisés pour la régionalisation. Appliqués aux autres bassins versants, certains jeux de paramètres donnaient une performance moins importante en termes de la forme d'hydrogramme moyen annuel, du volume de la crue printanière, et du volume total annuel. Les jeux qui ne satisfaisaient pas ces conditions ont été éliminés. Afin d'assurer une incertitude des paramètres du modèle, un échantillonnage aléatoire des jeux de paramètres acceptables a été effectué. Le nombre de jeux de paramètres pour simuler un bassin versant avec une projection climatique se limitait entre 3 et 5, selon le temps de calcul de chaque région hydroclimatique. Le Tableau 8 montre le nombre de stations hydrométriques qui ont participé au calage, le nombre total de jeux de paramètres et le nombre de jeux de paramètres retenus pour la simulation des projections climatiques.

Tableau 8 Jeux de paramètres du modèle HYDROTEL

Région	Nombre de stations	Nombre total de jeux de paramètres	Nombre de jeux de paramètres retenus
Abitibi	3	16	5
Côte-Nord A		16	9
Côte-Nord B	3	16	7
Côte-Nord C		16	10
Côte-Nord D		16	10
Côte-Nord E		16	9
Gaspésie	3	26	10
Montérégie	3	72	14
Outaouais Aval	2	27	14
Saguenay	4	86	19
St Laurent Nord-Ouest	3	61	11
St Laurent Sud-Ouest	3	121	18

3.3.2 Crues maximales saisonnières

Pour l'analyse des crues maximales, on extrait souvent les maximums annuels, printaniers ou automnaux. Toutefois, les maximums annuels peuvent résulter de différents processus hydrologiques. Les crues maximales peuvent être liées à la fonte des neiges au printemps, ou à la pluie en été ou automne. Les crues maximales saisonnières ont été extraites des séries de débits simulés aux 3 heures. Deux saisons ont été définies : la saison du printemps et la saison d'été. Le maximum printanier correspond au maximum des débits moyens aux 3 heures du 1^{er} janvier au 31 mai. Le maximum estival correspond au maximum des débits moyens aux 3 heures du 1^{er} juillet au 31 décembre.

3.4 Courbes de fréquence de crue et facteurs de majoration

3.4.1 Courbes de fréquence de crue

Une analyse des crues maximales saisonnières a été effectuée afin de déterminer les courbes de fréquence de crue pour chacun des bassins versants étudiés. Les séries de débits maximaux annuels du climat de référence et du climat futur ont été ajustées aux distributions de probabilités les plus appropriées. Les étapes suivantes ont été effectuées : l'ajustement de distribution de probabilité, l'estimation des paramètres des distributions de probabilité, et le choix des distributions s'ajustant le mieux aux données. Le choix des distributions de probabilité s'est porté sur la distribution log-normale et la distribution d'extrémum généralisée (*Generalized Extreme Values - GEV*). La distribution GEV de type I, appelée distribution de Gumbel, ainsi que la distribution GEV de type II, soit la distribution de Fréchet, ont été choisies.

3.4.2 Facteurs de majoration

Les courbes de fréquence de crue ont été utilisées pour estimer les débits associés aux périodes de retour $T = 20$ et 50 ans, de chaque bassin versant pour chaque région hydroclimatique pour le climat de référence (1975-2005) et le climat futur (2040-2070).

Les données d'une période de 30 ans sont jugées suffisantes pour estimer le débit de période de retour de 50 ans et moins. Les débits estimés ont permis de calculer des facteurs de majoration. Un facteur de majoration est défini comme étant le rapport entre le débit maximal du climat futur et celui du climat de référence de la même période de retour. Un facteur de majoration supérieur à 1 signifie que le débit maximal du climat futur serait plus grand que celui du climat de référence. Les facteurs de majoration correspondant aux débits maximums printaniers et estivaux ont été calculés. L'analyse de la variation des facteurs de majoration dans les bassins versants et dans les régions hydroclimatiques permet de régionaliser les facteurs de majoration de débits pour la zone d'étude.

4 Résultats

4.1 Calage et validation du modèle HYDROTEL

La méthodologie de calage a été appliquée indépendamment sur une sélection de bassins versants de chaque région hydroclimatique avec trois fonctions objectives : NSE, KGE et COM. Ces bassins versants ont été choisis selon la disponibilité des observations hydrométriques aux 3h. Le calage avec le NSE aboutit à une valeur moyenne supérieure à 0.8 dans les stations de la Côte-Nord, Gaspésie, Abitibi, la station '40122' dans l'Outaouais et la station '52606' dans la région du Saint-Laurent Nord-Ouest. Le calage sur les autres stations aboutit à des valeurs de NSE inférieures à 0.8. Le calage avec la fonction notée 'COM' conduit à la valeur idéale de cette fonction objective qui est de 3 sur toutes les stations sauf deux stations situées en Abitibi et Saint-Laurent Nord-Ouest. Ceci se traduit par un NSE supérieur à 0.5 et par un biais sur les forts débits et sur le volume annuel inférieur à 10 %. En revanche, le modèle ajusté avec le KGE est de performance moyenne avec des valeurs de KGE inférieur à 0.8 sur l'ensemble des stations sauf une station situé sur la Côte-Nord.

Selon le calage avec les différentes fonctions objectives, on remarque que le modèle est performant sur certaines stations quelle que soit la fonction objective employée. Sur les régions Montérégie et Saint-Laurent Sud-Ouest le modèle est de performance moyenne à faible avec des NSE qui ne dépassent pas 0.6 et KGE qui ne dépassent pas 0.7, ce qui permet de conclure que le biais sur les débits forts est important. Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette faible performance, par exemple la qualité des débits observés, ou le fait que le modèle HYDROTEL soit particulièrement non convenable pour la simulation des processus hydrologiques de ces bassins versants. Pour évaluer la transposabilité du modèle calibré, on a évalué la performance du modèle calé sur les stations de la même région que la station du calage. Globalement, le modèle est de performance acceptable sur la majorité des bassins versants avec un biais du maximum annuel inférieur à 20%.

4.2 Mise à l'échelle temporelle et correction de biais

Les données CORDEX ont été mises à l'échelle temporelle 3h à l'aide des grilles aux 3h des données d'Info-climat. Pour évaluer le biais engendré par la méthode de désagrégation, les données observées ont été agrégées au pas de temps 24h. La performance de la méthode à estimer les maximums a été évaluée, puisqu'on s'intéresse dans cette étude aux événements extrêmes élevés. L'évaluation a été faite pour la désagrégation des précipitations des simulations CORDEX dans la région du Saint-Laurent Sud-Ouest, selon le scénario RCP8.5 aux pas de temps 3h, 6h, 12h, et 24h. Les résultats montrent que le biais moyen relatif du maximum annuel calculé pour les réalisations de modèles est inférieur à 20% pour les pas de temps 24h et 12h tandis que ce biais augmente avec la résolution temporelle fine. En effet, le biais pour la résolution temporelle 3h est considérable. A noter que les données CORDEX utilisées ici sont des données brutes. Le biais observé est donc non dû seulement à la méthode de désagrégation, mais provient aussi des modèles de climat.

Deux méthodes de corrections de biais aux précipitations CORDEX mises à l'échelle temporelle 3h dans la région du Saint-Laurent Sud-Ouest ont été comparées, soient '*Local Intensity*' (LOCI) et quantiles. Le biais relatif moyen des précipitations est plus faible avec la méthode LOCI, avec des valeurs autour de -4%. Ce biais s'élève à des valeurs de 10 à 15% pour la méthode des quantiles. Toutefois, cette méthode produit des résultats plus satisfaisants en termes de valeurs élevées extrêmes. En effet, le biais du maximum annuel et du 90^{ième} percentile sont inférieur à 10 % et 5% respectivement. Le biais du maximum annuel des précipitations corrigées avec la méthode LOCI dépasse largement 20%.

4.3 Changements de la température et des précipitations

Les projections climatiques consistent en 21 projections : 6 projections RCP4.5 et 15 projections RCP8.5 (Tableau 6). Toutefois une projection a été rejetée (rcp45_EC_EARTH_HIRHAM5) car elle manquait beaucoup de données. La période du

climat futur est de 2040 à 2070 tandis que la période de référence est de 1975 à 2005. Les séries chronologiques de la température journalière et des précipitations journalières de chaque projection ont été mises à l'échelle temporelle, suivi par une correction de biais. Le Tableau 9 et les figures 5, 6, 7 et 8 montrent les changements de la température moyenne et des précipitations entre la période future et la période de référence par région hydroclimatique.

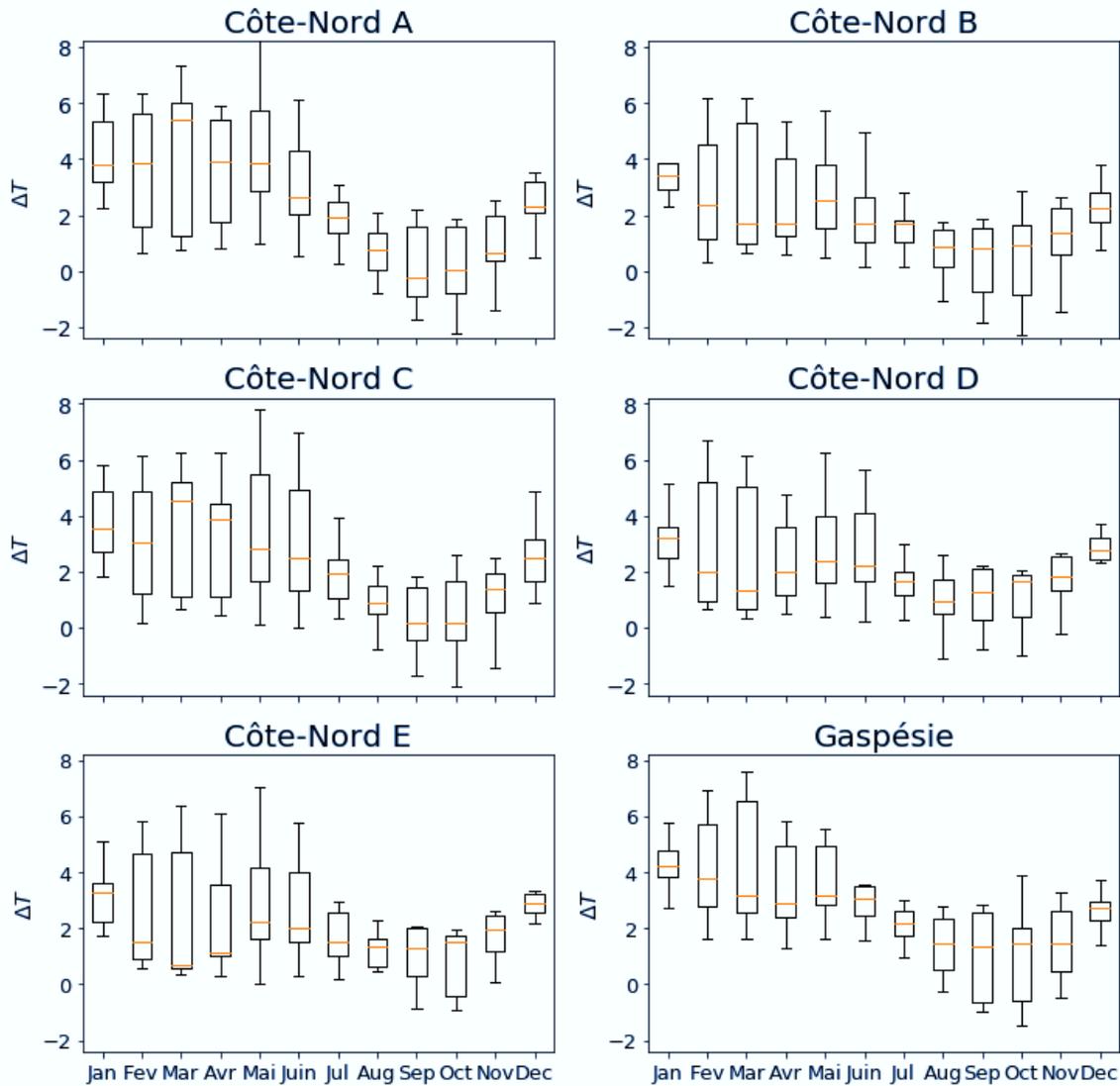


Figure 5 Changements mensuels de la température moyenne, sud-est du Québec

Selon les projections CORDEX, les impacts des changements climatiques sur le climat de la zone d'étude sont globalement une augmentation de la température moyenne et des

précipitations mensuelles. L'hiver connaîtrait des changements importants par rapport aux autres saisons et une plus grande incertitude, autant pour la température que pour les précipitations. Il y aurait moins de changement de la température et des précipitations pendant l'été. En moyenne la température augmenterait entre 2.10 et 2.74° C et les précipitations connaîtraient hausse entre 2 et 5%.

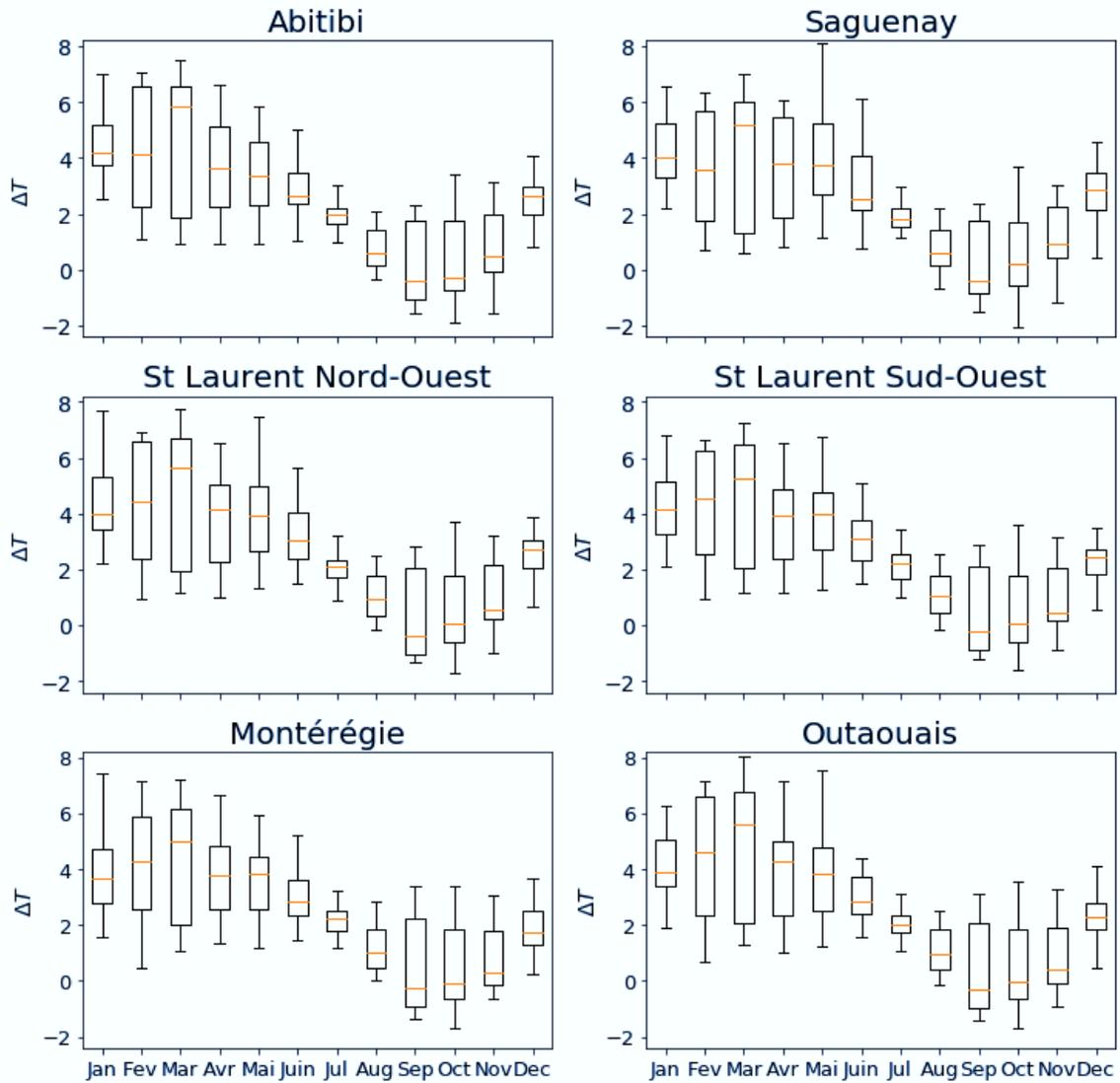


Figure 6 Changements mensuels de la température moyenne, sud-ouest du Québec

Tableau 9 Changement de la température moyenne et des précipitations

Région	Température moyenne (° C)		Précipitation (P/P)	
	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Abitibi	1.85	2.58	1.04	1.04
Côte-Nord A	2.14	2.50	1.03	1.03
Côte-Nord B	2.01	2.11	1.03	1.04
Côte-Nord C	2.17	2.24	1.04	1.05
Côte-Nord D	2.50	2.50	1.05	1.04
Côte-Nord E	2.55	2.27	1.05	1.05
Gaspésie	2.50	2.97	1.02	1.02
Montérégie	2.13	2.64	1.03	1.03
Outaouais Aval	2.21	2.76	1.03	1.02
Saguenay	2.16	2.58	1.06	1.06
St Laurent Nord-Ouest	2.31	2.78	1.04	1.04
St Laurent Sud-Ouest	2.27	2.72	1.03	1.03

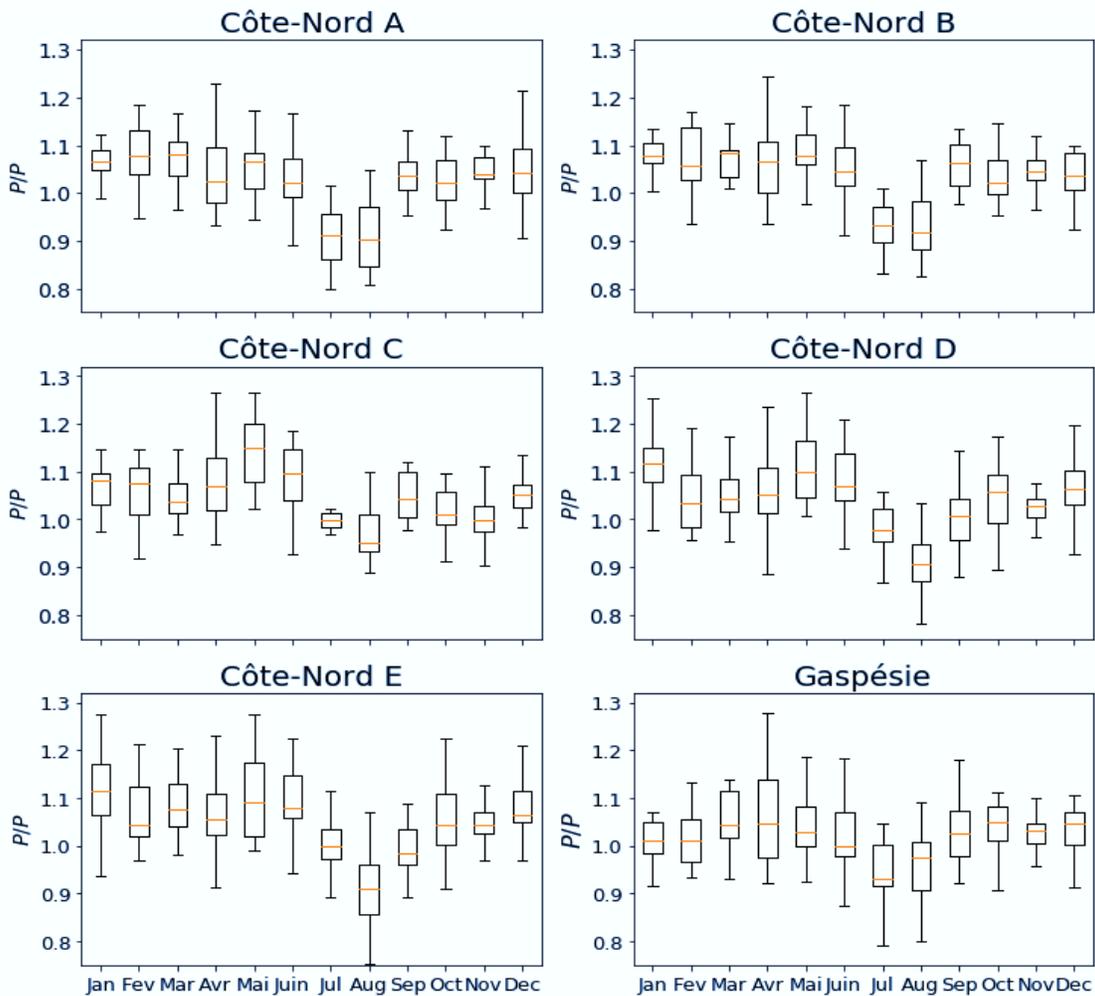


Figure 7 Changements mensuels des précipitations, sud-est du Québec

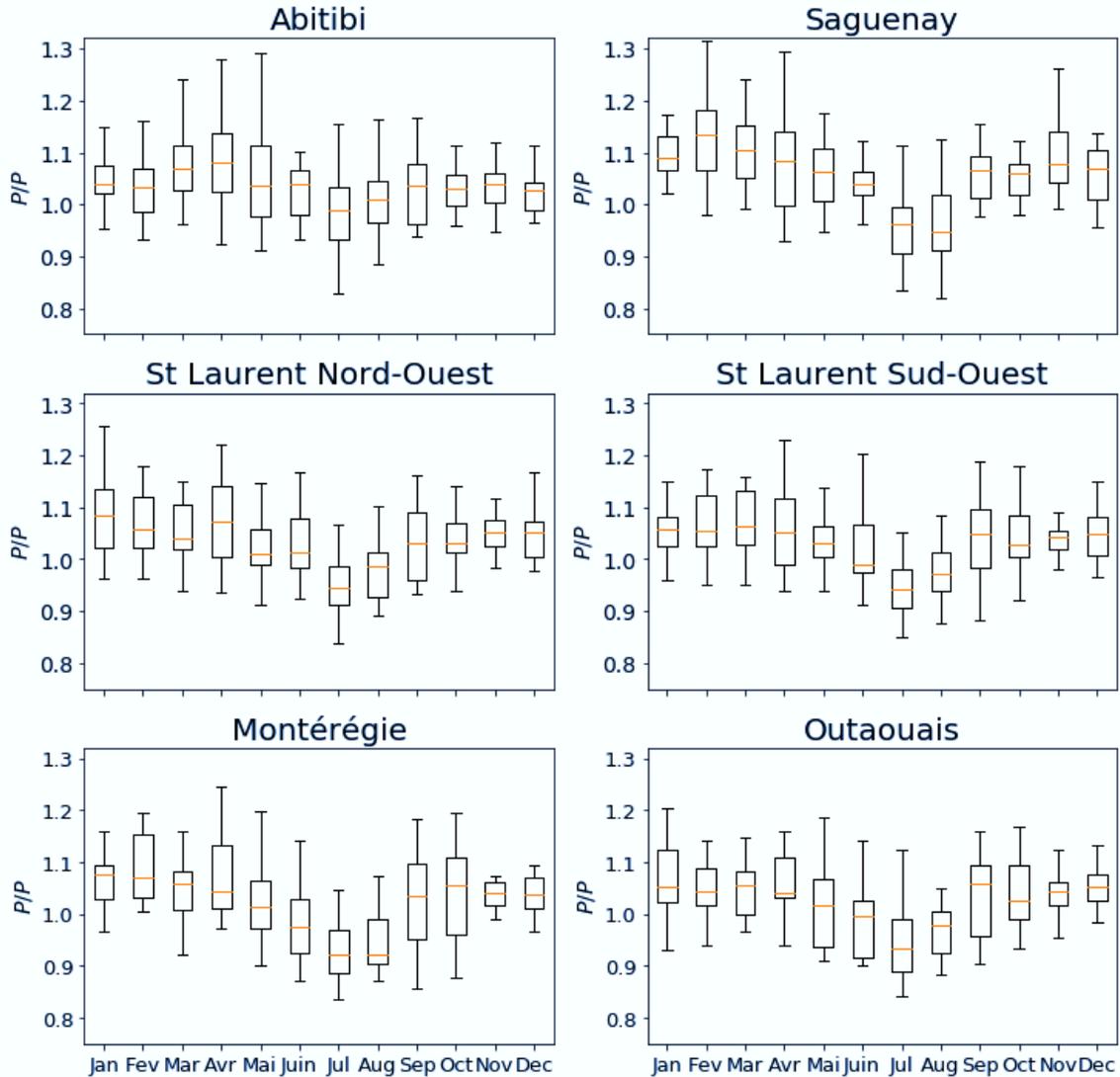


Figure 8 Changements mensuels des précipitations, sud-ouest du Québec

4.4 Changements hydrologiques

Les projections climatiques des températures minimales et maximales et des précipitations ont été forcées dans le modèle HYDROTEL pour produire des projections hydrologiques. Ces simulations hydrologiques ont été produites sur la période de référence et la période future. Les valeurs de changement ont été calculées entre les horizons futurs et la période de référence pour chacune des simulations. Le Tableau 10 montre les changements de ruissellement annuel pour les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 par région hydroclimatique. Avec le scénario RCP4.5, le volume de ruissellement annuel

augmenterait de 1% à 28%, dépendamment des régions hydroclimatiques considérées. Le scénario RCP8.5 montre une diminution du volume de ruissellement annuel pour certaines régions : Montérégie, Outaouais Aval et Saint-Laurent Nord-Ouest.

