

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE EAU TERRE ENVIRONNEMENT

ESTIMATION DES DÉBITS DE CRUES DE PETITS BASSINS
VERSANTS DANS LE CADRE DU PROJET INFO-CRUE

PAR
Alain MAILHOT
Samuel BOLDUC
Guillaume TALBOT

RAPPORT FINAL RÉVISÉ

AOÛT 2023

*Environnement
et Lutte contre
les changements
climatiques*

Québec



**IN
RS**

Institut national
de la recherche
scientifique

© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2023
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-978-4 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2023
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2023

TABLE DES MATIÈRES

Liste des figures	vii
Liste des tableaux	xvii
Liste des abréviations	xxi
Remerciements	xxiii
Chapitre 1. Introduction	1
Chapitre 2. Estimation des débits de crues de bv non jaugés	5
2.1 Méthodes empiriques	5
2.1.1 Méthode rationnelle	6
2.1.2 Interprétation simple de la méthode rationnelle	7
2.1.3 Version de la méthode rationnelle proposée par Mailhot et al. (2021)	9
2.1.4 Autres versions de la MÉRA	10
2.1.5 Méthode de Caquot	13
2.2 Analyse fréquentielle régionale des crues (Regional flood-frequency analysis)	15
2.2.1 Indice de crue	16
2.2.2 Régression	16
2.2.3 Géostatistiques	17
2.2.4 Étude de Salinas et al. (2013)	18
2.3 Modélisation hydrologique	18
2.3.1 Avantages et limites des modèles hydrologiques parcimonieux	19
2.3.2 Sélection du modèle hydrologique parcimonieux	20
2.4 Plateforme INFO-Crue et Atlas hydroclimatique	21
2.5 Analyse critique des méthodes répertoriées et méthodes retenues	23
2.5.1 Méthodes empiriques de type méthode rationnelle	24
2.5.2 Analyse fréquentielle régionale des crues	25
2.5.3 Modélisation hydrologique	26
Chapitre 3. Bassins versants à l'étude	29
3.1 Groupe A (Québec)	30
3.2 Groupe B (Québec)	31

3.3 Groupe C (Québec)	31
3.4 Groupe D (Nouveau-Brunswick)	32
3.5 Groupe E (États-Unis)	33
3.6 Groupe F (Ontario)	34
3.7 Groupe G (Urbain)	35
Chapitre 4. Estimation des quantiles des débits de crues	37
4.1 Considérations préliminaires	37
4.2 Analyses préliminaires des séries de débits disponibles aux stations	38
4.3 Analyse de tendances des DMA	41
4.4 Mois d'occurrence des DMA	48
4.5 Estimation des quantiles de débits de crues aux stations	51
Chapitre 5. Application de la méthode rationnelle	55
5.1 Coefficient de ruissellement	55
5.2 Temps de concentration	56
5.3 Intensité des précipitations	57
Chapitre 6. Application du modèle hydrologique parcimonieux	59
6.1 Description du modèle GR5H	59
6.2 Données météorologiques utilisées	60
6.3 Calage du modèle hydrologique	60
Chapitre 7. DMA en climat de référence	69
7.1 Considérations générales	69
7.2 MÉRA vs séries observées	70
7.2.1 Performance de la MÉRA aux BV sous étude	70
7.2.2 Performance de la MÉRA pour les bassins versants urbanisés	90
7.2.3 Performance générale de la MÉRA	95
7.3 Comparaison de la MÉRA à INFO-Crue	95
7.4 Comparaison de la MÉRA, du modèle hydrologique parcimonieux et d'INFO-Crue aux valeurs observées	99

7.5 Synthèse et conclusion	102
Chapitre 8. Évolution des DMA en climat futur	105
8.1 Considérations générales sur les crues au Québec	105
8.2 Projections futures des DMA basées sur l'approche MÉRA	106
8.3 Projections futures des DMA selon l'Atlas hydroclimatique	107
8.3.1 Méthode utilisée pour l'analyse des séries de l'Atlas hydroclimatique	108
8.3.2 Évolution future de saisonnalité des DMA	109
8.3.3 Évolution future des débits de crue	114
8.3.4 Portait global et régional de l'évolution future des débits de crue	127
8.4 Comparaison des projections de pluies extrêmes et de l'Atlas Hydroclimatique	128
Chapitre 9. Conclusion et recommandations	131
Bibliographie	139
Annexe A. Information générale sur les stations hydrométriques	147
Annexe B. Couverture temporelle des données hydrométriques aux stations sous étude	157
Annexe C – Distributions Generalized Extreme Value (GEV) et Gumbel	161
Annexe D. Quantiles de débit et paramètres de la distribution GEV	165
Annexe E. Processus de caractérisation des bassins-versants	171
E.1 Superficie	174
E.2 Pente moyenne du BV	174
E.3 Longueur du cours d'eau principal	176
E.4 Pente moyenne du cours d'eau	176
E.5 Occupation du territoire	176
Annexe F. Caractéristiques physiographiques des bassins versants	177
Annexe G. Station météorologiques associée aux bassins versants à l'étude	187
Annexe H. Figures du Chapitre 7 pour les périodes de retour 5, 10, 25 et 50 ans	195