Tableau 10 Changement de ruissellement annuel (Q/Q)

Région	RCP4.5	RCP8.5
Abitibi	1.28	1.07
Côte-Nord A	1.17	0.99
Côte-Nord B	1.16	1.11
Côte-Nord C	1.06	1.10
Côte-Nord D	1.05	1.08
Côte-Nord E	1.01	1.06
Gaspésie	1.01	0.92
Montérégie	1.03	0.79
Outaouais Aval	1.13	0.89
Saguenay	1.10	1.05
St Laurent Nord-Ouest	1.13	0.85
St Laurent Sud-Ouest	1.07	0.99

Les figures 9 et 10 illustrent des changements de la moyenne mensuelle de débits entre la période future et la période de référence. Les traits pointillés représentent la ligne $Q/Q = 1$. En général, il y aurait une importante augmentation du volume de ruissellement pendant l'hiver dans toutes les régions hydroclimatiques. Cela s'explique par une augmentation des précipitations et de la température pendant l'hiver. On remarque une faible augmentation du volume de ruissellement pendant l'été pour toutes les régions. La variabilité des changements du volume de ruissellement est plus importante aux mois de mars et avril à cause des redoux hivernaux qui seraient plus fréquents dans le climat futur et du devancement de la crue printanière.

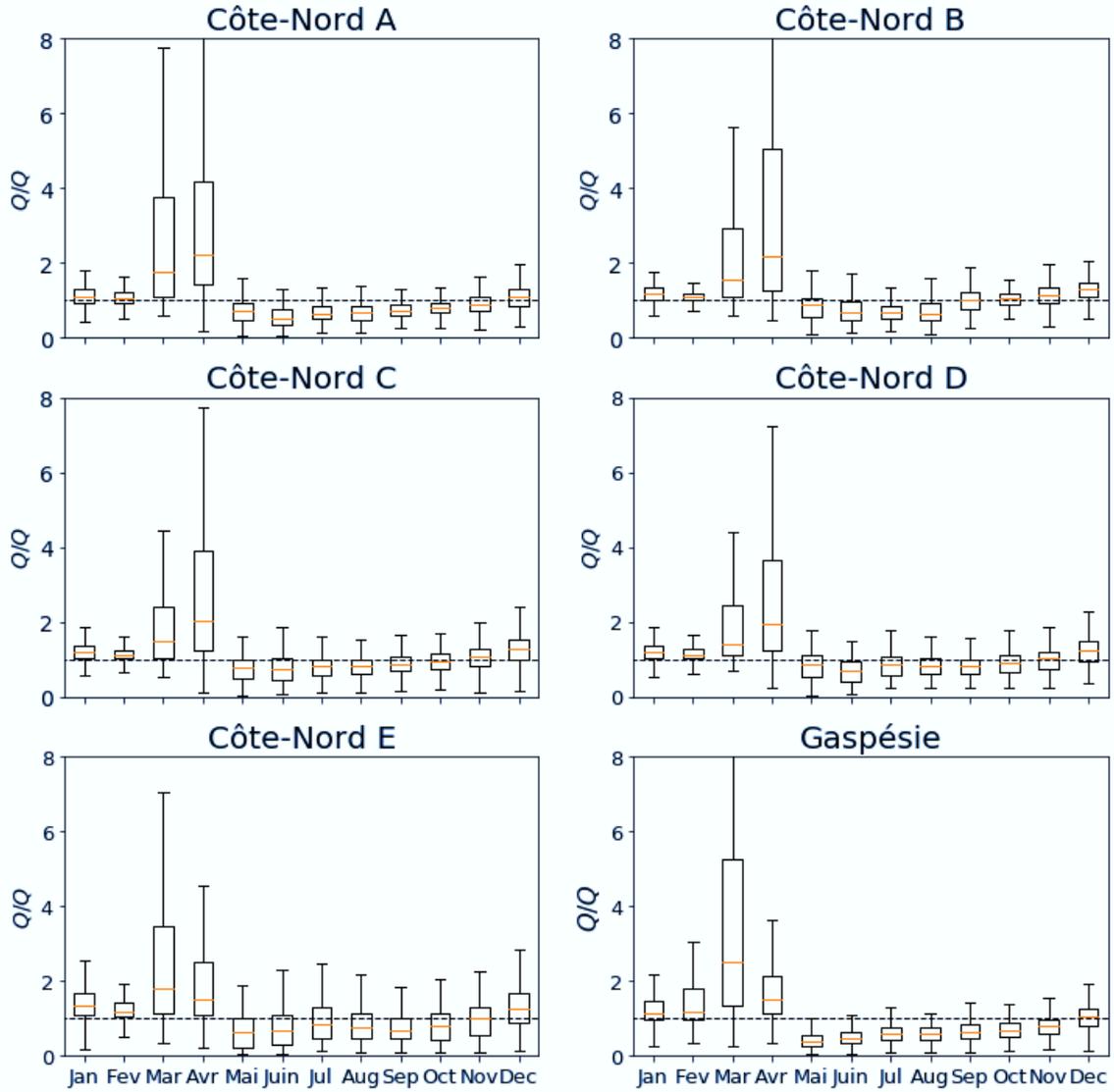


Figure 9 Changements mensuels des débits, sud-est du Québec

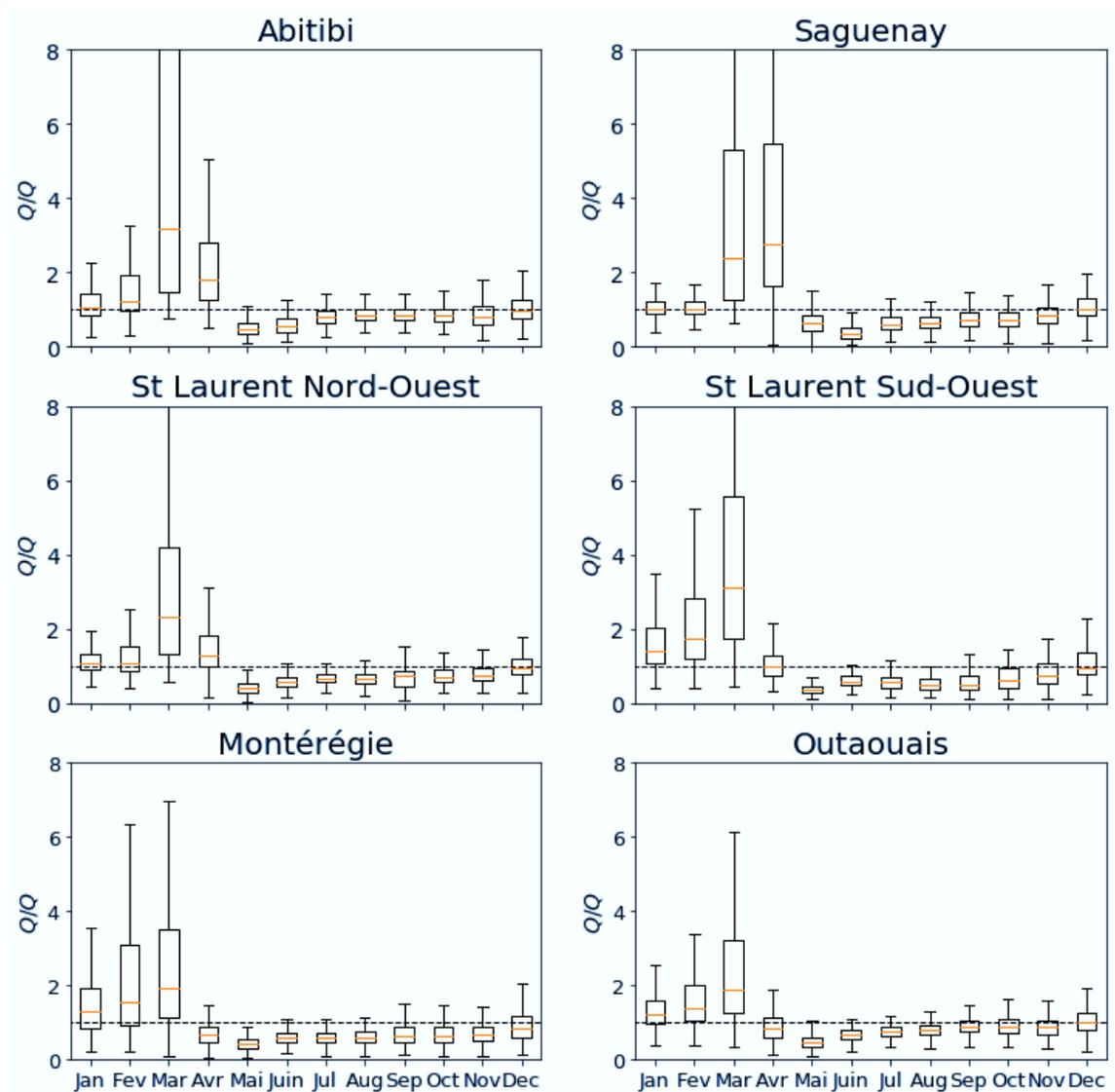


Figure 10 Changements mensuels des débits, sud-ouest du Québec

À titre d'exemple, les figures 11, 12 et 13 illustrent l'enveloppe d'incertitude des hydrogrammes moyens des projections des débits journaliers de deux bassins et leurs sous-bassins situés en Montérégie, à la Côte-Nord B et en Gaspésie. La période de référence est de 1975 à 2005. Les résultats montrent qu'il y aurait un changement de régime hydrologique dans le climat futur par rapport à la période de référence, se traduisant par le devancement de la crue printanière et la diminution du volume du débit de pointe.

On observe une augmentation des débits au cours des saisons d'hiver et d'automne ainsi qu'une grande incertitude pour le climat futur par rapport au climat de référence. L'été présenterait des diminutions du volume de ruissellement pour l'horizon 2040-2070. Les ruissellents estivaux seraient à la baisse car la quantité de précipitation ne changerait pas beaucoup pendant l'été, alors qu'il y aurait une augmentation de la température et par conséquent de l'évaporation. Un comportement similaire a été observé pour les bassins versants des autres régions hydroclimatiques.

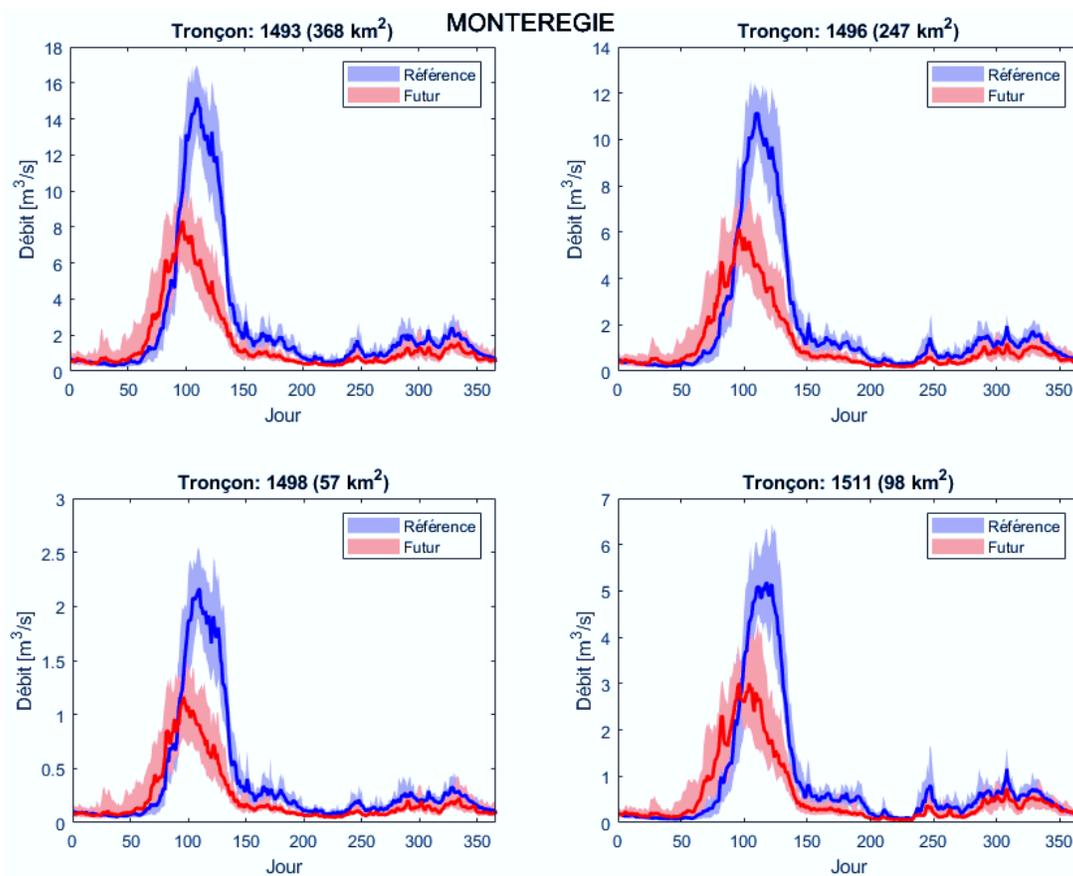


Figure 11 Incertitude des débits journaliers simulés pour les périodes de référence et du climat futur, pour le bassin versant du tronçon 1493 et ses sous bassins, Montérégie

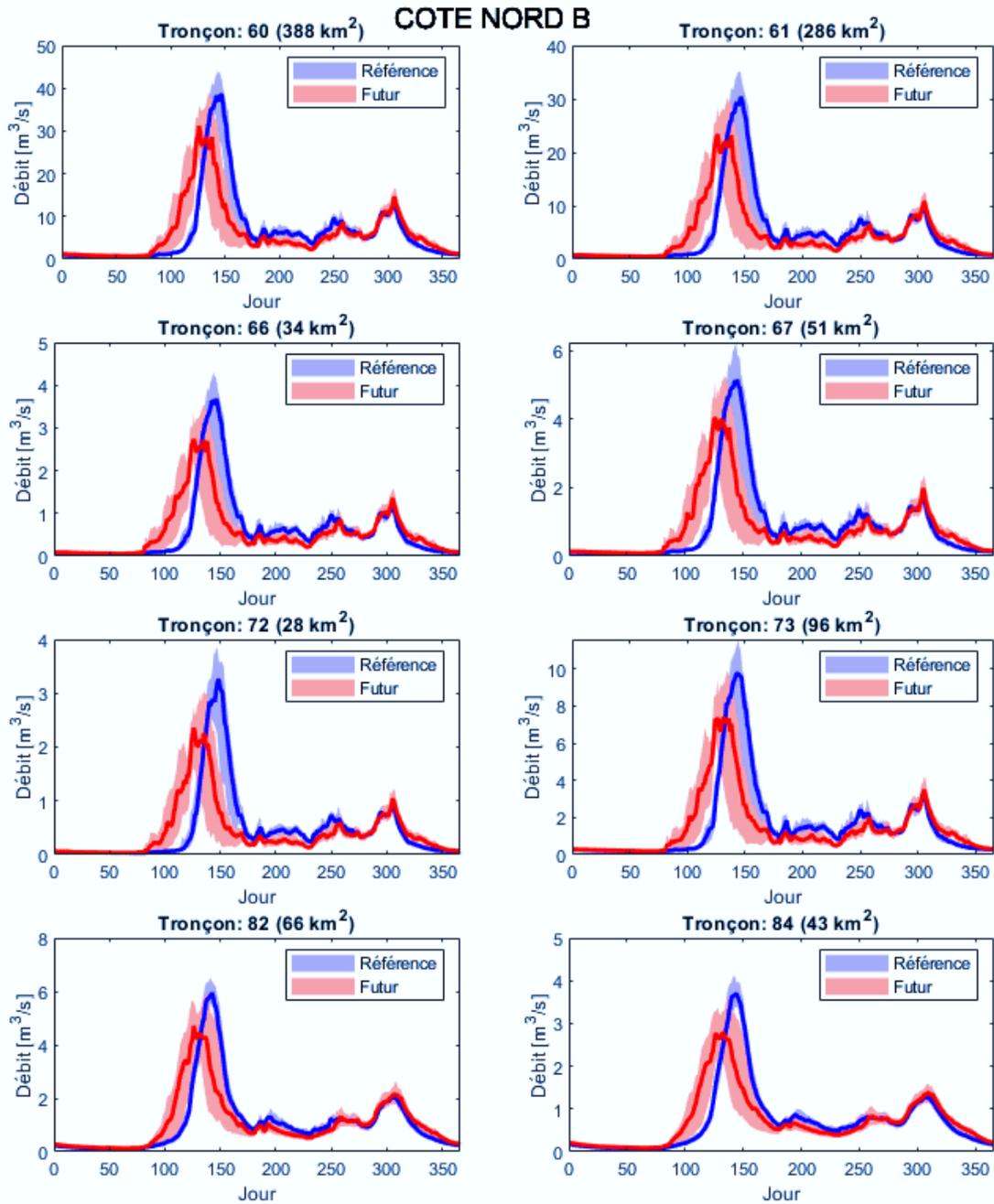


Figure 12 Incertitude des débits journaliers simulés pour les périodes de référence et du climat futur, pour le bassin versant du tronçon 60 et ses sous bassins, Côte-Nord B

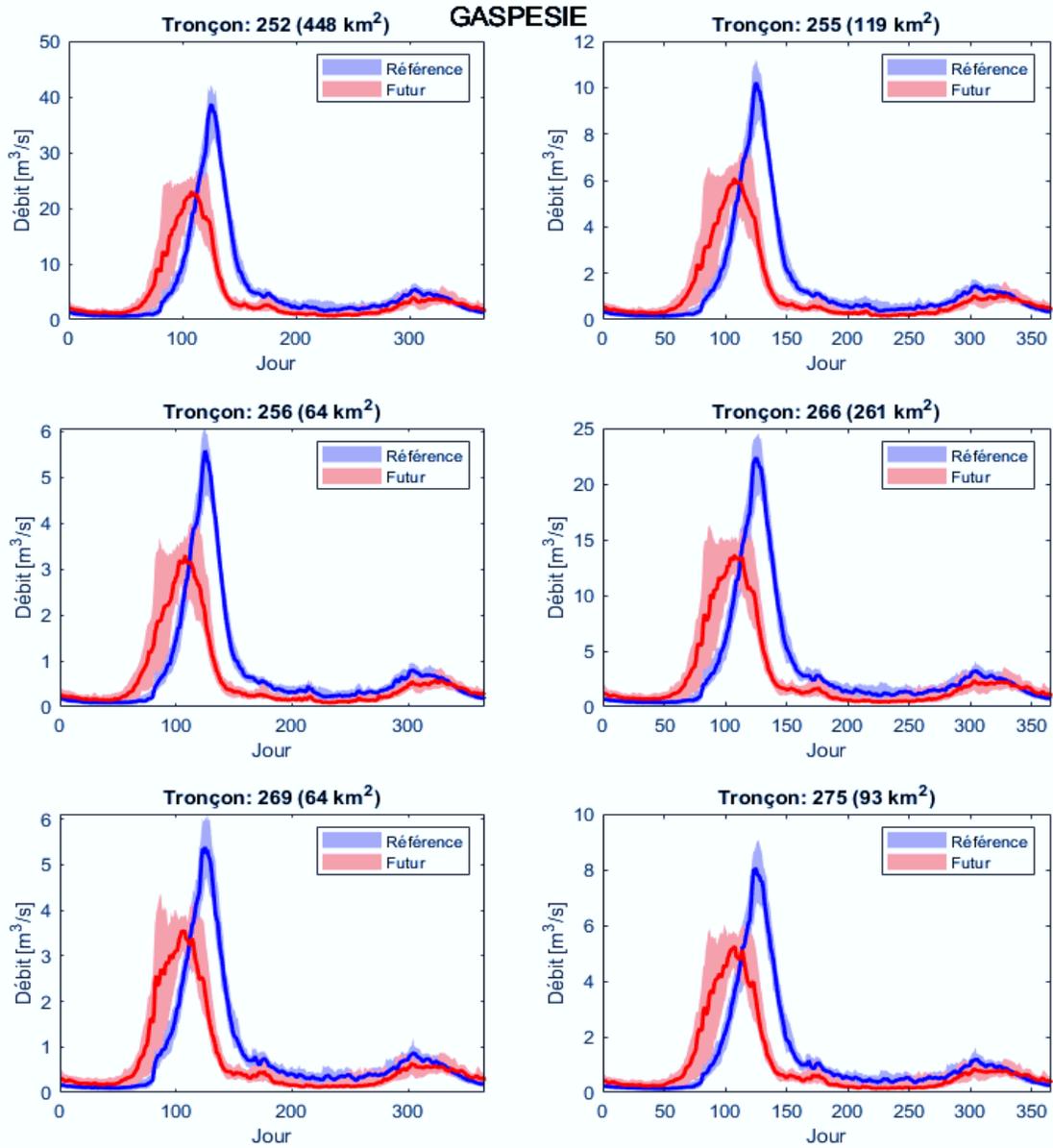


Figure 13 Incertitude des débits journaliers simulés pour les périodes de référence et du climat futur, pour le bassin versant du tronçon 252 et ses sous bassins, Gaspésie

4.5 Facteurs de majoration de débits

4.5.1 Courbes de fréquence de crue

Les simulations hydrologiques ont été utilisées pour trouver des courbes de fréquence de crue pour les bassins versants de 300 à 500 km² et leurs sous-bassins de 25 à 300 km² de toutes régions hydroclimatiques. Les crues maximales saisonnières (hiver/printemps et été/automne) du climat de référence et du climat futur ont été ajustées à la distribution de Gumbel (GEV de type I), la distribution log-normale et la distribution de Fréchet (GEV de type II) afin de déterminer les courbes de fréquence de crue pour chaque bassin versant. Les trois distributions ont donné des courbes de fréquence de crue comportant des différences quant à leur allure générale et dans l'estimation des débits de récurrence de 20 et 50 ans. Aussi, la distribution log-normale avait un problème d'extrapolation pour les périodes de retour plus grandes. Cela a entraîné une grande incertitude pour l'ensemble des projections hydrologiques. Les résultats présentés dans cette section concernés seulement la distribution de Fréchet.

Les figures 14 à 23 présentent des exemples de résultats de différents bassins versants de taille intermédiaire et leurs sous-bassins. Les figures montrent des courbes de fréquence de crue moyenne pour les saisons de printemps et d'été de deux scénarios de GES. Elles montrent aussi l'enveloppe d'incertitude de ces courbes de fréquence de crue qui correspondent aux 25^{ième} et 75^{ième} percentiles de l'ensemble des modèles de climat.

En général, pour une même période de retour, les débits du printemps (traits pointillés) sont plus élevés par rapport aux débits d'été (traits pleins), que ce soit en climat actuel (bleu) ou futur (rouge), voir les figures 14, 15, 16 et 17. Par conséquent, pour la majorité de bassins versants étudiés en climat futur, les crues les plus importantes dans ces bassins seraient liées à la fonte de neige, comme c'est le cas en climat actuel.

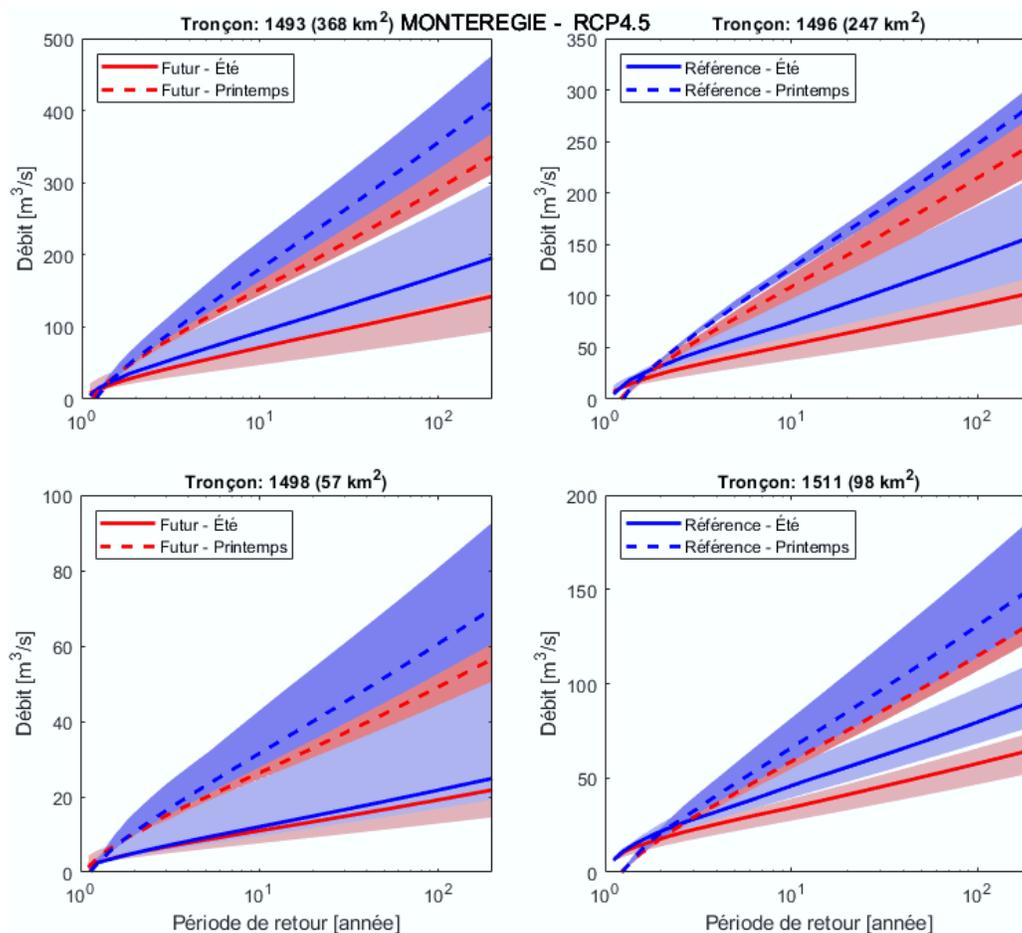


Figure 14 Incertitude des courbes de fréquence de crue pour les scénarios RCP4.5 du tronçon 1493 et ses sous-bassins, Montérégie

Les figures 14, 15, 16 et 17 montrent aussi une autre tendance généralisée, qui est une diminution des débits extrêmes au printemps et en été en climat futur (courbes rouges en dessous des courbes bleues) pour les deux scénarios de GES. La diminution du débit maximum au printemps s'explique par les redoux hivernaux plus nombreux et la précipitation liquide hivernale plus importante, deux facteurs qui réduisent l'épaisseur maximale du manteau neigeux. La diminution de débit en été peut être expliquée par le fait que l'augmentation de la température engendrerait une augmentation de l'évapotranspiration et de l'assèchement des sols. Par conséquent, cette situation augmenterait l'infiltration et diminuerait le ruissèlement, d'où la diminution de débits maximums.

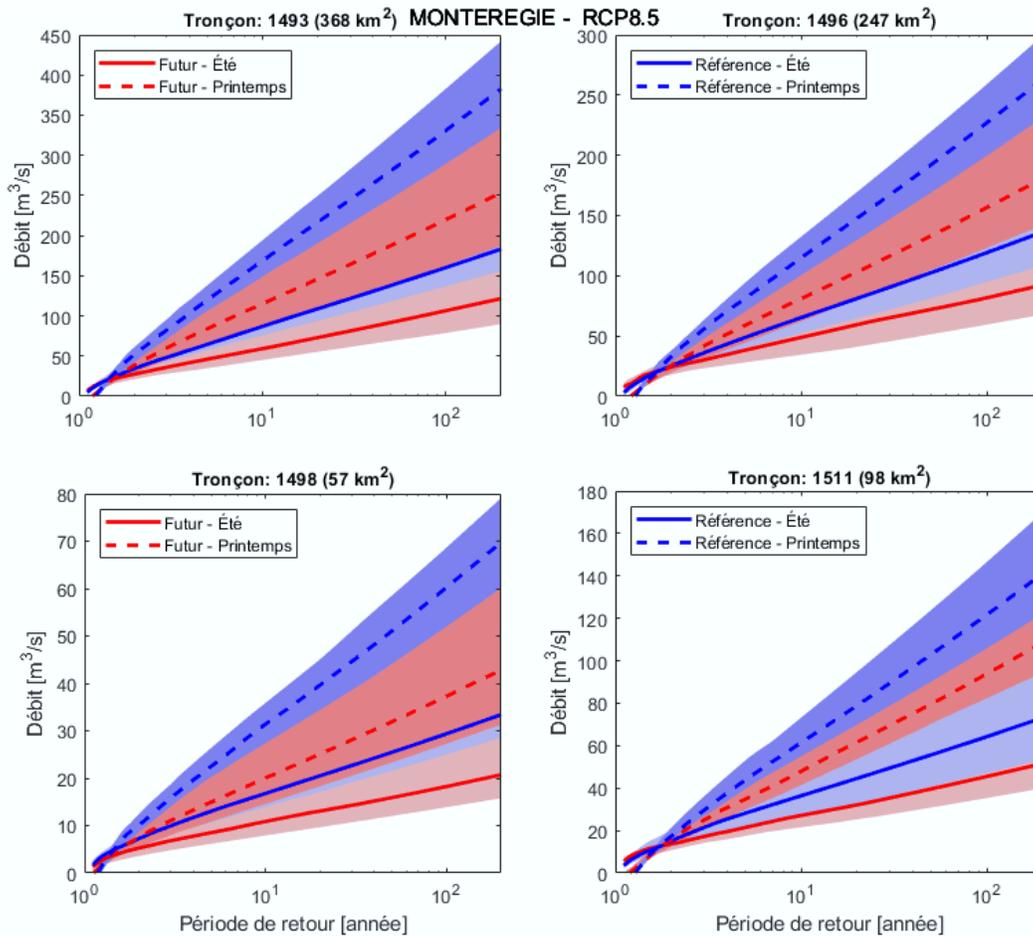


Figure 15 Incertitude des courbes de fréquence de crue pour les scénarios RCP8.5 du tronçon 1493 et ses sous-bassins, Montérégie

Toutefois dans certains bassins versants, on remarque une augmentation des débits durant l'été pour une même période de retour, voir les figures 19 à 23. On remarque une augmentation du débit maximal printanier dans certains bassins versants, en particulier pour le scénario RCP4.5, voir la figure 18 . Ces bassins versants, situés dans la Côte-Nord B, connaîtraient une hausse de leur débit maximal en raison d'une augmentation de l'épaisseur maximale du manteau neigeux. Une telle augmentation serait le résultat d'une hausse de la quantité de précipitation neigeuse qui serait plus importante que l'accroissement anticipé des redoux hivernaux. Cependant, le scénario RCP8.5 entrainerait une hausse plus marquée des redoux hivernaux, supplantant

l'augmentation de la précipitation neigeuse, d'où la réduction du débit maximum printanier, voir la figure 19.

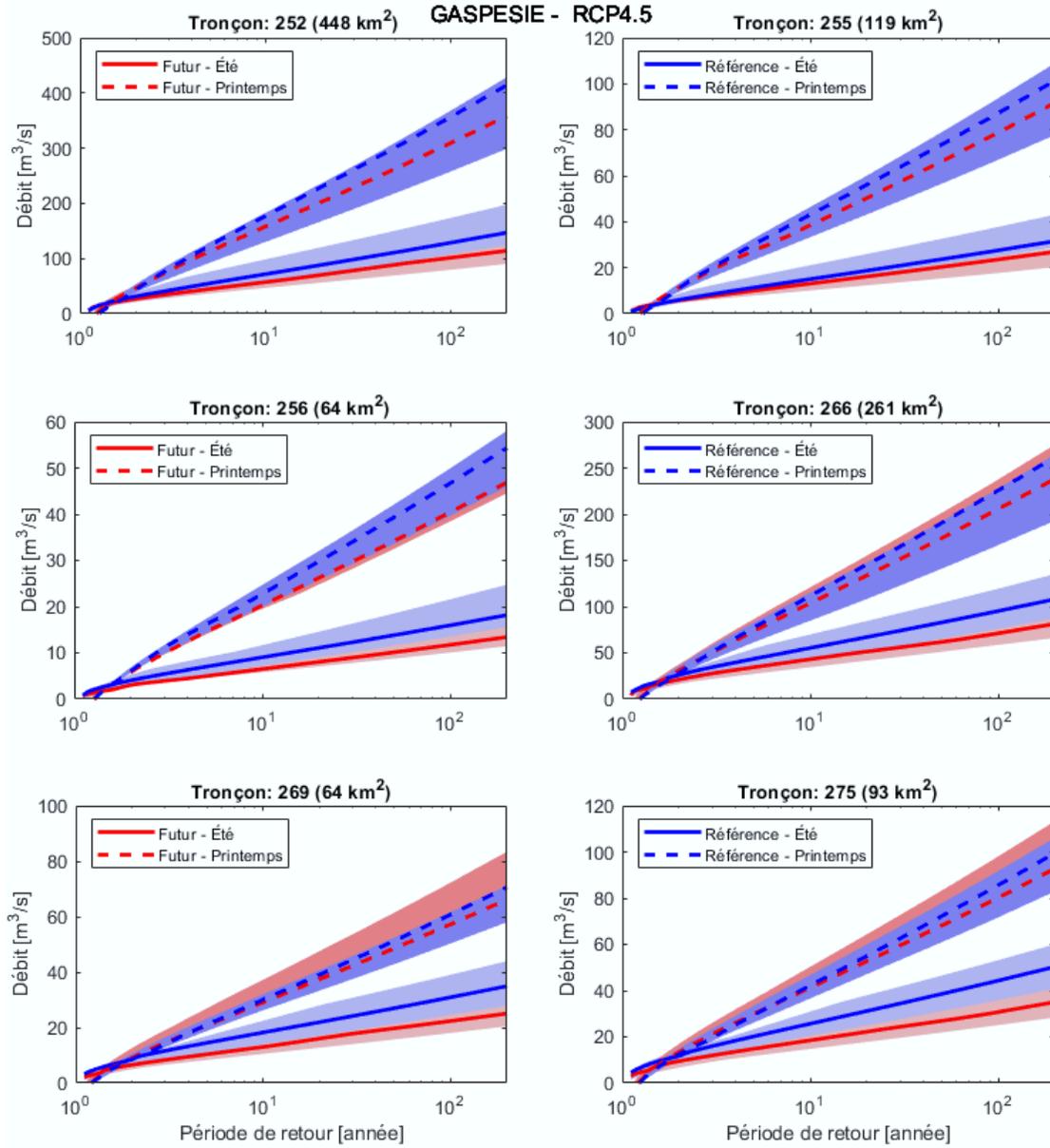


Figure 16 Incertitude des courbes de fréquence de crue pour les scénarios RCP4.5 du tronçon 252 et ses sous-bassins, Gaspésie

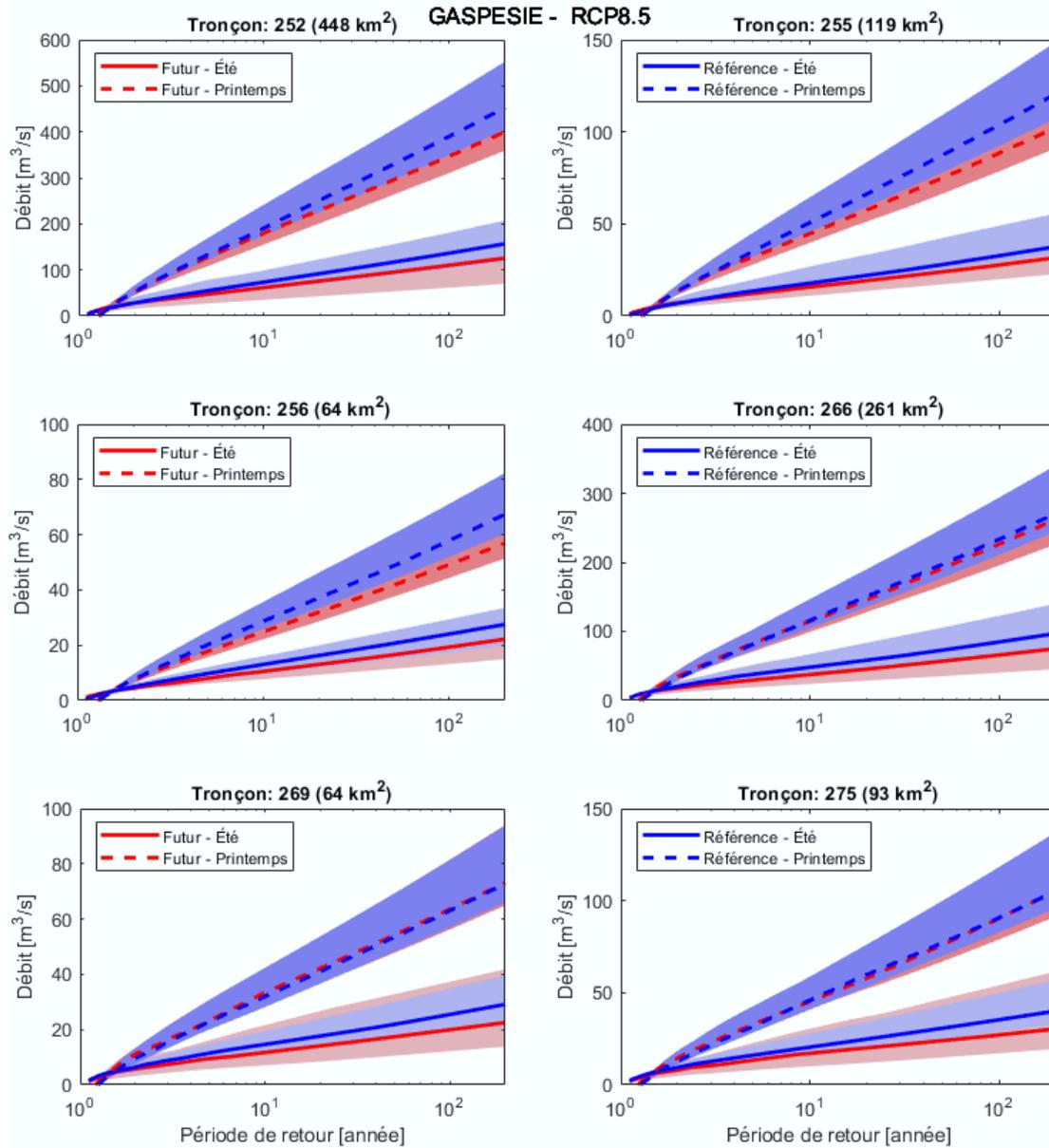


Figure 17 Incertitude des courbes de fréquence de crue pour les scénarios RCP8.5 du tronçon 252 et ses sous-bassins, Gaspésie

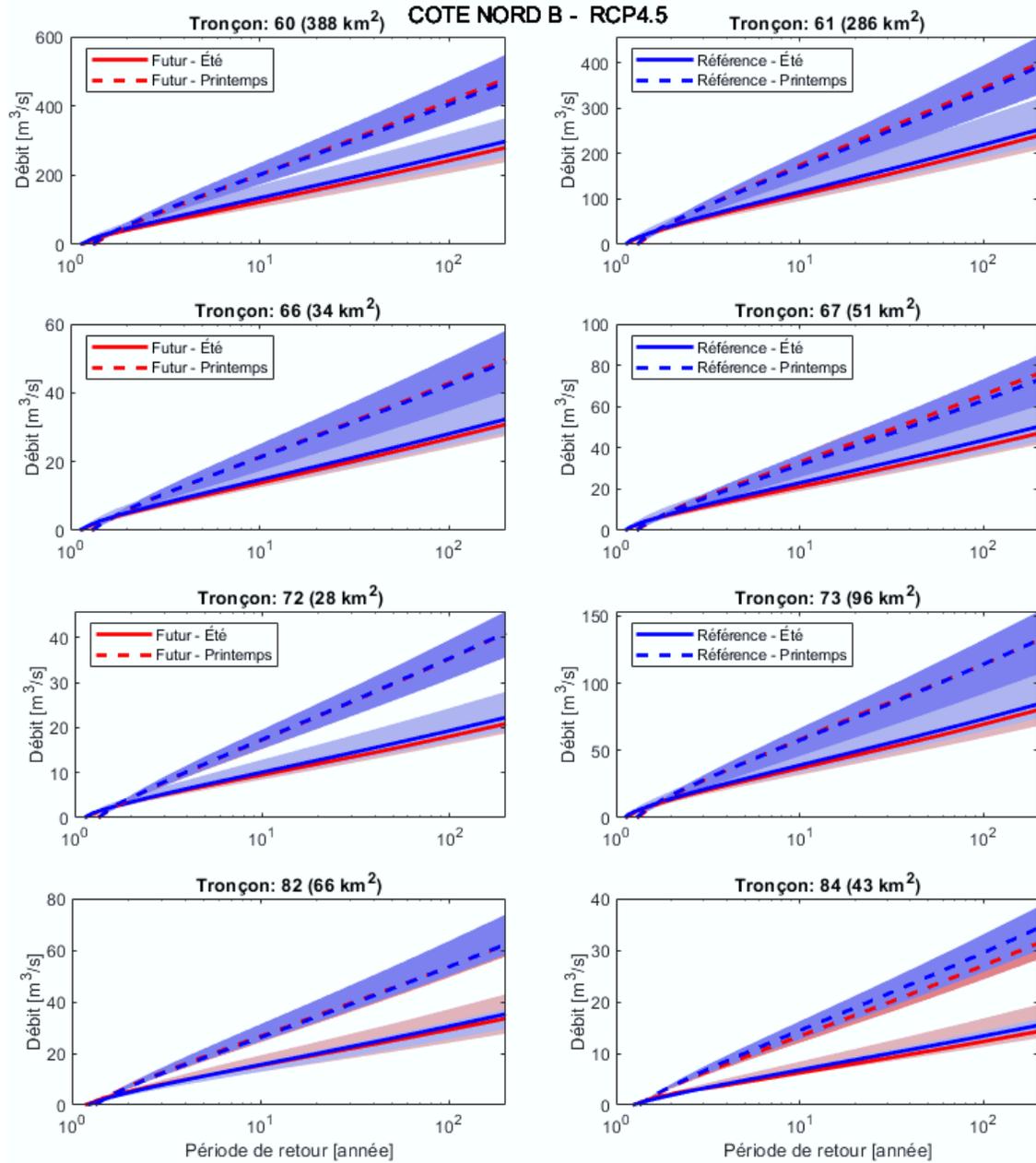


Figure 18 Incertitude des courbes de fréquence de crue pour les scenarios RCP4.5 du tronçon 60 et ses sous-bassins, Côte-Nord B

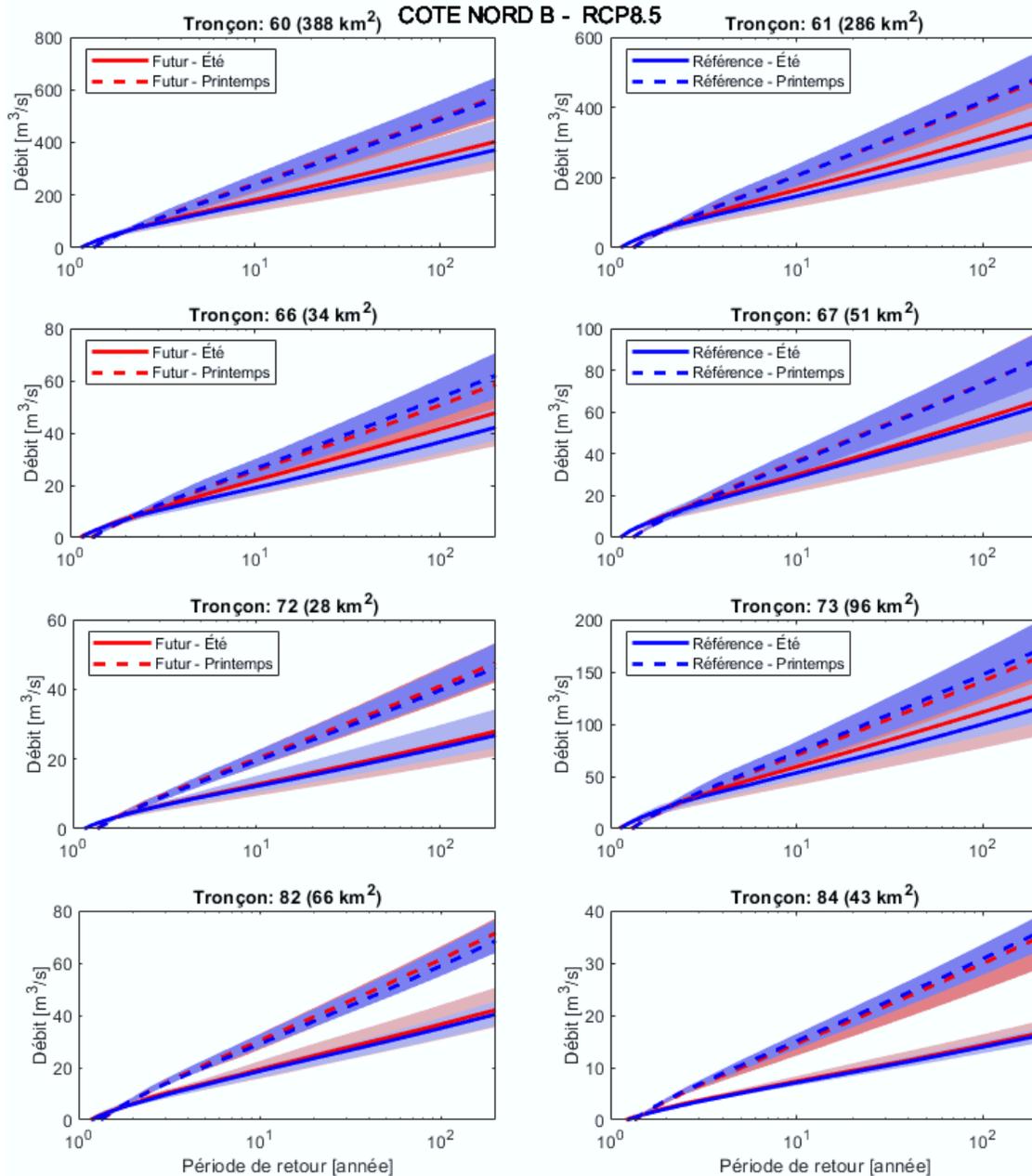


Figure 19 Incertitude des courbes de fréquence de crue pour les scénarios RCP8.5 du tronçon 60 et ses sous-bassins, Côte-Nord B

Une autre tendance généralisée est la diminution des débits maximums en climat futur pour le scénario RCP8.5 comparativement au scénario RCP4.5, autant que pour le printemps que pour l'été, voir les figures 14 et 15. Néanmoins, des bassins versants présentent un comportement inverse, voir les figures 18 et 19. Les scénarios de GES

présentent donc des résultats qui diffèrent selon les bassins versants et les saisons. Les caractéristiques hydroclimatiques et physiographiques des bassins versants jouent un grand rôle sur leur hydrologie.