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Interprétation simple de la méthode rationnelle	9
Figure 2.2 - Fonction de répartition des rapports entre quantiles de PdR 25 ans estimés à partir de la MÉRA et quantiles estimés à partir des séries observées (Quantile MÉRA/Quantile observé) aux 93 BV sous étude (Mailhot et al. 2021). Les points correspondent aux valeurs observées alors que la courbe continue correspond à la distribution Log-normale ($\mu = 0.205$; $\sigma = 0.572$).	11
Figure 3.1 – Localisation des stations des BV des Groupes A et B (Québec).....	31
Figure 3.2 – Localisation des tronçons à l'exutoire des BV du Groupe C (Québec).....	32
Figure 3.3 - Localisation des stations du Groupe D (Nouveau-Brunswick).	33
Figure 3.4 - Localisation des stations du Groupe E (États-Unis).....	34
Figure 3.5 - Localisation des stations du Groupe F (Ontario).....	35
Figure 3.6 - Localisation des stations du Groupe G (Ontario et États-Unis).	36
Figure 4.1 - Périodes couvertes par les données hydrométriques aux stations sous étude. Les stations sont ordonnées en fonction de leur date de mise en opération. Les zones en blanc correspondent aux périodes où les données sont manquantes. Le code de couleur identifie les périodes suivantes de l'année : 1) décembre-janvier-février (en marron); 2) mars-avril mai (en bleu); 3) juin à novembre (en rouge) et la période de simulation INFO-Crue (en gris).	39
Figure 4.2 - Distributions des fractions moyennes de données disponibles aux stations pour chaque mois de l'année.	40
Figure 4.3 – Occupation urbaine (%) pour le BV 02EC009 (Ontario) entre 1984 et 2019. Les zones jaunes délimitent les principales zones urbaines et la ligne blanche délimite le bassin versant.....	45
Figure 4.4 – Série des débits maxima annuels pour le BV 02EC009 (Ontario).	46
Figure 4.5 - Série des débits maxima annuels pour le BV 02HC030 (Ontario).....	46
Figure 4.6 - Occupation urbaine (%) pour le bassin versant 02HC030 (Ontario) entre 1984 et 2019. Les zones jaunes délimitent les principales zones urbaines en 1984 et la ligne blanche délimite le bassin versant. À noter qu'en 2019 le bassin versant est presque entièrement urbain à l'exception d'une zone en amont.....	47
Figure 4.7 - Fréquence mensuelle d'occurrence des DMA aux 114 stations avec moins de 20% de données manquantes sur la période de janvier à décembre et plus de 4 années valides.....	49

Figure 4.8 - Histogramme des probabilités d'occurrence des DMA durant les mois de juin à novembre aux stations. La valeur moyenne aux stations est représentée par le trait en tiret rouge.	49
Figure 4.9 - Fréquence mensuelle d'occurrence des DMA aux 44 stations avec 15 années ou plus valides et situées à l'exutoire de BV de moins de 50 km ² et aux 42 BV d'INFO-Crue prioritaires (Groupe C).	50
Figure 4.10 - Histogramme du nombre d'années disponibles aux stations retenues (moins de 20% de données manquantes sur la période de juin à novembre et plus de 15 années valides).....	52
Figure 4.11 - Diagramme des L-moments $\tau_3 - \tau_4$ aux stations retenues (moins de 20% de données manquantes sur la période de juin à novembre et plus de 15 années valides). Les points bleus correspondent aux valeurs calculées aux stations retenues et les points noirs aux BV INFO-crue. Les lignes en tirets correspondent aux valeurs moyennes de τ_3 (en rouge) et de τ_4 (en noir) aux stations ($\tau_3 = 0.313$; $\tau_4 = 0.211$) et les lignes en pointillées aux valeurs correspondantes pour les BV INFO-crue ($\tau_3 = 0.173$; $\tau_4 = 0.124$). Les distributions représentées sont : GEV : Generalized Extreme Value ; GPA : Generalized Pareto ; LN3 : Log-normale à 3 paramètres; GLO : Generalized Logistic.	53
Figure 4.12 - Histogramme des valeurs du paramètre de forme k de la distribution GEV ajustée aux DMA (juin-novembre) aux BV retenus (moins de 20% de données manquantes sur la période de juin à novembre et plus de 15 années valides). Le trait en tiret vertical correspond à la valeur moyenne de ce paramètre aux BV retenus ($k_{\text{moyen}} = -0.204$). À noter que selon la paramétrisation de la GEV utilisée, une valeur négative du paramètre de forme correspond à une distribution positive non bornée (heavy tailed).....	54
Figure 5.1 – Arbre (ou clef dichotomique) pour l'estimation du temps de concentration des bassins versants à l'étude.	56
Figure 6.1 - Histogramme du NSE total (lorsque toutes les années sont considérées pour le calage) pour les différents BV.	63
Figure 6.2 - Débits observés et simulés à la station 023002 (Boyer Sud) lors des années 2016 (graphique du haut) et 2008 (graphique du bas). Les précipitations totales (en mm) au pas de temps 3 heures sont présentées dans le haut du graphique et réfèrent à l'axe des ordonnées à droite.	65