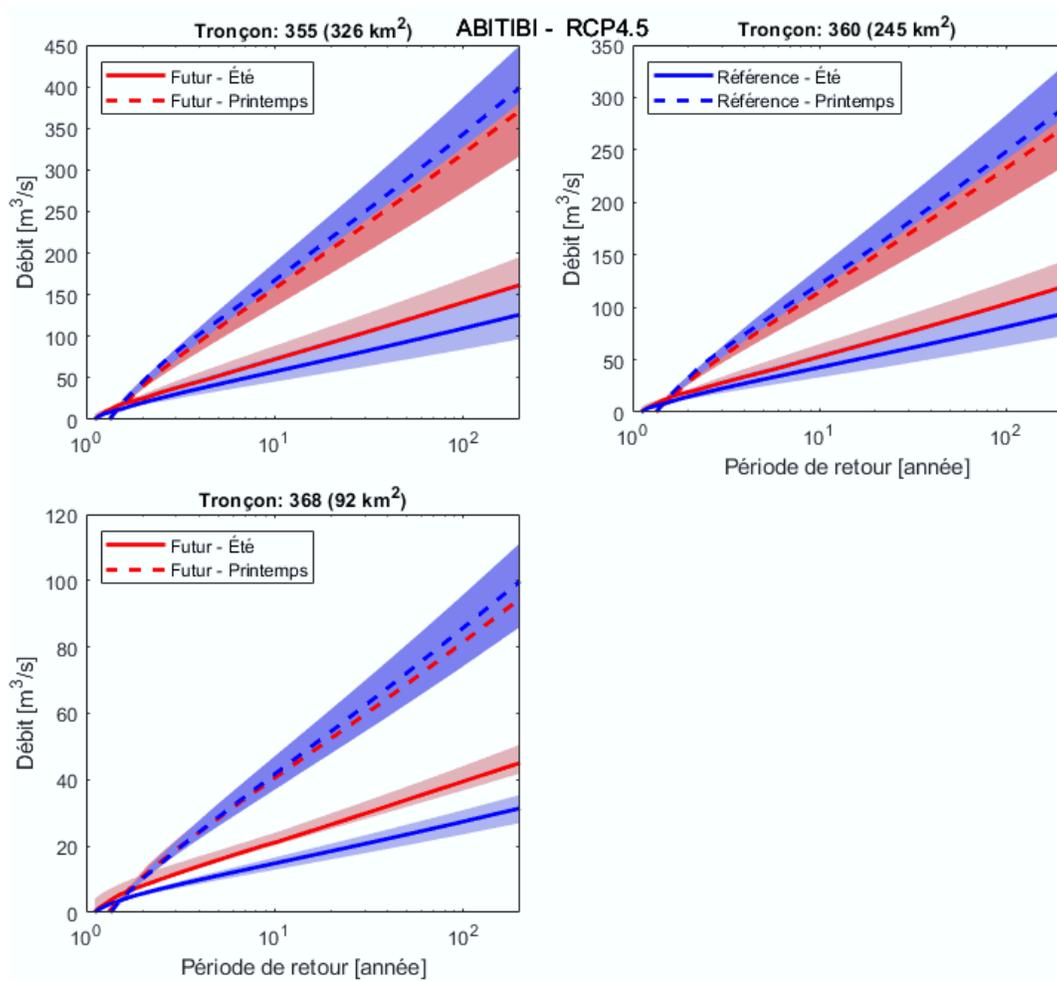


Figure 20 Incertitude des courbes de fréquence de crue pour les scenarios RCP4.5 du tronçon 355 et ses sous-bassins, Abitibi

En comparant la tendance des courbes de fréquence de crue saisonnières, on constate que dans certains cas, les courbes d'été et du printemps se croisent, figures 22 et 23, les débits maximums l'été dépassant ceux du printemps pour les plus grandes périodes de retour. Les crues liées aux systèmes météorologiques à petite échelle seraient dans certains cas plus importantes que celles provenant de la fonte.

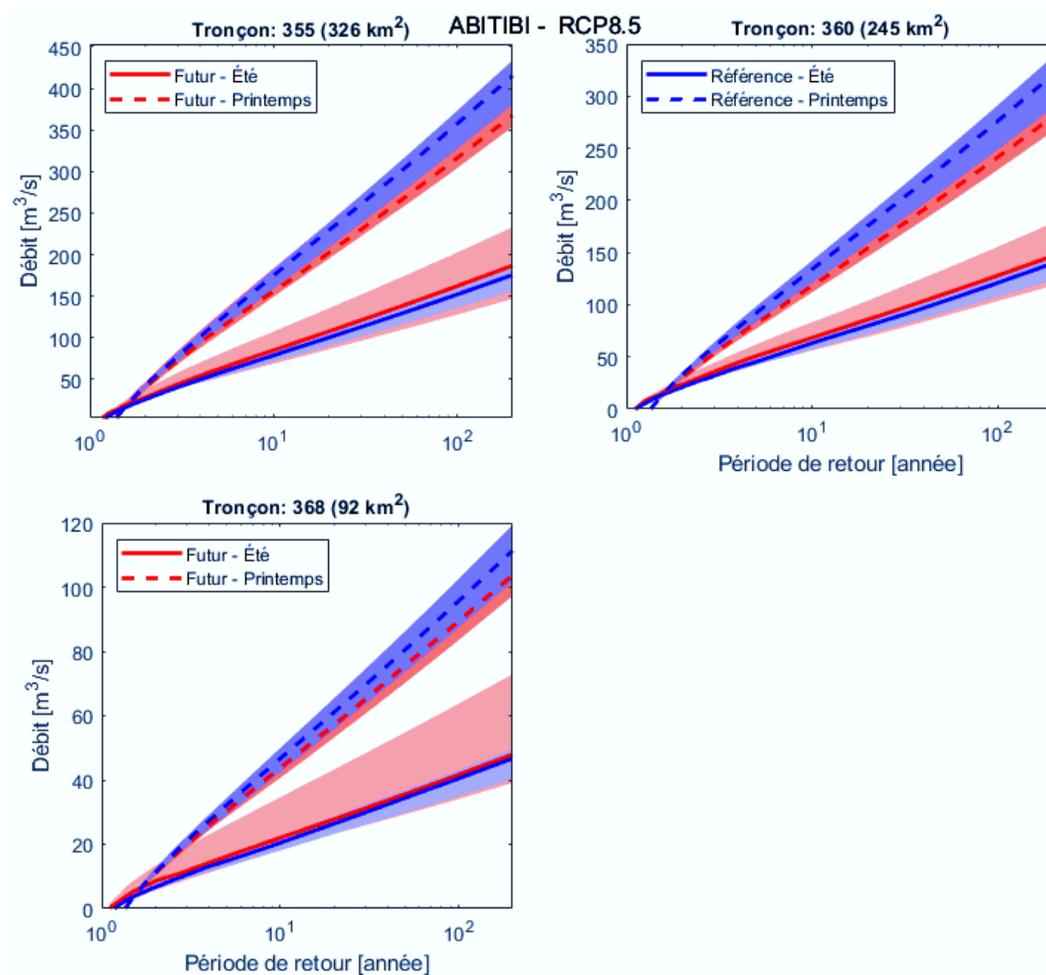


Figure 21 Incertitude des courbes de fréquence de crue pour les scénarios RCP8.5 du tronçon 355 et ses-sous bassins, Abitibi

Enfin, les sources d'incertitude des courbes de fréquence comprennent les projections climatiques, les scénarios de GES et les jeux de paramètres. De plus l'incertitude augmente avec la période de retour. En effet, les données de débits couvraient une période de 30 ans, alors les fonctions de distribution ont de problème d'extrapolation pour les périodes de retour plus grandes.

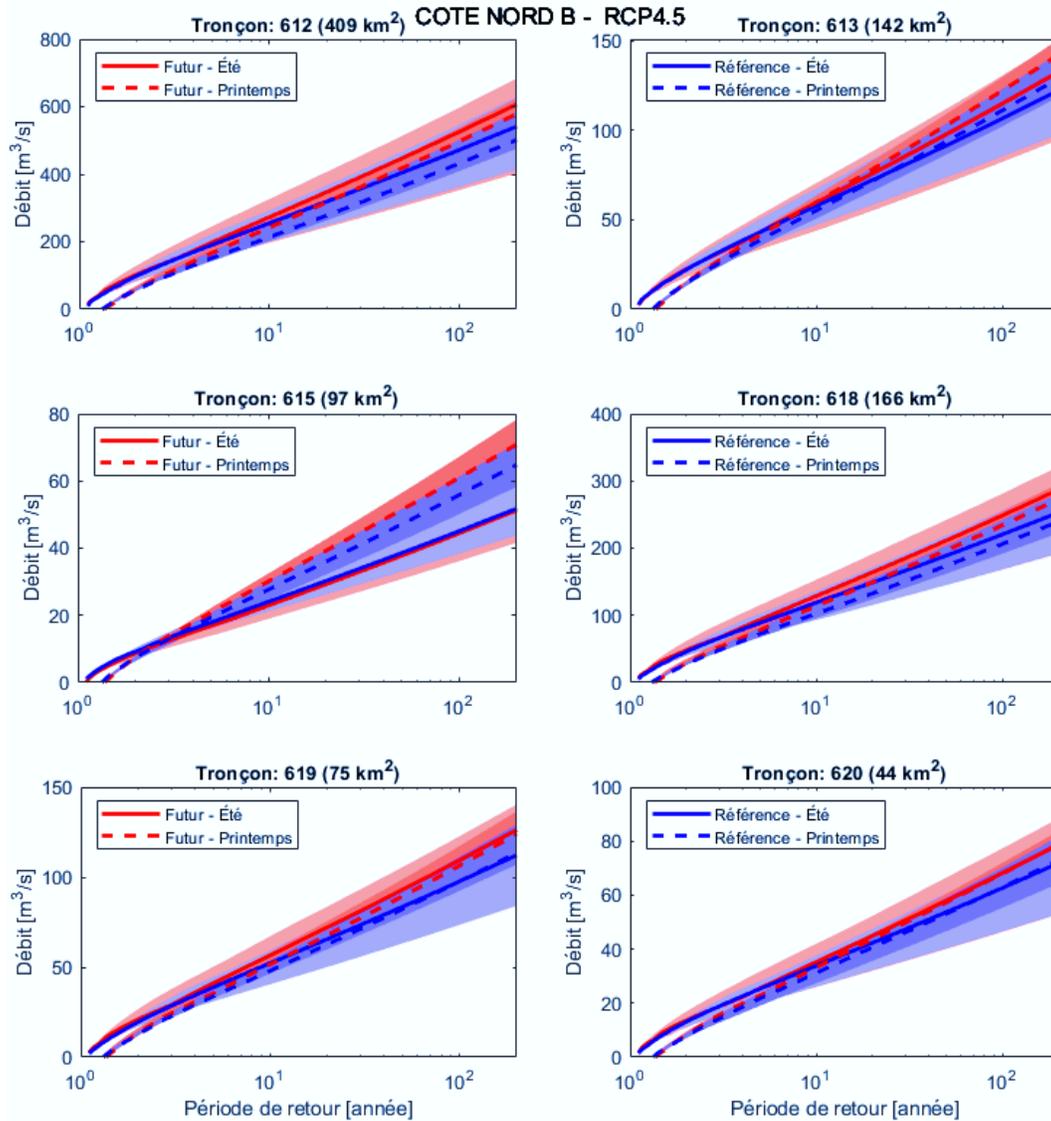


Figure 22 Incertitude des courbes de fréquence de crue pour les scénarios RCP4.5 du tronçon 612 et ses sous-bassins, Côte-Nord B

Plus particulièrement, on remarque une grande incertitude pour les scénarios RCP4.5 par rapport aux scénarios RCP8.5. L'incertitude des courbes de fréquence de crue varie d'un bassin versant à l'autre, d'un scénario de GES à l'autre et d'une saison à l'autre. À titre d'exemple, le bassin versant 355 qui se trouve en Abitibi, figure 19, a une petite incertitude pour le climat futur, alors que le bassin versant 2951, Outaouais aval, figure 18, a une grande incertitude dans le climat futur. Il faut cependant noter que les modèles climatiques retenus pour les simulations RCP4.5 ne se retrouvent pas tous dans

les scénarios RCP8.5 (voir le Tableau 6), ce qui peut avoir influencé les plages d'incertitude. La figure 20 montre une grande incertitude pour l'été par rapport au printemps, ainsi qu'un grand changement des débits dans le climat futur.

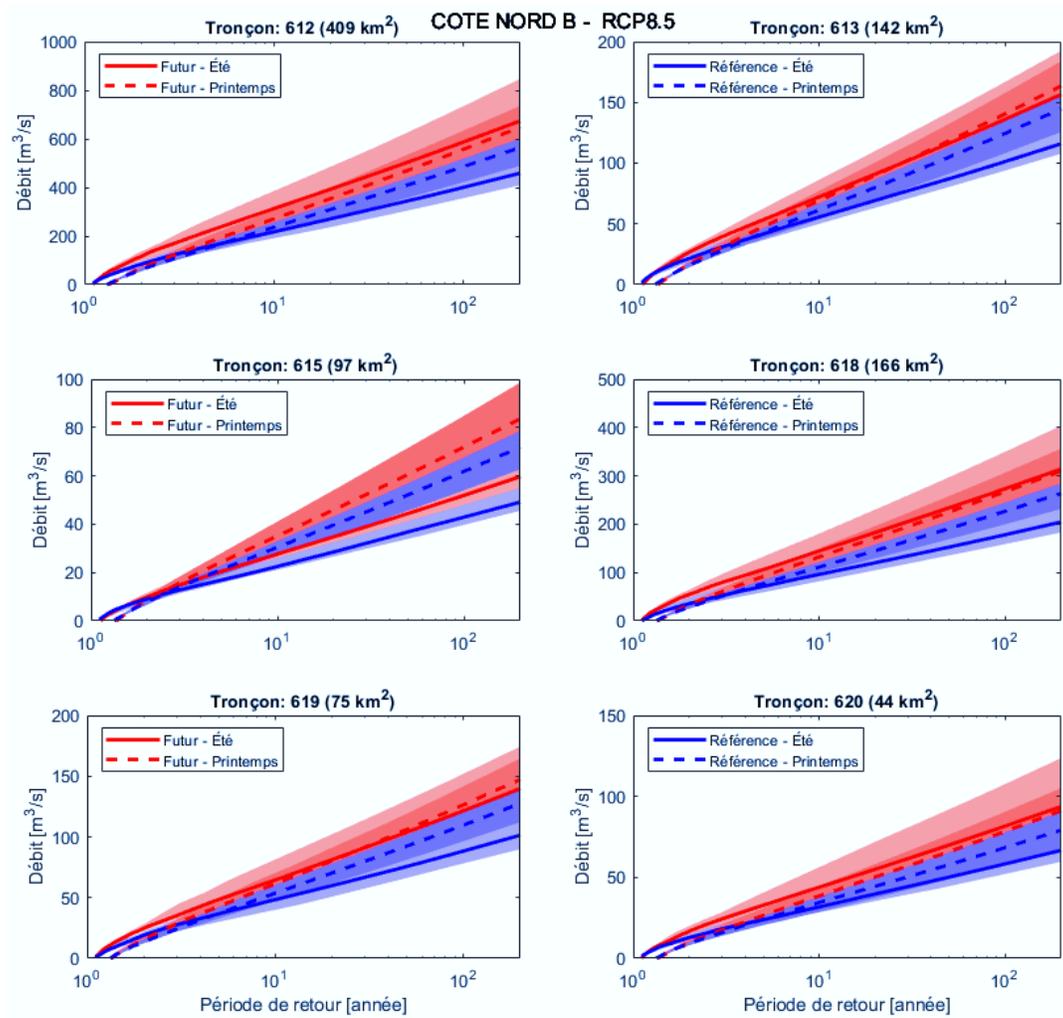


Figure 23 Incertitude des courbes de fréquence de crue pour les scénarios RCP8.5 du tronçon 612 et ses sous-bassins, Côte-Nord B

4.5.2 Facteurs de majoration

Les courbes de fréquence de crue des bassins versant étudiés ont été utilisées pour estimer les crues maximales de période de retour de 20 et 50 ans pour le climat de référence et le climat futur. Des facteurs de majoration ont été calculés pour tous les

bassins versants d'étude. Un facteur de majoration est défini comme étant le rapport entre le débit du climat futur et celui du climat de référence de même période de retour. Si le débit du climat futur est plus grand que celui du climat de référence, le facteur de majoration sera supérieur à 1. L'analyse de la variation des facteurs de majoration de débits des régions hydroclimatiques a permis de les régionaliser pour toutes les régions hydroclimatiques.

Le Tableau 11 montre la moyenne et l'écart type des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 et 50 ans avec la distribution de Fréchet (GEV de type II) pour chacun des scénarios de GES. Dans la plupart des cas la moyenne des facteurs de majoration est inférieure à 1 et cela pour toutes les régions hydroclimatiques. Dans certains cas, la moyenne des facteurs de majoration est légèrement supérieure à 1, sauf pour la région de l'Outaouais pendant l'été où le facteur de majoration est respectivement 1.25 et 1.23 et pour les périodes de retour de 20 et 50 ans. Les régions de Saguenay, Saint-Laurent Nord-Ouest et Sud-Ouest ont une moyenne des facteurs de majoration est supérieure à l'unité pendant le printemps pour le scénario RCP4.5.

Les facteurs de majoration montrent une grande variabilité (écart-type élevé) pour toutes les régions hydroclimatiques, pour toutes les périodes de retour et pour tous les scénarios de GES. L'incertitude des facteurs de majoration est liée à l'étendue des régions étudiées, ainsi qu'à la variabilité physiographique et climatique dans ces régions. La période de retour de 50 ans a une plus grande variabilité surtout pour la saison d'été. L'écart type pour les crues de 50 ans est supérieur à 0.4 pour les scénarios de GES avec la distribution log-normale. La distribution Gumbel montre aussi une grande variabilité qui est supérieure à 0.3 et qui arrive même à 0.4. Les régions de l'Outaouais et de Gaspésie ont la plus grande variabilité des facteurs de majoration de plus de 0.6 pour la période de retour de 20 ans.

Plutôt que de considérer la valeur moyenne des facteurs de majoration comme critère de conception, on peut choisir une approche plus conservatrice qui prenne compte de l'intervalle d'incertitude de ces facteurs. Dans le tableau 12, des valeurs correspondant aux 75^{ième} et 90^{ième} percentiles sont présentés. On note les facteurs de majoration correspondant à ces valeurs de percentile sont pour la plupart supérieurs à l'unité, que ce soit pour la pointe printanière ou la crue estivale.

Les Tableaux 13 et 16 donnent plus de détails sur la moyenne des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 et 50 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Fréchet, pour chacun des scénarios de GES. Les valeurs correspondant aux 75^{ième} et 90^{ième} percentiles sont présentées dans les Tableaux 14, 15, 17 et 18. On remarque que les bassins versants de 25 à 100 km² ont un facteur de majoration moyen qui est plus élevé par rapport aux autres bassins versants. Toutefois la différence n'est pas significative.

L'annexe 2 présente la moyenne des facteurs de majoration et les valeurs correspondant aux 75^{ième} et 90^{ième} percentiles avec les distributions de Gumbel et log-normale. On remarque que les valeurs des facteurs de majoration sont peu sensibles à la distribution de probabilité employée. Une analyse plus poussée a été réalisée, cette fois en utilisant la distribution de Fréchet, pour laquelle le facteur de forme (*'shape factor'*) de la distribution a été fixé à 0.05 et à 0.23 (une valeur de 0 correspond à la distribution de Gumbel). L'analyse confirme que, bien que la valeur des débits soit influencée par le choix de la distribution de probabilité, les facteurs de majoration, qui traduisent le changement de débit consécutif aux changements climatiques, sont peu sensibles à la distribution de probabilité employée.

Tableau 11 Moyenne et écart type des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 et 50 ans avec la distribution de Fréchet

Région	Printemps								Été							
	RCP4.5				RCP8.5				RCP4.5				RCP8.5			
	20		50		20		50		20		50		20		50	
	M	E	M	E	M	E	M	E	M	E	M	E	M	E	M	E
Abitibi	0.86	0.17	0.86	0.17	0.85	0.2	0.85	0.2	0.96	0.31	0.96	0.31	0.94	0.3	0.94	0.29
Côte-Nord A	0.97	0.17	0.97	0.18	0.9	0.2	0.9	0.2	0.94	0.45	0.94	0.46	0.82	0.34	0.81	0.33
Côte-Nord B	1.05	0.18	1.05	0.18	1.05	0.24	1.05	0.24	0.89	0.29	0.89	0.29	1.06	0.38	1.05	0.37
Côte-Nord C	0.94	0.32	0.93	0.32	0.93	0.26	0.93	0.26	0.92	0.43	0.92	0.42	0.95	0.39	0.94	0.39
Côte-Nord D	0.81	0.22	0.81	0.22	0.89	0.24	0.89	0.24	0.86	0.35	0.86	0.35	0.84	0.34	0.84	0.33
Côte-Nord E	0.77	0.3	0.77	0.31	0.87	0.29	0.86	0.29	0.8	0.46	0.8	0.46	0.88	0.4	0.88	0.41
Gaspésie	0.96	0.32	0.96	0.31	0.9	0.37	0.89	0.37	0.97	0.74	0.95	0.7	0.76	0.44	0.76	0.43
Montérégie	0.92	0.21	0.91	0.21	0.78	0.24	0.77	0.24	0.77	0.35	0.77	0.34	0.69	0.34	0.69	0.33
Outaouais Aval	0.99	0.41	0.98	0.4	0.76	0.36	0.76	0.35	1.25	0.72	1.23	0.69	0.86	0.38	0.86	0.37
Saguenay	1.01	0.32	1.01	0.32	0.93	0.28	0.93	0.27	0.85	0.42	0.85	0.41	0.78	0.34	0.77	0.33
St Laurent Nord-Ouest	1.08	0.37	1.07	0.37	0.81	0.27	0.8	0.26	1.08	0.52	1.07	0.48	0.58	0.34	0.58	0.33
St Laurent Sud-Ouest	1.03	0.32	1.03	0.33	0.95	0.2	0.95	0.2	0.63	0.25	0.64	0.25	0.63	0.32	0.63	0.32

M : moyenne, E : écart type

Tableau 12 75^{ième} et 90^{ième} percentiles des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 et 50 ans avec la distribution de Fréchet

Région	Printemps								Été							
	RCP4.5				RCP8.5				RCP4.5				RCP8.5			
	20		50		20		50		20		50		20		50	
	75	90	75	90	75	90	75	90	75	90	75	90	75	90	75	90
Abitibi	0.97	1.06	0.97	1.06	0.96	1.08	0.96	1.08	1.12	1.34	1.12	1.34	1.1	1.28	1.09	1.26
Côte-Nord A	1.08	1.19	1.08	1.19	1.02	1.12	1.02	1.12	1.18	1.63	1.18	1.65	0.99	1.19	0.98	1.18
Côte-Nord B	1.16	1.27	1.16	1.27	1.15	1.35	1.15	1.36	1.06	1.24	1.05	1.24	1.23	1.49	1.22	1.48
Côte-Nord C	1.04	1.22	1.04	1.22	1.06	1.2	1.06	1.19	1.07	1.38	1.06	1.37	1.12	1.42	1.12	1.41
Côte-Nord D	1	1.09	1	1.09	1.05	1.15	1.05	1.15	1.08	1.3	1.08	1.3	1.04	1.28	1.04	1.28
Côte-Nord E	1.02	1.17	1.02	1.17	1.07	1.21	1.07	1.21	1.15	1.48	1.15	1.48	1.15	1.41	1.16	1.41
Gaspésie	1.07	1.33	1.07	1.32	0.99	1.27	0.98	1.26	1.18	1.73	1.17	1.71	0.95	1.22	0.94	1.2
Montérégie	1.03	1.17	1.03	1.16	0.87	1.03	0.87	1.02	0.89	1.14	0.88	1.14	0.85	1.09	0.84	1.08
Outaouais Aval	1.13	1.4	1.12	1.39	0.9	1.15	0.9	1.14	1.38	2.21	1.36	2.15	1.03	1.28	1.03	1.27
Saguenay	1.09	1.3	1.08	1.29	1.05	1.22	1.04	1.21	1.06	1.28	1.04	1.26	0.96	1.15	0.95	1.14
St Laurent Nord-Ouest	1.21	1.54	1.2	1.52	0.93	1.11	0.92	1.09	1.2	1.67	1.18	1.61	0.79	1.05	0.78	1.03
St Laurent Sud-Ouest	1.16	1.54	1.15	1.58	1.04	1.15	1.04	1.14	0.83	0.95	0.83	0.94	0.87	1.14	0.86	1.14

Tableau 13 Moyenne des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Fréchet

Région	Printemps						Été					
	RCP4.5			RCP8.5			RCP4.5			RCP8.5		
	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500
Abitibi	0.87	0.85	0.86	0.86	0.85	0.85	0.95	0.96	0.99	0.91	0.96	0.97
Côte-Nord A	0.97	0.99	0.95	0.91	0.92	0.89	0.95	0.96	0.92	0.82	0.9	0.79
Côte-Nord B	1.05	1.04	1.05	1.05	1.04	1.07	0.9	0.91	0.85	1.05	1.05	1.06
Côte-Nord C	0.97	0.92	0.92	0.99	0.9	0.91	0.9	0.92	0.93	0.97	0.93	0.94
Côte-Nord D	0.8	0.79	0.83	0.87	0.89	0.91	0.9	0.84	0.86	0.81	0.82	0.87
Côte-Nord E	0.76	0.76	0.78	0.86	0.85	0.89	0.81	0.78	0.8	0.88	0.86	0.89
Gaspésie	0.96	0.97	0.96	0.9	0.9	0.88	0.96	0.97	0.97	0.77	0.76	0.76
Montérégie	0.92	0.91	0.92	0.79	0.77	0.77	0.77	0.78	0.77	0.69	0.69	0.72
Outaouais Aval	1.03	0.96	0.98	0.8	0.74	0.75	1.32	1.18	1.26	0.9	0.83	0.86
Saguenay	1.03	1.03	0.96	0.93	0.95	0.92	0.85	0.89	0.83	0.78	0.79	0.78
St Laurent Nord-Ouest	1.12	1.06	1.05	0.84	0.8	0.78	1.1	1.06	1.08	0.6	0.58	0.58
St Laurent Sud-Ouest	1.06	1.02	1.01	0.97	0.95	0.94	0.63	0.64	0.63	0.63	0.63	0.64

Tableau 14 75^{ième} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Fréchet

Région	Printemps						Été					
	RCP4.5			RCP8.5			RCP4.5			RCP8.5		
	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500
Abitibi	0.98	0.96	0.97	0.97	0.96	0.95	1.08	1.13	1.18	1.08	1.12	1.11
Côte-Nord A	1.09	1.09	1.05	1.03	1.05	1	1.2	1.2	1.17	0.99	1.07	0.95
Côte-Nord B	1.15	1.14	1.19	1.15	1.13	1.18	1.07	1.07	1.04	1.22	1.24	1.24
Côte-Nord C	1.09	1.02	1.04	1.12	1.05	1.05	1.04	1.08	1.11	1.14	1.11	1.12
Côte-Nord D	0.98	0.98	1.01	1.05	1.05	1.05	1.12	1.09	1.07	1.03	1.01	1.06
Côte-Nord E	1.01	1.01	1.04	1.05	1.05	1.11	1.14	1.13	1.19	1.14	1.14	1.19
Gaspésie	1.08	1.08	1.09	1	0.99	1	1.14	1.24	1.29	0.96	0.96	0.94
Montérégie	1.04	1.03	1.03	0.9	0.86	0.86	0.9	0.88	0.92	0.83	0.85	0.87
Outaouais Aval	1.2	1.09	1.13	0.94	0.9	0.91	1.56	1.27	1.44	1.08	1	1.04
Saguenay	1.1	1.11	1.04	1.05	1.06	1.05	1.06	1.1	1.03	0.97	0.98	0.95
St Laurent Nord-Ouest	1.26	1.2	1.18	0.97	0.92	0.9	1.22	1.2	1.19	0.81	0.78	0.81
St Laurent Sud-Ouest	1.23	1.12	1.13	1.05	1.05	1.04	0.84	0.84	0.82	0.86	0.87	0.87

Tableau 15 90^{ième} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Fréchet

Région	Printemps						Été					
	RCP4.5			RCP8.5			RCP4.5			RCP8.5		
	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500
Abitibi	1.09	1.05	1.05	1.1	1.07	1.07	1.35	1.33	1.36	1.26	1.3	1.3
Côte-Nord A	1.2	1.2	1.18	1.12	1.15	1.1	1.67	1.75	1.56	1.22	1.3	1.13
Côte-Nord B	1.25	1.26	1.31	1.32	1.3	1.46	1.28	1.29	1.19	1.5	1.5	1.5
Côte-Nord C	1.27	1.19	1.22	1.26	1.17	1.17	1.3	1.38	1.46	1.47	1.4	1.4
Côte-Nord D	1.1	1.09	1.09	1.16	1.16	1.16	1.31	1.31	1.32	1.32	1.29	1.28
Côte-Nord E	1.17	1.15	1.21	1.2	1.18	1.27	1.49	1.46	1.5	1.41	1.42	1.42
Gaspésie	1.32	1.37	1.35	1.28	1.28	1.25	1.7	1.79	1.83	1.24	1.22	1.2
Montérégie	1.19	1.15	1.15	1.05	1.01	1	1.12	1.15	1.24	1.09	1.09	1.11
Outaouais Aval	1.61	1.35	1.37	1.27	1.1	1.14	2.52	1.9	2.27	1.4	1.22	1.3
Saguenay	1.4	1.32	1.19	1.26	1.23	1.18	1.3	1.35	1.25	1.16	1.18	1.12
St Laurent Nord-Ouest	1.63	1.5	1.5	1.17	1.09	1.05	1.7	1.66	1.67	1.06	1.05	1.05
St Laurent Sud-Ouest	1.57	1.53	1.52	1.17	1.14	1.14	0.95	0.96	0.95	1.15	1.13	1.14

Tableau 16 Moyenne des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 50 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Fréchet

Région	Printemps						Été					
	RCP4.5			RCP8.5			RCP4.5			RCP8.5		
	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500
Abitibi	0.87	0.85	0.86	0.85	0.84	0.84	0.95	0.96	0.99	0.91	0.96	0.96
Côte-Nord A	0.97	0.99	0.95	0.91	0.92	0.89	0.95	0.96	0.92	0.81	0.88	0.79
Côte-Nord B	1.05	1.04	1.05	1.05	1.04	1.07	0.91	0.91	0.86	1.05	1.05	1.06
Côte-Nord C	0.97	0.92	0.92	0.99	0.9	0.91	0.9	0.92	0.93	0.96	0.93	0.94
Côte-Nord D	0.8	0.79	0.84	0.87	0.89	0.91	0.9	0.84	0.85	0.81	0.82	0.87
Côte-Nord E	0.76	0.76	0.77	0.86	0.84	0.89	0.81	0.78	0.8	0.88	0.86	0.89
Gaspésie	0.95	0.97	0.95	0.89	0.9	0.88	0.95	0.96	0.96	0.76	0.75	0.75
Montérégie	0.91	0.91	0.92	0.78	0.76	0.76	0.77	0.77	0.76	0.68	0.68	0.71
Outaouais Aval	1.02	0.95	0.98	0.8	0.74	0.74	1.3	1.17	1.24	0.9	0.84	0.86
Saguenay	1.03	1.03	0.95	0.92	0.94	0.92	0.84	0.87	0.82	0.77	0.78	0.77
St Laurent Nord-Ouest	1.11	1.05	1.04	0.83	0.79	0.77	1.09	1.05	1.07	0.6	0.58	0.58
St Laurent Sud-Ouest	1.06	1.02	1.01	0.96	0.95	0.93	0.64	0.64	0.64	0.63	0.63	0.63

Tableau 17 75^{ième} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 50 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Fréchet

Région	Printemps						Été					
	RCP4.5			RCP8.5			RCP4.5			RCP8.5		
	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500
Abitibi	0.98	0.96	0.96	0.97	0.95	0.95	1.08	1.14	1.18	1.07	1.11	1.11
Côte-Nord A	1.09	1.09	1.06	1.03	1.05	1	1.2	1.21	1.17	0.98	1.06	0.95
Côte-Nord B	1.15	1.14	1.19	1.15	1.13	1.18	1.07	1.07	1.04	1.22	1.23	1.23
Côte-Nord C	1.09	1.03	1.05	1.11	1.05	1.05	1.04	1.08	1.1	1.14	1.11	1.12
Côte-Nord D	0.99	0.98	1.02	1.05	1.05	1.05	1.12	1.09	1.06	1.04	1.01	1.07
Côte-Nord E	1.02	1.01	1.05	1.05	1.05	1.11	1.14	1.13	1.2	1.15	1.15	1.19
Gaspésie	1.07	1.07	1.09	0.99	0.98	0.99	1.14	1.23	1.27	0.95	0.95	0.93
Montérégie	1.04	1.02	1.02	0.89	0.86	0.85	0.89	0.87	0.91	0.82	0.84	0.87
Outaouais Aval	1.19	1.09	1.13	0.93	0.89	0.9	1.54	1.26	1.42	1.07	1	1.03
Saguenay	1.09	1.1	1.04	1.04	1.05	1.05	1.04	1.09	1.01	0.96	0.97	0.94
St Laurent Nord-Ouest	1.25	1.19	1.17	0.96	0.92	0.9	1.2	1.18	1.18	0.8	0.77	0.8
St Laurent Sud-Ouest	1.22	1.11	1.12	1.05	1.04	1.03	0.84	0.84	0.82	0.85	0.86	0.86

Tableau 18 90^{ième} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 50 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Fréchet

Région	Printemps						Été					
	RCP4.5			RCP8.5			RCP4.5			RCP8.5		
	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500
Abitibi	1.09	1.05	1.05	1.1	1.07	1.07	1.36	1.33	1.35	1.25	1.29	1.28
Côte-Nord A	1.2	1.2	1.19	1.12	1.15	1.1	1.69	1.78	1.57	1.21	1.29	1.12
Côte-Nord B	1.25	1.25	1.31	1.32	1.3	1.47	1.28	1.29	1.18	1.49	1.5	1.48
Côte-Nord C	1.27	1.19	1.23	1.25	1.17	1.16	1.3	1.37	1.44	1.46	1.4	1.39
Côte-Nord D	1.11	1.1	1.1	1.16	1.15	1.16	1.32	1.3	1.32	1.31	1.29	1.27
Côte-Nord E	1.17	1.16	1.21	1.2	1.18	1.27	1.49	1.47	1.51	1.42	1.43	1.42
Gaspésie	1.3	1.35	1.33	1.26	1.26	1.23	1.68	1.77	1.79	1.22	1.2	1.18
Montérégie	1.19	1.14	1.14	1.04	1.01	0.99	1.11	1.14	1.23	1.08	1.07	1.1
Outaouais Aval	1.58	1.34	1.36	1.26	1.09	1.13	2.43	1.83	2.19	1.38	1.21	1.29
Saguenay	1.38	1.31	1.18	1.25	1.22	1.17	1.28	1.33	1.24	1.15	1.17	1.11
St Laurent Nord-Ouest	1.61	1.48	1.48	1.16	1.08	1.04	1.64	1.6	1.6	1.05	1.03	1.03
St Laurent Sud-Ouest	1.6	1.57	1.56	1.16	1.14	1.13	0.95	0.96	0.94	1.15	1.13	1.13

Les figures 24 à 27 illustrent la variation géographique des valeurs correspondant aux 75^{ième} percentiles des facteurs de majoration des régions hydroclimatiques étudiées. Les résultats d'une approche plus conservatrice qui prend compte de l'intervalle d'incertitude de ces facteurs sont présentés ici, plutôt que ceux de la moyenne des facteurs de majoration qui sont présentés dans l'annexe 3.

Les points représentent les bassins versants étudiés et leur taille symbolisent la classification des bassins selon leur superficie. Les classes de 25 à 100 km² et 100 à 300 km² sont des sous-bassins de la classe 300 à 500 km². Les figures montrent une tendance générale nord-sud à la hausse dans chaque région et aussi pour l'ensemble des régions, pour toutes les périodes de retour, pour tous les scénarios de GES et pour les saisons printanière et estivale. On remarque une tendance à l'augmentation des crues maximales au nord et une diminution au sud de la zone d'étude, qui suit le changement de la température et des précipitations dans le climat futur.

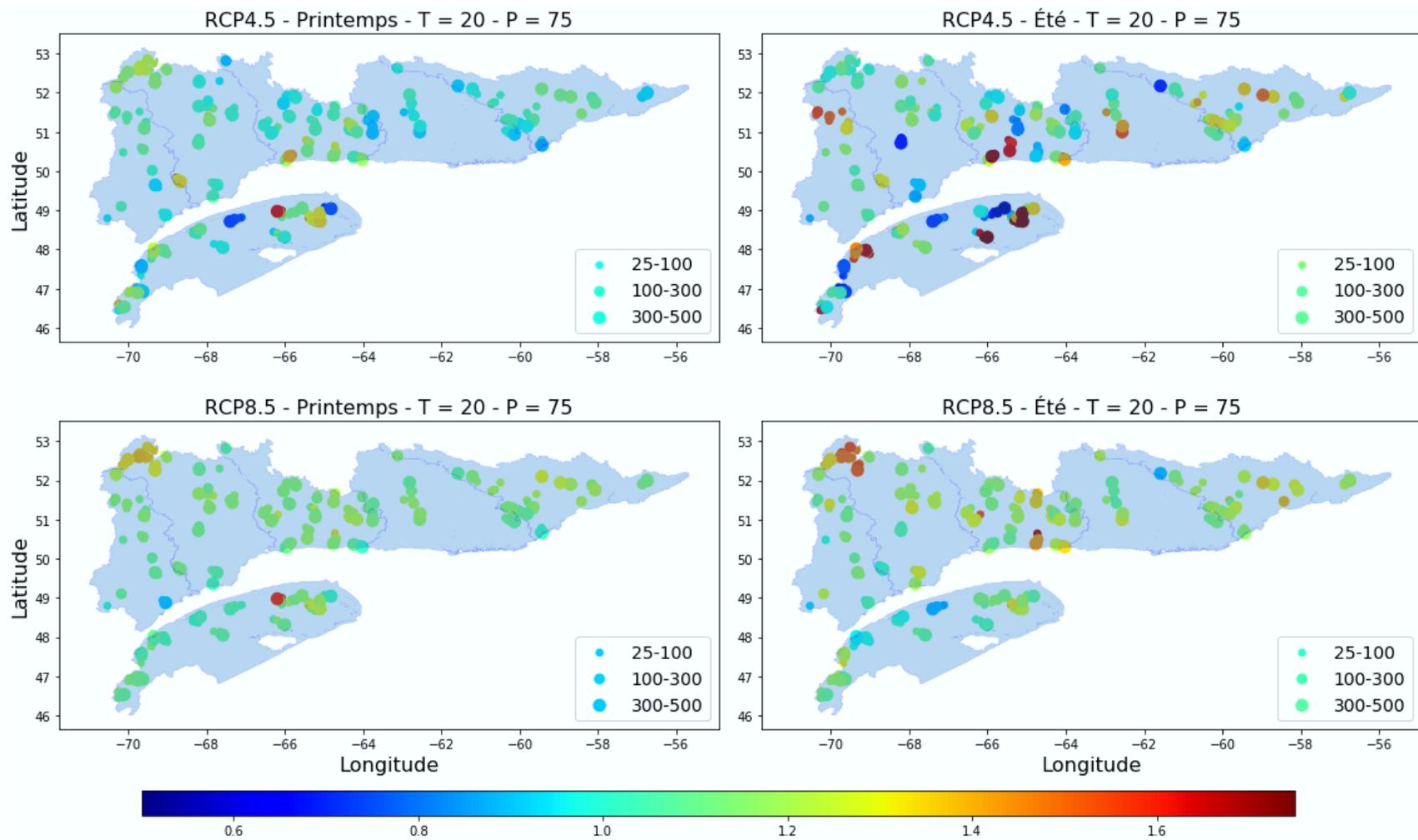


Figure 24 Facteurs de majoration (75^{ème} percentile) pour les régions hydroclimatiques situées au sud-est du Québec pour une de période de retour de 20 ans au printemps et en été

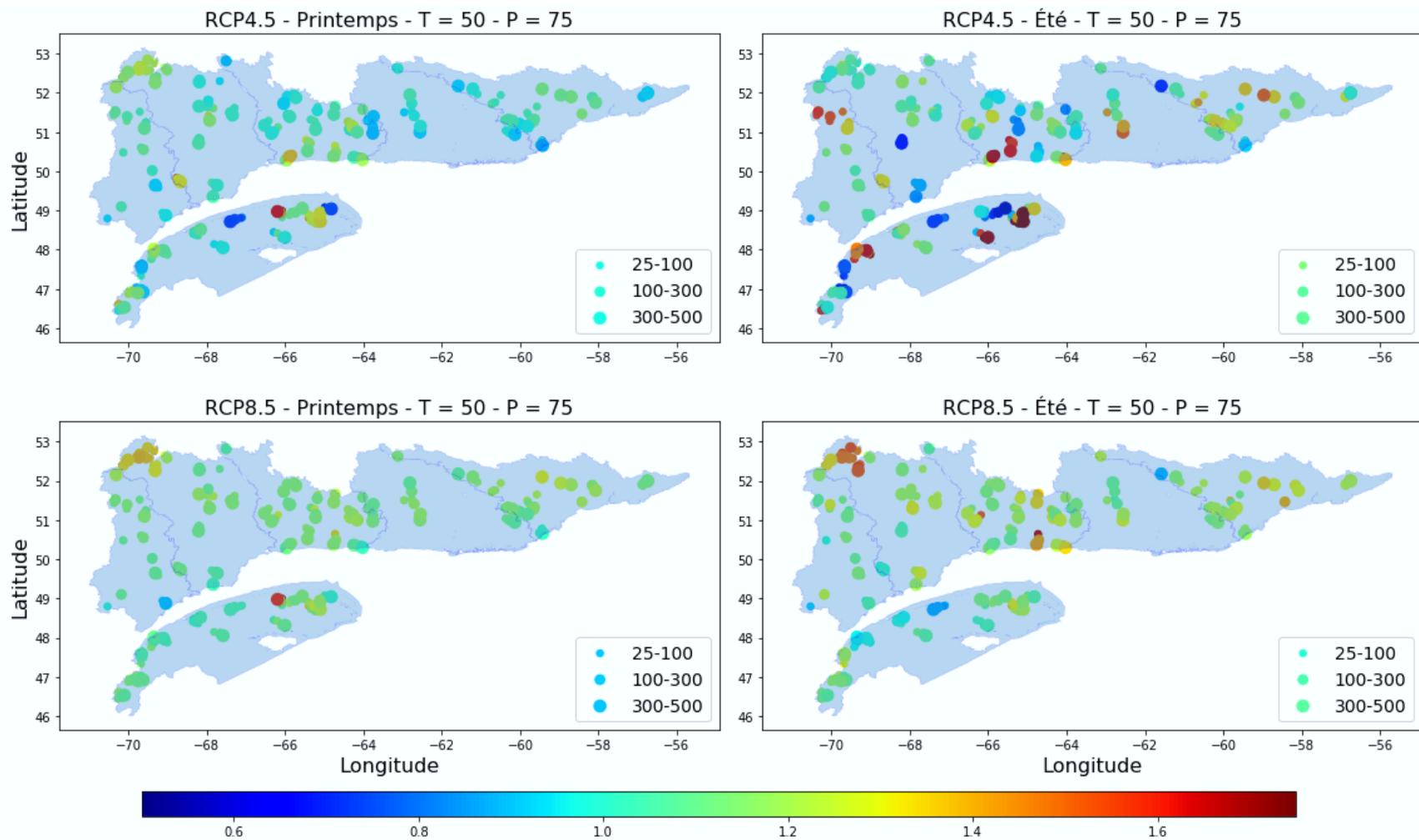


Figure 25 Facteurs de majoration (75^{ème} percentile) pour les régions hydroclimatiques situées au sud-est du Québec pour une de période de retour de 50 ans au printemps et en été