Figure 6.3 - Débits observés et simulés à la station Tirasse lors des années 2004 (graphique du haut) et 2017 (graphique du bas). Les précipitations totales (en mm) au pas de temps 3 heures sont présentées dans le haut du graphique et réfèrent à l'axe des ordonnées à droite.	66
Figure 7.1 – Coefficient de détermination (R^2) des régressions linéaires entre l'intensité de la précipitation (I_P), le coefficient de ruissellement (CR) et la superficie (A) et les quantiles DMA observés de périodes de retour 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100 et 350 ans.	72
Figure 7.2 – Coefficient de détermination (R^2) des régressions linéaires entre la pente moyenne du BV (S_B), l'intensité de la précipitation (I_P) et le coefficient de ruissellement (CR) et les quantiles DMA observés spécifiques de périodes de retour 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100 et 350 ans.	72
Figure 7.3 – Fonction de répartition des rapports entre quantiles DMA estimés par la MÉRA et quantiles DMA estimés à partir des séries de débits observés $FT(MÉRA)$ (MÉRA/Obs.) pour les PdR 2, 20 et 350 ans aux 111 BV sous étude.....	75
Figure 7.4 – Fonction de répartition des rapports entre quantiles DMA estimés par la MÉRA et quantiles DMA estimés à partir des séries de débits observés $FT(MÉRA)$ (MÉRA/Obs.) pour la PdR 20 aux 111 BV sous étude avant (courbe noire) et après application du facteur de correction (Tableau 7.1). Les lignes en tirets verticales délimitent les intervalles entre le 10 ^e et le 90 ^e percentiles avant (noirs) et après correction (rouges).....	76
Figure 7.5 - Comparaison des DMA spécifiques observés et estimés avec la MÉRA après application des facteurs de corrections (Tableau 7.1) pour les BV du Québec (Qc, Groupes A et B), du Nouveau-Brunswick (N-B, Groupe D), des États-Unis (É-U, Groupe E), de l'Ontario (Ont, Groupe F) et les BV urbains (Groupe G) pour les PdR : a) 2 ans; b) 20 ans; c) 100 ans; d) 350 ans. Les marqueurs entourés d'un trait noir indiquent que le débit MÉRA est à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95 % du quantile de débit observé.....	78
Figure 7.6 – Séries des DMA (juin à novembre) à la station NY 01349811 (état de New York aux États-Unis).....	80
Figure 7.7 - Distribution des rapports entre quantiles DMA estimés à partir de la MÉRA et des quantiles correspondant estimés à partir des séries observées $FT(MÉRA)$ (MÉRA/observé) pour l'ensemble des BV (Tout) et les BV du Québec (Qc, Groupes A et B), du Nouveau-Brunswick (N.-B., Groupe D), des États-Unis (É-U, Groupe E), de l'Ontario (Ont, Groupe F) et les BV urbains (Urbain, Groupe G) pour	

les PdR : a) 2 ans, b) 20 ans, (c) 100 ans, (d) 350 ans. Les chiffres sur l'axe des ordonnées à droite correspondent aux nombres de BV pour lesquels les DMA de la MÉRA se trouve à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95 % des quantiles observés (numérateur) et au nombre total de BV considéré (dénominateur). La ligne bleue pointillée verticale correspond à la valeur MÉRA/observé = 1. Le trait rouge à l'intérieur des boxplots représente la médiane (2^e quartile), les limites des boîtes représentent les 1^{er} et 3^e quartiles, la moustache supérieure correspond à [3^e quartile + 1.5 (3^e quartile - 1^{er} quartile)] et la moustache inférieure au 3^e quartile - 1.5 (3^e quartile - 1^{er} quartile), les croix bleues présentent les valeurs supérieures à [3^e quartile + 1.5 (3^e quartile - 1^{er} quartile)].82