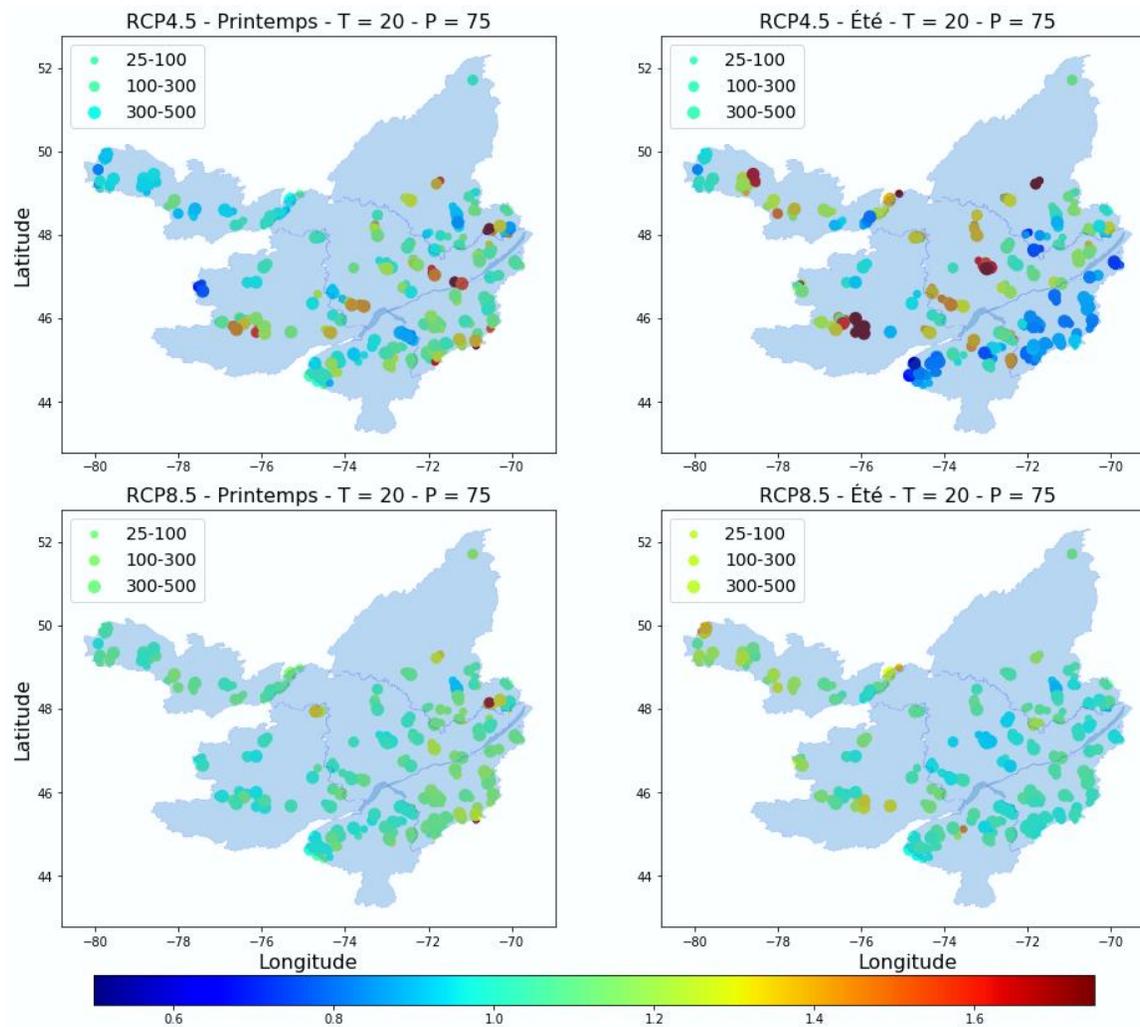


Figure 26 Facteurs de majoration (75^{ième} percentile) pour les régions hydroclimatiques situées au sud-ouest du Québec pour une de période de retour de 20 ans au printemps et en été

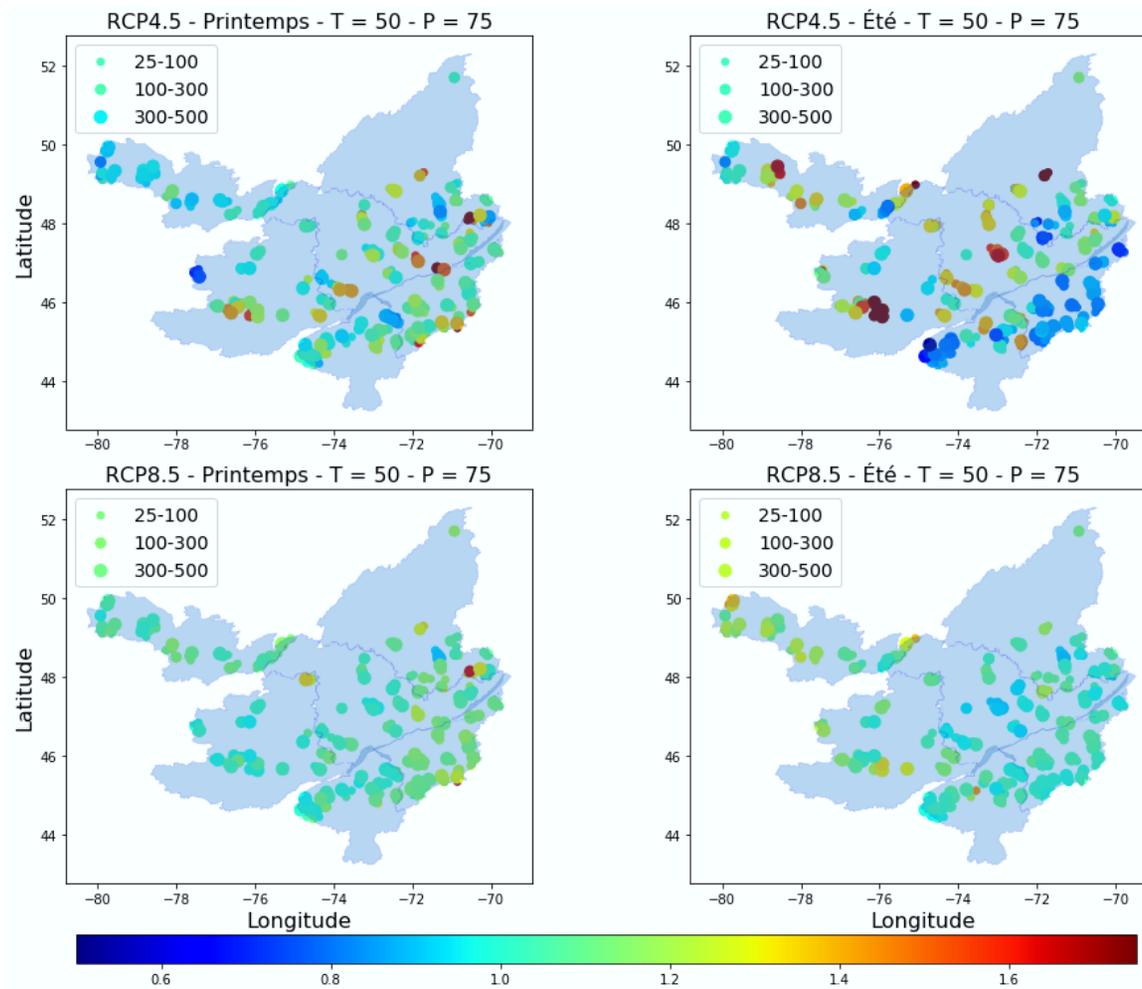


Figure 27 Facteurs de majoration (75^{ième} percentile) pour les régions hydroclimatiques situées au sud-ouest du Québec pour une de période de retour de 50 ans au printemps et en été

Les scénarios de GES montrent différents comportements pour la tendance nord-sud des facteurs de majoration. Au nord, les scénarios RCP8.5 ont des valeurs plus élevées par rapport aux scénarios RCP4.5, tandis qu'au sud c'est l'inverse. Les facteurs de majoration sont à la baisse avec RCP8.5 comparé à RCP4.5, ce qui se traduit par des couleurs généralement plus foncées. Le scénario RCP8.5 est considéré comme un scénario pessimiste avec plus de changement de la température dans le climat futur que le scénario RCP4.5, qui est considéré comme optimiste.

D'une manière générale, il n'y a pas de grande variation au sein des bassins versants, ni de tendances géographiques importantes particulières. Les bassins versant de 300 à 500 km² et leurs sous bassins de 25 à 300 km² ont des facteurs de majoration qui tombent dans la même fourchette. Les figures 24 à 27 montrent que dans la plupart des cas, les points qui sont proches ont les mêmes couleurs. Néanmoins, les caractéristiques physiographiques des bassins voisins pourraient faire varier le facteur de majoration, d'autant plus que le modèle HYDROTEL tient compte de la topographie et la couverture végétale de bassins versants.

5 Conclusion

L'objectif de la présente étude est d'évaluer les changements climatiques anticipés pour les bassins versants de taille moyenne, soit entre 25 et 500 km², et d'obtenir des recommandations sur les facteurs de majoration des débits à considérer pour ces bassins. La zone d'étude consiste en 12 principales régions hydroclimatiques situées dans le Québec méridional. La méthodologie adoptée pour cette étude consistait dans un premier temps à la mise en œuvre du modèle hydrologique sur une série de bassins versants témoins. Ensuite, les projections hydrologiques ont été simulées à partir des projections climatiques issues de modèles régionaux de climat. Ces projections hydrologiques ont permis de calculer des facteurs de majoration des débits. Les facteurs de majoration obtenus pour ces bassins ont été régionalisés pour l'ensemble des bassins versants de la zone d'étude.

Le modèle HYDROTEL a été calé sur un ensemble de bassins versants témoins de chacune des régions hydroclimatiques. Un ensemble de jeux de paramètres obtenu lors du calage des bassins versants témoins ont été transposé sur des bassins versants autres que les bassins témoins. Les bassins versants ont été groupés en trois classes selon leur taille : 25 à 100 km², 100 à 300 km² et 300 à 500 km². Dans chaque région hydroclimatique des dizaines de bassins versants de 300 à 500 km² ont été choisis et ils ont été simulés avec HYDROTEL avec au moins 3 jeux de paramètres. Des projections climatiques au pas temps journalier issues du projet CORDEX ont été employées. Ces projections climatiques ont été mises à l'échelle temporelle au pas de temps de 3h et une correction de biais a été aussi effectuée.

Les impacts des changements climatiques sur le climat de la zone d'étude seraient une augmentation de la température moyenne et un changement des précipitations mensuelles. L'hiver connaîtrait des changements importants par rapport aux autres saisons et une plus grande incertitude tant pour la température que pour les précipitations. Il y aurait moins des changements pendant l'été. Il y aurait un

changement de régime hydrologique dans le climat futur par rapport à la période de référence: une importante augmentation du volume de ruissellement pendant l'hiver dans toutes les régions hydroclimatiques, un devancement de la crue printanière et une diminution du volume et du débit de pointe. Il y aurait aussi une faible augmentation du ruissellement pendant l'été pour toutes les régions. La variabilité des changements du volume de ruissellement est plus importante aux mois de mars et avril à cause du devancement de la crue printanière et des redoux hivernaux qui seraient plus fréquents dans le climat futur.

Les valeurs de crues maximales saisonnières (printemps = 1^{er} janvier au 31 mai et été = 1^{er} juin au 31 décembre) ont été extraites des projections hydrologiques afin de déterminer les courbes de fréquence de crue pour tous les bassins versants étudiés. Les séries de crues maximales du climat actuel et du climat futur ont été ajustées aux distributions de probabilité de Gumbel, log-normale et Fréchet, pour tous les bassins versants avec l'ensemble des projections hydrologiques. Les courbes de fréquence de crue ont été utilisées pour établir les débits associés aux périodes de retour de 20 et 50 ans. Pour la majorité de bassins versants étudiés, les crues les plus importantes dans ces bassins seraient liées à la fonte de neige dans le climat futur.

En général, pour une même période de retour, les débits du printemps seraient plus élevés par rapport aux débits d'été et les débits du climat futur seraient moins importants par rapport aux débits du climat de référence. La diminution de débit en été peut être expliquée par l'assèchement de sols et l'augmentation de l'infiltration. La diminution du débit maximal au printemps est plutôt reliée à la diminution de l'épaisseur maximale du manteau neigeux, elle-même liée à l'augmentation des redoux hivernaux. À partir de ces débits, des facteurs de majoration ont été tirés en fonction de la période de retour. Cette analyse a été effectuée pour l'ensemble des projections hydrologiques.

Les résultats montrent que les distributions de probabilités ont donné des résultats comparables et les facteurs de majoration sont peu sensibles à la distribution de probabilité employée. Dans la plupart des cas, le facteur de majoration moyen est inférieur à l'unité et pour toutes les régions hydroclimatiques. Dans certains cas, le facteur de majoration moyen est supérieur à l'unité surtout pour les scénarios RCP4.5. Les facteurs de majoration montrent une grande variabilité pour toutes les régions hydroclimatiques. Le facteur de majoration correspondant au 75 et au 90^{ième} percentile est généralement supérieur à l'unité. La période de retour de 50 ans montre une plus grande variabilité surtout pour la saison d'été. L'incertitude des facteurs de majoration est liée à l'étendue des régions étudiés et la variation physiographique et climatique dans ces régions.

Références

- Bergeron, O. (2016). *Guide d'utilisation. Grilles climatiques trois heures du Programme de surveillance du climat du Québec. Version 1*,. Quebec.
- Centre d'expertise hydrique du Québec. (2015). *Atlas hydroclimatique du Québec méridional. Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050*. Québec.
- Fortin, J. P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., & Fitzback, J. (2001). A Distributed Watershed Model Compatible with Remote Sensing and GIS Data, Part I : Description of the model. *Journal of Hydrologic Engineering, American Society of Civil Engineering*, 6(2), 91–99.
- 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.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>
- Mailhot, A., Panthou, G., Talbot, G. (2014). *Recommandations sur les majorations à considérer pour les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) aux horizons 2040-2070 et 2070-2100 pour l'ensemble du Québec. Phase II. INRS-ETE*.
- Matott, L. (2017). *OSTRICH: an Optimization Software Tool, Documentation and User's Guide, Version 17.12.19*. Retrieved from
www.eng.buffalo.edu/~lsmatott/Ostrich/OstrichMain.html
- Mearns, L. O. (2017). *The NA-CORDEX dataset, version 1.0. NCAR Climate Data Gateway*. Boulder CO. <https://doi.org/10.5065/D6SJ1JCH>
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models' part I -A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–29.
- Razavi, T., & Coulibaly, P. (2013). Streamflow Prediction in Ungauged Basins: Review of Regionalization Methods. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(8), 958–975.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000690](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000690)
- Reed, S., Koren, V., Smith, M., Zhang, Z., Fekadu Moreda, Seo, D.-J., & Participants, D. (2004). Overall distributed model intercomparison project results. *Journal of*

Hydrology, 298(1–4), 27–60.

- Shafii, M., & Tolson, B. A. (2015). Optimizing hydrological consistency by incorporating hydrological signatures into model calibration objectives. *Water Resources Research*, 51(5), 3796–3814. <https://doi.org/10.1002/2014WR016520>
- Teutschbein, C., & Seibert, J. (2012). Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456–457, 12–29. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.052>
- Tolson, B. A., & Shoemaker, C. A. (2007). Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. *Water Resources Research*, 43(1). <https://doi.org/10.1029/2005WR004723>
- Tolson, B. A., & Shoemaker, C. A. (2008). Efficient prediction uncertainty approximation in the calibration of environmental simulation models. *Water Resources Research*, 44(4). <https://doi.org/10.1029/2007WR005869>

ANNEXE 1 : Liste des bassins versants du Québec de taille entre 25 et 500 km²

Les tableaux ci-dessous présentent la liste des bassins versants du Québec ayant une superficie entre 25 et 500 km² avec la période des observations de débits aux 3h disponibles.

Tableau 19: Liste des bassins versants ayant une taille entre 25 et 500 km² de la région
bas Saint-Laurent et Montérégie.

Station	Superficie BV (km ²)	Nom	Régime	Latitude	Longitude	Altitude	Période de données	
21702	223	Blanche	Influencé *	48.77	-67.67	30.5	Sep-1997	Oct-2017
21916	98.6	Mitis	Naturel	48.42	-68.36	0	Sep-2000	Oct-2017
22505	267	Fourchue	Influencé**	47.65	-69.51	182.9	Oct-1997	Oct-2017
22601	213	Kamouraska	Naturel	47.53	-69.85	0	Sep-2008	Oct-2017
23002	61	Boyer Sud	Naturel	46.71	-70.96	275	Oct-1997	Oct-2017
23004	191	Boyer	Naturel	46.82	-70.90	50	Oct-199	Oct-2017
23432	154	Bras d'Henri	Naturel	46.54	-71.34	117.3	Oct-1997	Oct-2017
24015	48.10	Bourbon	Naturel	46.18	-71.75	0	Jul-2006	Oct-2017
30299	273	St-Germain	Naturel	45.87	-71.48		Sep-2014	Oct-2017
30309	131	Yamaska Nord	Influencé**	45.42	-72.61	121.9	Oct-1997	Oct-2017
30314	214	Yamaska Sud-Est	Influencé	45.21	-72.75	114.3	May-1997	Oct-2017
30316	323	David	Naturel	45.95	-72.86	14	Oct-1997	Oct-2017
30340	235	Yamaska Nord	Influencé*	45.36	-72.78	80	Aug-1997	Oct-2017
30343	31	Yamaska Nord	Influencé*	45.35	-72.52	204	Oct-1997	Oct-2017
30353	230.9	Yamaska	Influencé*	45.30	-71.40		Sep-2014	Oct-2017
30415	308	Des Hurons	Naturel	45.49	-73.19	23.2	May-1997	Oct-2017
30421	367	L'Acadie	Naturel	45.39	-73.37	21.3	Aug-1997	Oct-2017
30423	94	Morpions	Naturel	45.20	-73.03	46	Jul-1999	Oct-2017
30425	73	De la Roche	Naturel	45.02	-73.02	55	Oct-2001	Oct-2017
30426	26	Ewing	Naturel	45.13	-73.08	38	Nov-2001	Oct-2017
30920	47	Noire	Naturel	45.08	-73.85	0	Jul-2005	Oct-2017
30921	246	Des Anglais	Naturel	45.10	-73.76	0	Jul-2005	Oct-2017
23702	385	Petite rivière du Chêne	Naturel	46.54	-72.09	27	Apr-2007	May -2018
30106	344	Bulstrode	Influencé	46.07	-71.98	128	Oct-1997	May-2018
30262	262	Saint-Germain	Naturel	45.887	-71.48		Oct-1997	Jul-2014

* influencé jour

** influencé mois

Tableau 20: Liste des bassins versants ayant une taille comprise entre 25 et 500 km² de la région Gaspésie, Saguenay, Outaouais, Côte Nord, et Abitibi-Témiscamingue et Saint-Laurent Nord-Ouest.

Station	Superficie BV (km ²)	Nom	Régime	Latitude	Longitude	Altitude	Période de données	
40122	311	Du Nord	Influencé**	46.05	-74.25	335.3	Oct-1997	Oct-2017
40129	106	Doncaster	Naturel	46.10	-74.12	359.7	Sep-1997	Oct-2017
40132	40.3	Décharge du lac Ludger	Influencé**	46.12	-74.28	373	Oct-1997	Oct-2017
40212	40	Saint-Louis	Naturel	46.37	-74.50	371.9	Jun-1997	Oct-2017
40409	62.6	Suffolk	Naturel	45.88	-75.02	195.1	Jun-1997	Oct-2017
46709	196	Du Chêne	Naturel	45.56	-72.92		Mar-2010	Oct-2017
50702	328	Portneuf	Naturel	46.73	-71.84	52.5	May-2002	Oct-2017
50807	223	Ontaritz	Influencé**	46.87	-71.64	158.5	Oct-1997	Oct-2017
50812	97.8	Aux Pommes	Naturel	46.70	-71.69	49.5	Oct-1997	Oct-2017
50904	365	Saint-Charles	Influencé	46.82	-71.32	12.2	Oct-1997	Oct-2017
50915	58.4	Nelson	Naturel	46.87	-71.43	0	Jun-2006	Oct-2017
50916	75.5	Des Hurons	Naturel	47.00	-71.36	0	Dec-2007	Oct-2017
51005	267	Montmorency	Naturel	47.26	-71.14	442	May-1997	Oct-2017
52228	188	Noire	Naturel	46.34	-73.65	237.7	Oct-1997	Oct-2017
52401	194	Bayonne	Naturel	46.16	-73.39	0	Nov-2009	Oct-2017
52606	205	Mastigouche	Influencé*	46.44	-73.46	305	Aug-1997	Oct-2017
60102	433	Petit Saguenay	Naturel	48.09	-70.03	166	Oct-1998	Oct-2017
60704	446	À Mars	Naturel	48.20	-71.00	0	Oct-2008	Oct-2017
60901	358	Du Moulin	Naturel	48.39	-71.04	0	Oct-2008	Oct-2017
61022	490	Pikauba	Naturel	47.94	-71.38	554.7	Apr-1997	Oct-2017
61024	350	Cyriac	Naturel	48.24	-71.29	100	Apr-1997	Oct-2017
61307	306	La Belle Rivière	Naturel	48.41	-71.70	100	Apr-1997	Oct-2017
64101	177	Aux Iroquois	Naturel	48.58	-71.62		Nov-2011	Oct-2017
71203	431	Aux Anglais	Influencé	49.32	-68.16	0	Oct-2008	Oct-2017
71801	219.5	Riverin	Naturel	49.81	-66.83		Oct-2014	Oct-2017
80106	365	Bourlamaque	Naturel	48.09	-77.67	0	Nov-2009	Oct-2017
89907	222	Bellefeuille	Naturel	48.74	-77.13		Aug-2010	Oct-2017
120201	26.6	Dauphine	Naturel	46.58	-77.51		Aug-1997	Oct-2017

* influencé jour

** influencé mois

**ANNEXE 2 : Facteurs de majoration pour les crues maximales
avec les distributions de Gumbel et log-normale**

Tableau 21 Moyenne et écart type des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 et 50 ans avec la distribution de Gumbel

Région	Printemps								Été							
	RCP4.5				RCP8.5				RCP4.5				RCP8.5			
	20		50		20		50		20		50		20		50	
	M	E	M	E	M	E	M	E	M	E	M	E	M	E	M	E
Abitibi	0.85	0.17	0.85	0.17	0.84	0.2	0.85	0.2	0.96	0.33	0.96	0.34	0.92	0.3	0.93	0.31
Côte-Nord A	0.93	0.17	0.93	0.17	0.86	0.19	0.86	0.19	0.96	0.52	0.96	0.52	0.81	0.31	0.82	0.32
Côte-Nord B	0.99	0.16	0.99	0.16	0.98	0.22	0.98	0.22	0.9	0.31	0.89	0.31	1.07	0.4	1.07	0.4
Côte-Nord C	0.89	0.34	0.89	0.35	0.89	0.24	0.88	0.24	0.91	0.43	0.91	0.43	0.94	0.4	0.94	0.4
Côte-Nord D	0.78	0.2	0.78	0.2	0.85	0.21	0.85	0.21	0.85	0.36	0.85	0.36	0.84	0.35	0.84	0.35
Côte-Nord E	0.75	0.3	0.75	0.29	0.85	0.27	0.85	0.27	0.79	0.47	0.78	0.47	0.86	0.42	0.86	0.41
Gaspésie	0.96	0.31	0.97	0.32	0.91	0.38	0.91	0.38	0.92	0.63	0.92	0.64	0.73	0.4	0.73	0.4
Montérégie	0.93	0.21	0.94	0.21	0.8	0.25	0.8	0.25	0.74	0.36	0.74	0.36	0.66	0.33	0.66	0.33
Outaouais Aval	0.97	0.4	0.98	0.41	0.75	0.37	0.75	0.38	1.21	0.67	1.22	0.69	0.86	0.37	0.86	0.38
Saguenay	1	0.36	1.01	0.37	0.9	0.26	0.9	0.26	0.83	0.4	0.83	0.41	0.77	0.34	0.77	0.34
St Laurent Nord-Ouest	1.06	0.35	1.06	0.35	0.79	0.27	0.8	0.27	1.03	0.43	1.03	0.45	0.56	0.32	0.56	0.32
St Laurent Sud-Ouest	1.02	0.28	1.02	0.27	0.94	0.2	0.94	0.2	0.65	0.26	0.65	0.26	0.61	0.32	0.61	0.33

M : moyenne, E : écart type

Tableau 22 75^{ième} et 90^{ième} percentiles des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 et 50 ans avec la distribution de Gumbel

Région	Printemps								Été							
	RCP4.5				RCP8.5				RCP4.5				RCP8.5			
	20		50		20		50		20		50		20		50	
	75	90	75	90	75	90	75	90	75	90	75	90	75	90	75	90
Abitibi	0.96	1.05	0.96	1.06	0.96	1.07	0.96	1.07	1.11	1.39	1.11	1.39	1.09	1.27	1.09	1.28
Côte-Nord A	1.03	1.13	1.02	1.13	0.98	1.08	0.98	1.08	1.21	1.75	1.21	1.75	1	1.21	1.01	1.22
Côte-Nord B	1.08	1.19	1.08	1.19	1.07	1.26	1.06	1.25	1.06	1.26	1.06	1.26	1.24	1.55	1.25	1.56
Côte-Nord C	0.99	1.16	0.98	1.16	1	1.13	1	1.13	1.06	1.38	1.06	1.39	1.12	1.41	1.12	1.42
Côte-Nord D	0.93	1.02	0.92	1.01	1	1.09	0.99	1.09	1.09	1.32	1.09	1.32	1.04	1.29	1.04	1.29
Côte-Nord E	0.99	1.12	0.98	1.11	1.02	1.17	1.02	1.17	1.15	1.47	1.15	1.47	1.15	1.39	1.15	1.38
Gaspésie	1.07	1.32	1.07	1.33	1	1.27	1.01	1.28	1.15	1.72	1.16	1.73	0.92	1.19	0.93	1.2
Montérégie	1.04	1.17	1.05	1.17	0.9	1.06	0.91	1.07	0.86	1.11	0.86	1.11	0.82	1.07	0.83	1.08
Outaouais Aval	1.13	1.4	1.13	1.41	0.9	1.16	0.9	1.16	1.38	2.1	1.39	2.13	1.02	1.29	1.02	1.29
Saguenay	1.07	1.29	1.08	1.3	1.01	1.18	1.01	1.18	1.02	1.28	1.03	1.29	0.97	1.16	0.97	1.17
St Laurent Nord-Ouest	1.18	1.5	1.19	1.51	0.92	1.1	0.93	1.11	1.14	1.53	1.15	1.55	0.73	1.03	0.73	1.03
St Laurent Sud-Ouest	1.18	1.42	1.18	1.4	1.02	1.13	1.02	1.13	0.85	0.95	0.85	0.95	0.84	1.16	0.84	1.16

Tableau 23 Moyenne et écart type des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 et 50 ans avec la distribution log-normale

Région	Printemps								Été							
	RCP4.5				RCP8.5				RCP4.5				RCP8.5			
	20		50		20		50		20		50		20		50	
	M	E	M	E	M	E	M	E	M	E	M	E	M	E	M	E
Abitibi	0.85	0.23	0.85	0.28	0.88	0.24	0.91	0.29	0.97	0.42	0.97	0.48	0.94	0.4	0.97	0.47
Côte-Nord A	0.87	0.2	0.85	0.23	0.85	0.22	0.84	0.25	1.01	0.68	1.03	0.76	0.86	0.38	0.9	0.44
Côte-Nord B	0.94	0.19	0.93	0.22	0.93	0.26	0.9	0.3	0.88	0.38	0.88	0.44	1.12	0.49	1.17	0.57
Côte-Nord C	0.85	0.47	0.84	0.58	0.86	0.28	0.86	0.32	0.91	0.5	0.92	0.57	0.94	0.46	0.94	0.51
Côte-Nord D	0.77	0.2	0.77	0.23	0.85	0.23	0.86	0.28	0.86	0.41	0.87	0.44	0.83	0.38	0.84	0.41
Côte-Nord E	0.74	0.3	0.76	0.33	0.88	0.32	0.93	0.44	0.77	0.52	0.77	0.54	0.85	0.45	0.85	0.47
Gaspésie	1.07	0.49	1.16	0.66	1.03	0.51	1.12	0.64	0.88	0.74	0.93	0.89	0.71	0.47	0.75	0.56
Montérégie	1.09	0.38	1.2	0.53	0.99	0.41	1.13	0.6	0.68	0.44	0.67	0.49	0.62	0.4	0.63	0.45
Outaouais Aval	1	0.48	1.03	0.56	0.76	0.46	0.78	0.54	1.23	0.78	1.3	0.98	0.86	0.45	0.86	0.52
Saguenay	1.09	0.53	1.15	0.67	0.91	0.35	0.93	0.44	0.83	0.46	0.86	0.53	0.81	0.44	0.85	0.53
St Laurent Nord-Ouest	1.1	0.42	1.14	0.5	0.83	0.36	0.86	0.42	1	0.39	1.02	0.48	0.55	0.35	0.53	0.4
St Laurent Sud-Ouest	1.05	0.35	1.12	0.49	0.98	0.37	1.04	0.56	0.63	0.3	0.62	0.33	0.58	0.44	0.58	0.5

M : moyenne, E : écart type

Tableau 24 75^{ième} et 90^{ième} percentiles des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 et 50 ans avec la distribution log-normale

Région	Printemps								Été							
	RCP4.5				RCP8.5				RCP4.5				RCP8.5			
	20		50		20		50		20		50		20		50	
	75	90	75	90	75	90	75	90	75	90	75	90	75	90	75	90
Abitibi	0.98	1.12	1	1.16	1.02	1.17	1.07	1.25	1.13	1.49	1.14	1.55	1.13	1.39	1.16	1.48
Côte-Nord A	0.99	1.12	0.99	1.13	0.98	1.11	0.99	1.13	1.28	1.99	1.33	2.08	1.09	1.35	1.16	1.48
Côte-Nord B	1.04	1.18	1.04	1.2	1.03	1.23	1.02	1.24	1.09	1.35	1.1	1.42	1.34	1.73	1.41	1.87
Côte-Nord C	0.93	1.15	0.91	1.18	0.98	1.17	0.98	1.22	1.1	1.46	1.12	1.51	1.14	1.47	1.16	1.52
Côte-Nord D	0.89	1.01	0.89	1.04	0.99	1.12	0.99	1.17	1.11	1.38	1.13	1.42	1.04	1.34	1.06	1.38
Côte-Nord E	0.93	1.1	0.93	1.13	1.04	1.22	1.06	1.32	1.14	1.51	1.12	1.52	1.14	1.42	1.14	1.45
Gaspésie	1.27	1.71	1.39	2.01	1.19	1.54	1.33	1.77	1.11	1.79	1.16	2.02	0.94	1.3	1	1.47
Montérégie	1.27	1.57	1.43	1.86	1.16	1.45	1.33	1.76	0.79	1.07	0.78	1.06	0.79	1.15	0.81	1.23
Outaouais Aval	1.2	1.52	1.26	1.62	0.91	1.23	0.94	1.3	1.41	2.17	1.47	2.41	1.04	1.4	1.05	1.47
Saguenay	1.2	1.55	1.26	1.73	1.03	1.26	1.05	1.35	1.06	1.4	1.1	1.51	1.04	1.34	1.09	1.48
St Laurent Nord-Ouest	1.3	1.66	1.38	1.82	1	1.24	1.05	1.34	1.15	1.52	1.18	1.66	0.68	1.06	0.65	1.11
St Laurent Sud-Ouest	1.21	1.48	1.34	1.73	1.11	1.38	1.19	1.59	0.86	1	0.87	1.05	0.71	1.3	0.71	1.4

Tableau 25 Moyenne des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Gumbel

Région	Printemps						Été					
	RCP4.5			RCP8.5			RCP4.5			RCP8.5		
	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500
Abitibi	0.86	0.84	0.85	0.85	0.84	0.84	0.96	0.95	1	0.89	0.95	0.96
Côte-Nord A	0.94	0.95	0.92	0.88	0.88	0.84	0.97	0.99	0.93	0.8	0.88	0.79
Côte-Nord B	1	0.98	0.99	0.98	0.98	0.99	0.91	0.92	0.85	1.07	1.06	1.08
Côte-Nord C	0.92	0.88	0.88	0.94	0.85	0.86	0.89	0.91	0.92	0.95	0.93	0.94
Côte-Nord D	0.78	0.78	0.79	0.85	0.86	0.86	0.91	0.82	0.84	0.8	0.82	0.87
Côte-Nord E	0.75	0.75	0.75	0.84	0.83	0.87	0.8	0.76	0.79	0.86	0.85	0.88
Gaspésie	0.96	0.98	0.96	0.91	0.91	0.89	0.91	0.93	0.93	0.73	0.72	0.72
Montérégie	0.93	0.93	0.93	0.81	0.79	0.78	0.73	0.74	0.75	0.65	0.65	0.69
Outaouais Aval	1	0.95	0.97	0.78	0.73	0.73	1.27	1.15	1.22	0.9	0.83	0.85
Saguenay	1.02	1.02	0.94	0.9	0.91	0.88	0.83	0.85	0.81	0.76	0.77	0.77
St Laurent Nord-Ouest	1.09	1.05	1.03	0.82	0.79	0.77	1.04	1.02	1.03	0.57	0.55	0.56
St Laurent Sud-Ouest	1.04	1.01	1	0.95	0.94	0.92	0.65	0.65	0.64	0.61	0.61	0.62

Tableau 26 75^{ième} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Gumbel

Région	Printemps						Été					
	RCP4.5			RCP8.5			RCP4.5			RCP8.5		
	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500
Abitibi	0.97	0.95	0.96	0.97	0.95	0.95	1.08	1.13	1.19	1.06	1.12	1.11
Côte-Nord A	1.04	1.04	1.01	0.99	1.02	0.95	1.23	1.24	1.19	1.01	1.08	0.97
Côte-Nord B	1.08	1.07	1.1	1.07	1.05	1.08	1.08	1.08	1.04	1.23	1.26	1.26
Côte-Nord C	1.05	0.97	1	1.05	0.99	0.99	1.04	1.07	1.1	1.13	1.12	1.12
Côte-Nord D	0.93	0.93	0.94	1.01	1	1	1.16	1.08	1.05	1.04	1.01	1.07
Côte-Nord E	0.98	0.98	1	1.02	1.01	1.05	1.15	1.13	1.19	1.14	1.14	1.19
Gaspésie	1.08	1.07	1.08	1.01	1	1.01	1.12	1.21	1.25	0.93	0.93	0.92
Montérégie	1.05	1.04	1.04	0.92	0.89	0.88	0.87	0.85	0.9	0.81	0.83	0.86
Outaouais Aval	1.2	1.1	1.13	0.93	0.9	0.91	1.55	1.27	1.44	1.06	1	1.04
Saguenay	1.1	1.1	1.03	1.02	1.02	0.99	1.03	1.07	0.99	0.97	0.98	0.95
St Laurent Nord-Ouest	1.22	1.18	1.16	0.96	0.91	0.9	1.16	1.14	1.15	0.74	0.71	0.74
St Laurent Sud-Ouest	1.21	1.16	1.16	1.03	1.03	1.01	0.85	0.85	0.84	0.83	0.85	0.85

Tableau 27 90^{ème} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Gumbel

Région	Printemps						Été					
	RCP4.5			RCP8.5			RCP4.5			RCP8.5		
	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500
Abitibi	1.08	1.04	1.05	1.09	1.06	1.06	1.41	1.37	1.41	1.24	1.3	1.29
Côte-Nord A	1.15	1.13	1.12	1.09	1.12	1.06	1.79	1.89	1.65	1.23	1.32	1.15
Côte-Nord B	1.19	1.19	1.21	1.23	1.21	1.33	1.29	1.3	1.21	1.56	1.54	1.55
Côte-Nord C	1.21	1.14	1.19	1.2	1.11	1.1	1.32	1.37	1.44	1.45	1.41	1.4
Côte-Nord D	1.03	1.03	1.02	1.1	1.09	1.1	1.37	1.31	1.33	1.31	1.3	1.28
Côte-Nord E	1.13	1.1	1.15	1.16	1.13	1.22	1.48	1.46	1.5	1.4	1.4	1.4
Gaspésie	1.31	1.34	1.35	1.28	1.28	1.26	1.69	1.76	1.78	1.21	1.2	1.17
Montérégie	1.19	1.16	1.15	1.08	1.05	1.03	1.08	1.12	1.22	1.07	1.07	1.11
Outaouais Aval	1.54	1.35	1.37	1.26	1.11	1.16	2.38	1.81	2.11	1.38	1.22	1.31
Saguenay	1.36	1.32	1.19	1.21	1.18	1.12	1.29	1.36	1.25	1.18	1.19	1.14
St Laurent Nord-Ouest	1.59	1.49	1.45	1.17	1.09	1.04	1.55	1.53	1.52	1.03	1.02	1.04
St Laurent Sud-Ouest	1.45	1.41	1.4	1.15	1.13	1.12	0.96	0.97	0.95	1.17	1.14	1.13

Tableau 28 Moyenne des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution log-normale

Région	Printemps						Été					
	RCP4.5			RCP8.5			RCP4.5			RCP8.5		
	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500
Abitibi	0.86	0.83	0.85	0.88	0.88	0.88	0.96	0.95	1	0.9	0.97	1
Côte-Nord A	0.88	0.88	0.86	0.87	0.87	0.82	1.02	1.08	0.97	0.84	0.93	0.84
Côte-Nord B	0.95	0.94	0.94	0.92	0.93	0.94	0.89	0.92	0.83	1.13	1.11	1.13
Côte-Nord C	0.87	0.84	0.83	0.92	0.82	0.84	0.89	0.91	0.93	0.93	0.93	0.94
Côte-Nord D	0.76	0.8	0.75	0.87	0.87	0.83	0.93	0.82	0.85	0.79	0.8	0.88
Côte-Nord E	0.74	0.75	0.74	0.88	0.88	0.9	0.78	0.76	0.78	0.84	0.83	0.88
Gaspésie	1.07	1.08	1.04	1.04	1.03	0.98	0.86	0.9	0.91	0.7	0.71	0.74
Montérégie	1.08	1.12	1.07	1.02	0.99	0.93	0.67	0.68	0.7	0.6	0.61	0.66
Outaouais Aval	1.03	0.98	0.99	0.79	0.73	0.75	1.28	1.17	1.24	0.91	0.83	0.86
Saguenay	1.12	1.11	0.99	0.92	0.93	0.86	0.83	0.86	0.81	0.8	0.82	0.82
St Laurent Nord-Ouest	1.14	1.09	1.06	0.86	0.82	0.79	1	0.99	1	0.55	0.54	0.55
St Laurent Sud-Ouest	1.08	1.04	1.03	0.99	0.98	0.94	0.62	0.63	0.63	0.57	0.57	0.58

Tableau 29 75^{ième} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution log-normale

Région	Printemps						Été					
	RCP4.5			RCP8.5			RCP4.5			RCP8.5		
	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500
Abitibi	1.01	0.96	0.98	1.02	1.01	1.02	1.08	1.14	1.22	1.09	1.16	1.17
Côte-Nord A	1.01	1.01	0.97	1	1.03	0.95	1.31	1.34	1.25	1.1	1.18	1.05
Côte-Nord B	1.06	1.03	1.04	1.03	1.03	1.05	1.11	1.13	1.03	1.34	1.36	1.35
Côte-Nord C	1.02	0.89	0.96	1.05	0.96	0.97	1.08	1.1	1.15	1.14	1.14	1.15
Côte-Nord D	0.89	0.94	0.87	1.02	1.01	0.97	1.2	1.1	1.06	1.03	1.01	1.09
Côte-Nord E	0.93	0.94	0.94	1.04	1.04	1.06	1.14	1.14	1.16	1.12	1.13	1.18
Gaspésie	1.3	1.25	1.24	1.22	1.19	1.16	1.07	1.16	1.19	0.92	0.95	0.99
Montérégie	1.28	1.31	1.24	1.21	1.17	1.09	0.79	0.78	0.84	0.77	0.79	0.86
Outaouais Aval	1.28	1.19	1.21	0.94	0.91	0.94	1.55	1.32	1.48	1.09	1.01	1.07
Saguenay	1.24	1.23	1.13	1.05	1.04	1	1.07	1.1	1.02	1.03	1.08	1.04
St Laurent Nord-Ouest	1.32	1.31	1.28	1.04	0.99	0.96	1.17	1.14	1.15	0.69	0.65	0.7
St Laurent Sud-Ouest	1.24	1.21	1.2	1.13	1.13	1.09	0.85	0.87	0.86	0.7	0.73	0.74

Tableau 30 90^{ème} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 20 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution log-normale

Région	Printemps						Été					
	RCP4.5			RCP8.5			RCP4.5			RCP8.5		
	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500
Abitibi	1.16	1.09	1.1	1.19	1.16	1.16	1.51	1.46	1.53	1.35	1.44	1.42
Côte-Nord A	1.15	1.12	1.1	1.14	1.15	1.07	2.09	2.3	1.81	1.37	1.47	1.29
Côte-Nord B	1.21	1.17	1.16	1.21	1.21	1.28	1.36	1.44	1.29	1.74	1.73	1.73
Côte-Nord C	1.21	1.14	1.19	1.28	1.13	1.12	1.41	1.46	1.53	1.49	1.47	1.48
Côte-Nord D	1.04	1.06	0.97	1.17	1.14	1.09	1.44	1.37	1.39	1.34	1.37	1.35
Côte-Nord E	1.1	1.12	1.11	1.24	1.22	1.23	1.51	1.54	1.52	1.42	1.44	1.43
Gaspésie	1.74	1.76	1.62	1.58	1.54	1.47	1.72	1.81	1.92	1.29	1.31	1.31
Montérégie	1.59	1.62	1.45	1.53	1.45	1.31	1.02	1.07	1.19	1.12	1.15	1.21
Outaouais Aval	1.65	1.47	1.49	1.33	1.18	1.26	2.4	1.86	2.2	1.53	1.3	1.4
Saguenay	1.69	1.59	1.38	1.32	1.29	1.16	1.4	1.5	1.35	1.36	1.39	1.3
St Laurent Nord-Ouest	1.76	1.65	1.6	1.33	1.23	1.17	1.56	1.51	1.52	1.07	1.05	1.08
St Laurent Sud-Ouest	1.53	1.49	1.44	1.42	1.38	1.34	1.01	1.02	1	1.33	1.28	1.26

Tableau 31 Moyenne des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 50 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Gumbel

Région	Printemps						Été					
	RCP4.5			RCP8.5			RCP4.5			RCP8.5		
	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500
Abitibi	0.86	0.84	0.85	0.85	0.84	0.84	0.95	0.95	1	0.89	0.95	0.96
Côte-Nord A	0.93	0.94	0.91	0.88	0.88	0.84	0.97	0.99	0.93	0.81	0.88	0.79
Côte-Nord B	0.99	0.98	0.99	0.98	0.97	0.99	0.91	0.92	0.85	1.07	1.06	1.09
Côte-Nord C	0.92	0.87	0.88	0.94	0.85	0.86	0.89	0.91	0.92	0.95	0.93	0.94
Côte-Nord D	0.77	0.78	0.79	0.85	0.86	0.85	0.91	0.82	0.84	0.8	0.82	0.87
Côte-Nord E	0.75	0.75	0.75	0.84	0.83	0.87	0.8	0.76	0.79	0.86	0.85	0.88
Gaspésie	0.96	0.98	0.96	0.91	0.92	0.89	0.91	0.93	0.93	0.73	0.73	0.73
Montérégie	0.94	0.94	0.94	0.82	0.79	0.79	0.74	0.74	0.75	0.65	0.65	0.69
Outaouais Aval	1.01	0.96	0.97	0.79	0.73	0.74	1.28	1.16	1.23	0.9	0.83	0.85
Saguenay	1.03	1.03	0.94	0.9	0.91	0.88	0.83	0.86	0.81	0.77	0.78	0.78
St Laurent Nord-Ouest	1.1	1.05	1.04	0.83	0.79	0.77	1.05	1.02	1.03	0.57	0.55	0.55
St Laurent Sud-Ouest	1.04	1.01	1	0.96	0.94	0.92	0.65	0.65	0.64	0.61	0.61	0.62

Tableau 32 75^{ème} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 50 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Gumbel

Région	Printemps						Été					
	RCP4.5			RCP8.5			RCP4.5			RCP8.5		
	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500
Abitibi	0.97	0.95	0.96	0.97	0.95	0.95	1.07	1.13	1.19	1.07	1.12	1.12
Côte-Nord A	1.04	1.03	1.01	0.99	1.02	0.95	1.24	1.24	1.19	1.02	1.09	0.98
Côte-Nord B	1.07	1.06	1.09	1.06	1.05	1.08	1.08	1.08	1.04	1.23	1.26	1.26
Côte-Nord C	1.05	0.96	1	1.05	0.99	0.99	1.04	1.07	1.11	1.13	1.12	1.12
Côte-Nord D	0.92	0.92	0.93	1	1	0.99	1.16	1.08	1.05	1.04	1.01	1.07
Côte-Nord E	0.98	0.98	1	1.02	1.01	1.05	1.15	1.13	1.19	1.13	1.14	1.18
Gaspésie	1.08	1.07	1.09	1.02	1.01	1.01	1.13	1.22	1.25	0.93	0.94	0.93
Montérégie	1.06	1.05	1.04	0.93	0.9	0.89	0.87	0.85	0.9	0.81	0.83	0.86
Outaouais Aval	1.2	1.11	1.14	0.93	0.9	0.91	1.55	1.28	1.46	1.06	1	1.04
Saguenay	1.1	1.1	1.03	1.02	1.02	0.99	1.03	1.08	1	0.98	0.99	0.96
St Laurent Nord-Ouest	1.23	1.19	1.17	0.96	0.92	0.9	1.16	1.15	1.16	0.74	0.71	0.74
St Laurent Sud-Ouest	1.21	1.16	1.16	1.03	1.03	1.02	0.85	0.85	0.84	0.84	0.85	0.85

Tableau 33 90^{ème} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 50 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution de Gumbel

Région	Printemps						Été					
	RCP4.5			RCP8.5			RCP4.5			RCP8.5		
	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500
Abitibi	1.08	1.04	1.05	1.09	1.06	1.06	1.41	1.37	1.42	1.25	1.31	1.3
Côte-Nord A	1.14	1.12	1.12	1.09	1.12	1.06	1.79	1.88	1.65	1.24	1.34	1.16
Côte-Nord B	1.19	1.18	1.2	1.22	1.21	1.31	1.3	1.3	1.21	1.57	1.55	1.56
Côte-Nord C	1.2	1.14	1.19	1.2	1.11	1.1	1.32	1.38	1.44	1.45	1.41	1.41
Côte-Nord D	1.02	1.03	1.02	1.1	1.09	1.1	1.37	1.32	1.33	1.31	1.3	1.29
Côte-Nord E	1.13	1.1	1.14	1.16	1.13	1.21	1.48	1.46	1.49	1.39	1.39	1.4
Gaspésie	1.31	1.35	1.35	1.29	1.29	1.26	1.7	1.77	1.79	1.22	1.2	1.18
Montérégie	1.2	1.17	1.16	1.09	1.06	1.04	1.08	1.12	1.22	1.08	1.07	1.11
Outaouais Aval	1.55	1.36	1.38	1.26	1.11	1.17	2.42	1.84	2.14	1.38	1.22	1.31
Saguenay	1.37	1.34	1.2	1.22	1.19	1.12	1.3	1.37	1.26	1.18	1.2	1.15
St Laurent Nord-Ouest	1.6	1.5	1.46	1.18	1.1	1.05	1.57	1.55	1.54	1.04	1.03	1.04
St Laurent Sud-Ouest	1.43	1.39	1.38	1.16	1.13	1.12	0.96	0.97	0.95	1.17	1.15	1.14

Tableau 34 Moyenne des facteurs acteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 50 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution log-normale

Région	Printemps						Été					
	RCP4.5			RCP8.5			RCP4.5			RCP8.5		
	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500
Abitibi	0.87	0.83	0.85	0.91	0.91	0.91	0.96	0.95	1.01	0.91	1.00	1.03
Côte-Nord A	0.87	0.86	0.84	0.87	0.87	0.81	1.04	1.10	0.99	0.88	0.99	0.87
Côte-Nord B	0.93	0.93	0.92	0.89	0.91	0.91	0.89	0.93	0.82	1.17	1.15	1.17
Côte-Nord C	0.87	0.84	0.81	0.93	0.82	0.83	0.9	0.92	0.94	0.94	0.94	0.95
Côte-Nord D	0.76	0.82	0.73	0.89	0.89	0.82	0.94	0.83	0.86	0.78	0.8	0.89
Côte-Nord E	0.75	0.78	0.75	0.92	0.94	0.93	0.77	0.75	0.78	0.84	0.83	0.88
Gaspésie	1.17	1.17	1.11	1.15	1.12	1.05	0.9	0.95	0.95	0.73	0.75	0.78
Montérégie	1.19	1.24	1.16	1.18	1.13	1.04	0.67	0.67	0.69	0.61	0.63	0.68
Outaouais Aval	1.07	1.01	1.02	0.82	0.75	0.77	1.37	1.23	1.31	0.91	0.82	0.86
Saguenay	1.19	1.17	1.03	0.95	0.95	0.86	0.86	0.89	0.83	0.83	0.87	0.86
St Laurent Nord-Ouest	1.19	1.13	1.10	0.90	0.86	0.82	1.03	1.01	1.03	0.53	0.52	0.53
St Laurent Sud-Ouest	1.15	1.11	1.08	1.07	1.05	1.00	0.61	0.62	0.62	0.58	0.58	0.59

Tableau 35 75^{ème} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 50 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution log-normale

Région	Printemps						Été					
	RCP4.5			RCP8.5			RCP4.5			RCP8.5		
	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500
Abitibi	1.04	0.97	0.99	1.08	1.07	1.07	1.09	1.15	1.25	1.11	1.2	1.21
Côte-Nord A	1.01	1.01	0.96	1.01	1.03	0.95	1.36	1.4	1.3	1.17	1.27	1.11
Côte-Nord B	1.06	1.03	1.02	1.02	1.02	1.03	1.13	1.16	1.03	1.41	1.43	1.41
Côte-Nord C	1.02	0.87	0.96	1.07	0.96	0.97	1.09	1.12	1.19	1.16	1.16	1.18
Côte-Nord D	0.88	0.97	0.86	1.02	1.01	0.96	1.23	1.12	1.07	1.03	1.01	1.11
Côte-Nord E	0.94	0.97	0.93	1.08	1.06	1.07	1.12	1.12	1.13	1.12	1.13	1.18
Gaspésie	1.43	1.38	1.35	1.38	1.32	1.28	1.11	1.21	1.26	0.97	1.02	1.06
Montérégie	1.44	1.47	1.39	1.39	1.36	1.24	0.78	0.77	0.84	0.79	0.81	0.88
Outaouais Aval	1.33	1.25	1.27	0.98	0.94	0.97	1.63	1.37	1.56	1.1	1.02	1.08
Saguenay	1.31	1.29	1.18	1.08	1.06	1	1.12	1.15	1.06	1.08	1.14	1.09
St Laurent Nord-Ouest	1.41	1.39	1.35	1.1	1.05	1.01	1.2	1.17	1.19	0.66	0.63	0.68
St Laurent Sud-Ouest	1.38	1.35	1.32	1.22	1.21	1.16	0.87	0.89	0.88	0.69	0.73	0.74

Tableau 36 90^{ème} percentile des facteurs de majoration pour les crues maximales de période de retour de 50 ans pour différentes classes de bassins versants avec la distribution log-normale

Région	Printemps						Été					
	RCP4.5			RCP8.5			RCP4.5			RCP8.5		
	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500	25 -100	100 -300	300 -500
Abitibi	1.22	1.12	1.13	1.28	1.24	1.24	1.58	1.51	1.6	1.42	1.53	1.54
Côte-Nord A	1.17	1.15	1.1	1.18	1.18	1.08	2.2	2.37	1.91	1.51	1.61	1.41
Côte-Nord B	1.23	1.18	1.16	1.23	1.23	1.28	1.42	1.54	1.34	1.88	1.86	1.88
Côte-Nord C	1.26	1.16	1.22	1.36	1.17	1.15	1.45	1.52	1.59	1.53	1.52	1.54
Côte-Nord D	1.06	1.16	0.98	1.22	1.21	1.12	1.49	1.41	1.44	1.36	1.41	1.4
Côte-Nord E	1.13	1.2	1.11	1.35	1.35	1.31	1.53	1.56	1.52	1.44	1.48	1.47
Gaspésie	2.06	2.05	1.82	1.84	1.76	1.64	1.93	2.06	2.15	1.46	1.48	1.49
Montérégie	1.87	1.95	1.69	1.87	1.78	1.54	1.03	1.06	1.21	1.18	1.25	1.28
Outaouais Aval	1.78	1.58	1.58	1.42	1.24	1.32	2.71	2.03	2.44	1.61	1.36	1.48
Saguenay	1.91	1.76	1.5	1.44	1.38	1.2	1.53	1.63	1.44	1.49	1.54	1.43
St Laurent Nord-Ouest	1.96	1.81	1.74	1.44	1.33	1.25	1.69	1.65	1.64	1.12	1.1	1.13
St Laurent Sud-Ouest	1.78	1.75	1.67	1.66	1.61	1.51	1.06	1.08	1.06	1.45	1.38	1.35

**ANNEXE 3 : Variation géographique de la moyenne des facteurs
de majoration avec la distribution Fréchet**

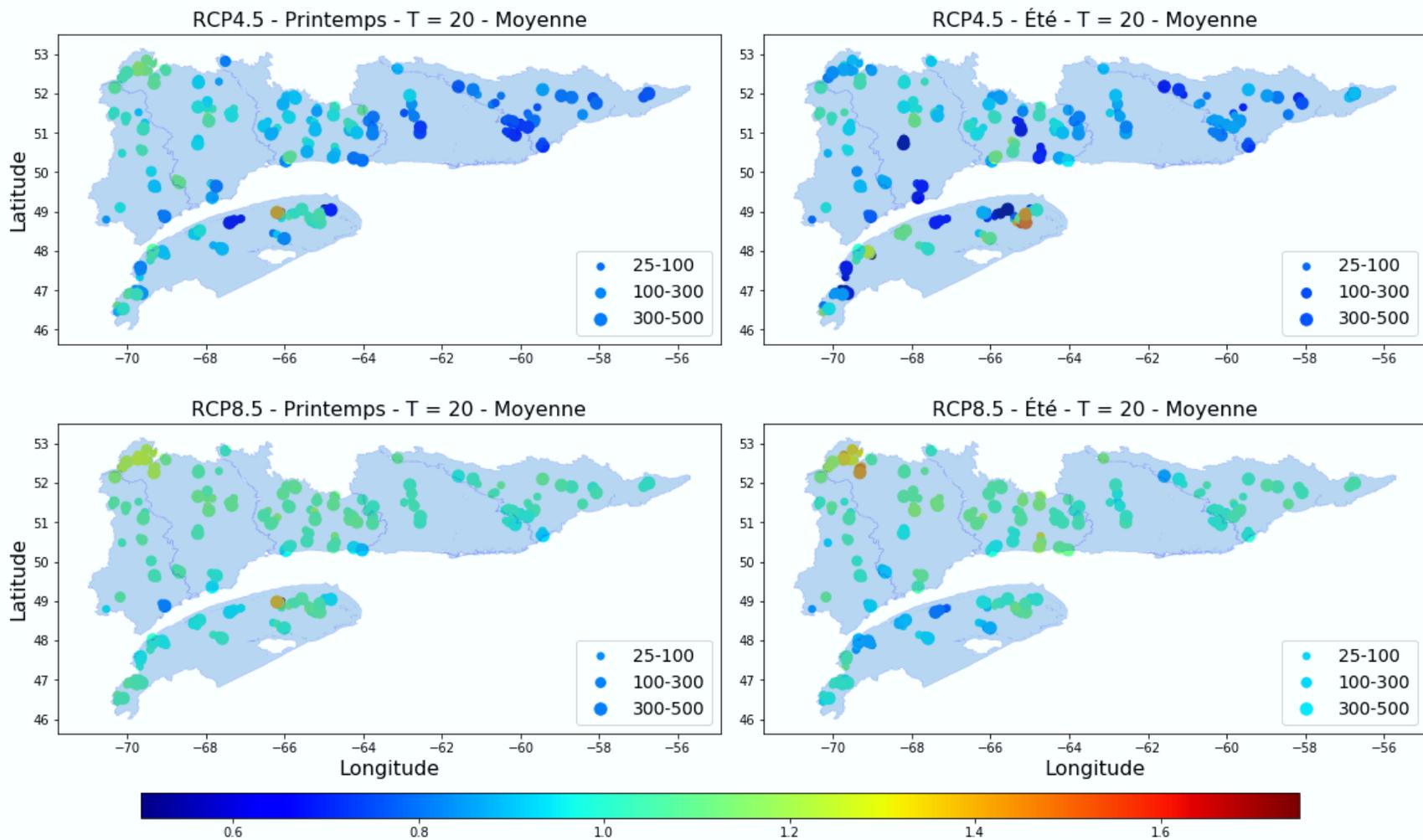


Figure 28 Facteurs de majoration (moyenne) pour les régions hydroclimatiques situées au sud-est du Québec pour une de période de retour de 20 ans au printemps et en été

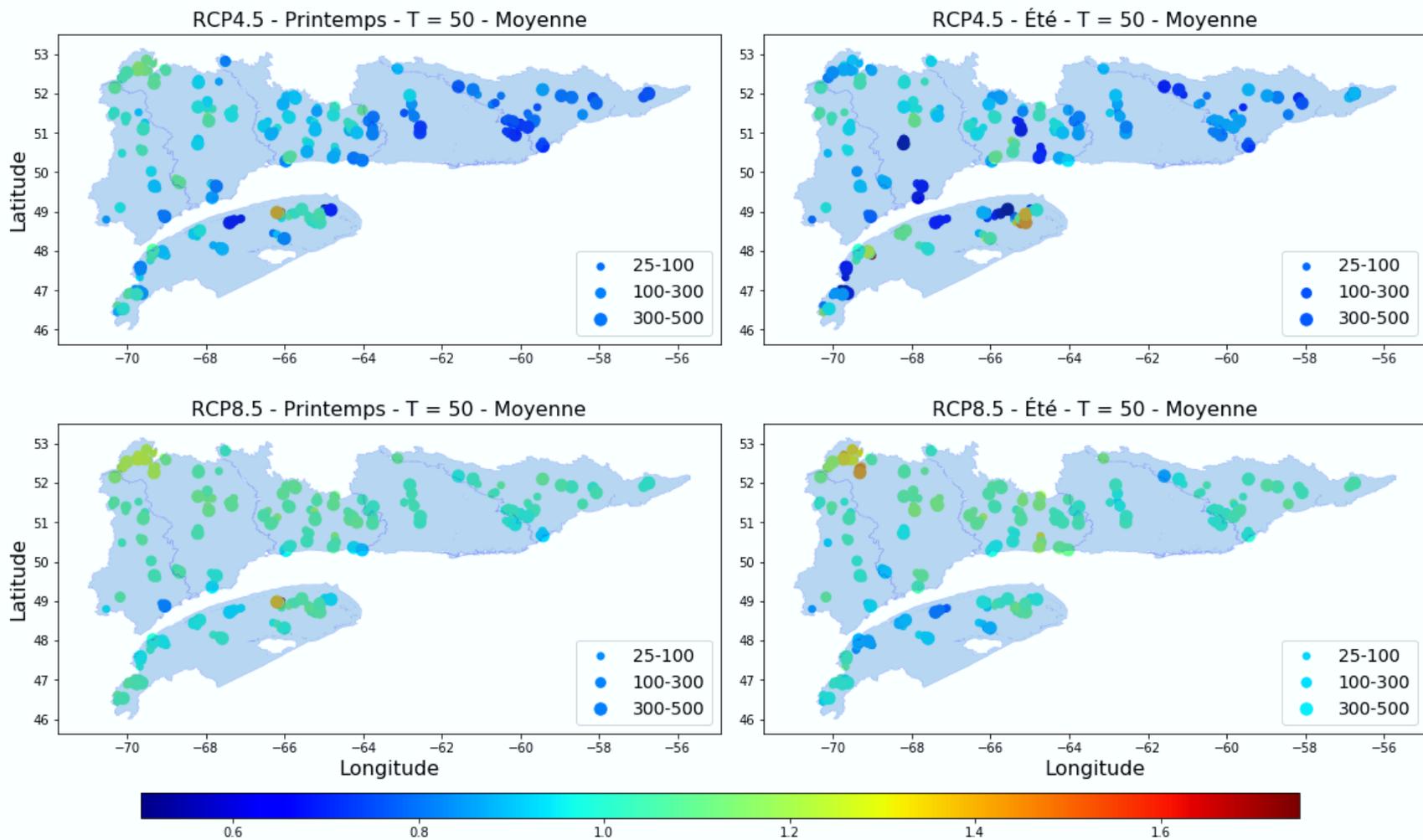


Figure 29 Facteurs de majoration (moyenne) pour les régions hydroclimatiques situées au sud-est du Québec pour une de période de retour de 50 ans au printemps et en été

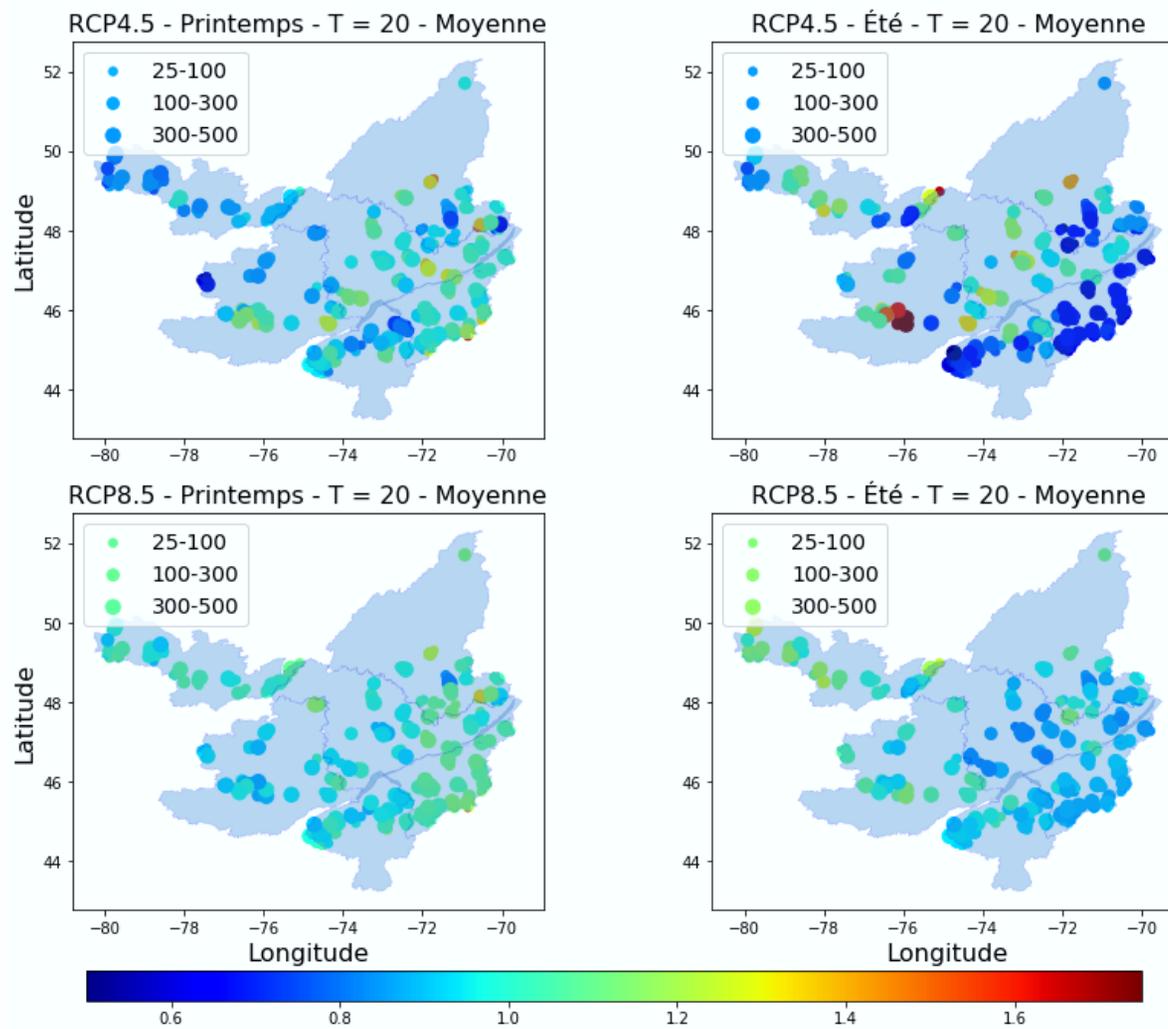


Figure 30 Facteurs de majoration (moyenne) pour les régions hydroclimatiques situées au sud-ouest du Québec pour une de période de retour de 20 ans au printemps et en été

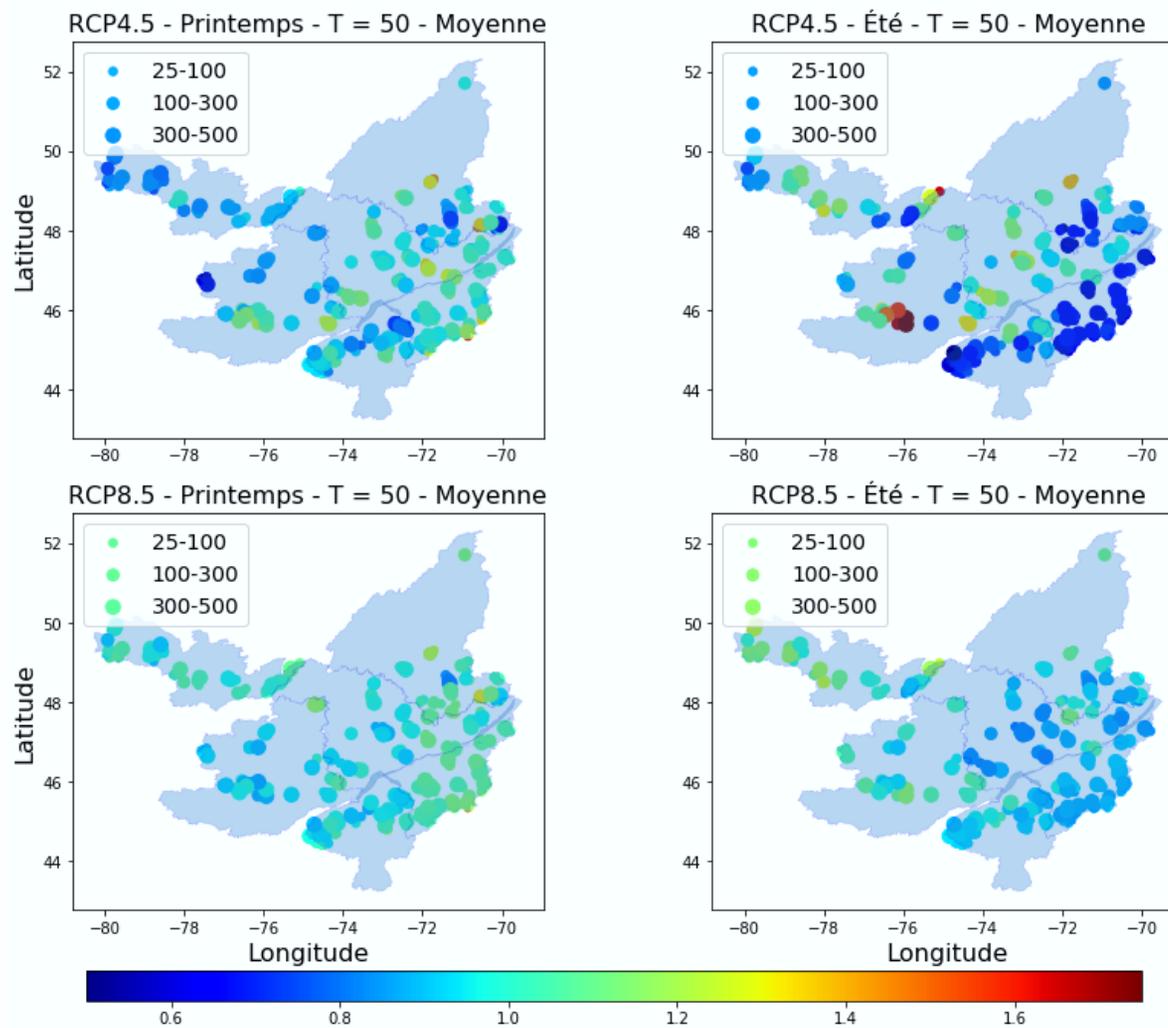


Figure 31 Facteurs de majoration (moyenne) pour les régions hydroclimatiques situées au sud-ouest du Québec pour une de période de retour de 50 ans au printemps et en été