Figure 7.8 – Rapports des DMA estimés à partir de la MÉRA et des quantiles correspondant estimés à partir des données observées (MÉRA/observé) en fonction du débit spécifique observé pour les BV du Québec (Qc, Groupes A et B), du Nouveau-Brunswick (N-B, Groupe D), des États-Unis (É-U, Groupe E), de l'Ontario (Ont, Groupe F) et BV urbains (Groupe G) pour les PdR : a) 2 ans; b) 20 ans; c) 100 ans; d) 350 ans. Les marqueurs entourés d'un trait noir indiquent que le débit MÉRA est à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95 % du quantile de débit observé. Le nombre de BV pour lesquels cette situation survient est indiqué entre parenthèses dans le haut des graphiques.86

Figure 7.9 - Relation entre la pente moyenne des BV et la présence de milieux humides.87

Figure 7.10 – Rapports des DMA estimés à partir de la MÉRA et des quantiles correspondant estimés à partir des données observées (MÉRA/Observé) en fonction du débit spécifique MÉRA pour les BV du Québec (Qc, Groupes A et B), du Nouveau-Brunswick (N-B, Groupe D), des États-Unis (É-U, Groupe E), de l'Ontario (Ont, Groupe F) et BV urbains (Groupe G) pour les PdR : a) 20 ans; b) 350 ans.....89

Figure 7.11 - Séries des DMA (juin à novembre) à la station NY 01374598 (état de New York aux États-Unis).....91

Figure 7.12 – Rapport entre quantiles DMA estimés à partir de la MÉRA et quantiles DMA estimés à partir des séries observées (MÉRA/Obs.) pour les BV dont l'occupation urbaine est supérieure à 10 % pour les PdR : a) 2 ans; b) 20 ans; c) 100 ans; d) 350 ans. Le code de couleur indique le % d'occupation urbaine et les croix signifie que le quantile MÉRA est à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95 % du quantile observé.94

Figure 7.13 - Comparaison des quantiles de débits spécifiques estimés par la MÉRA en fonction des quantiles correspondants estimés à partir des débits simulés INFO-Crue pour les 42 BV prioritaires (Groupe C) pour les PdR a) 2 ans, b) 20 ans, c) 100 ans et d) 350 ans. Le code de couleur indique le % d'occupation urbaine.	98
Figure 7.14 - – Rapport des quantiles estimés selon les différentes approches aux quantiles estimés à partir des données observées pour les BV du Québec (Qc, Groupes A et B) et pour les périodes de retour : a) 2 ans; b) 20 ans; c) 100 ans; d) 350 ans. Les symboles entourés d'un trait noir indiquent que les débits estimés sont à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95 % du quantile de débit observé. MÉRA : méthode rationnelle, MHP : modèle hydrologique parcimonieux, IC : INFO-Crue. ...	101
Figure 8.1 – Carte localisant les différents tronçons de l'Atlas hydroclimatique considérés pour l'analyse des projections futures des DMA.	109
Figure 8.2 – Distributions des probabilités d'occurrence des DMA annuels au cours des périodes mars-avril-mai (MAM), juin à novembre (JJASON) ou décembre-janvier-février (DJF) en fonction de la période future considérée pour le tronçon MONT00902 selon le scénario : a) RCP 4.5; b) RCP 8.5.	110
Figure 8.3 – Diagramme ternaire des valeurs moyennes aux tronçons sous étude des fractions des DMA survenant pendant les périodes du printemps (mars-avril-mai), de juin à novembre (JJASON) ou la période hivernale (décembre-janvier-février) pour les différentes périodes futures pour le scénario : a) RCP 4.5; b) RCP 8.5.....	111
Figure 8.4 – Cartes des fractions de DMA annuels survenant au printemps (MAM) pour les périodes : a) 1991-2020; b) 2041-2070 (RCP 8.5); c) 2071-2100 (RCP 8.5).	113
Figure 8.5 – Distribution des écarts relatifs entre quantiles DMA (juin à novembre) de période de retour 20 ans en climat futur et en climat de référence selon les différents modèles climatiques utilisés dans l'Atlas hydroclimatique pour les tronçons du Groupe A selon les RCP 4.5 (en bleu) et 8.5 (en rose) pour les périodes futures : a) 2041-2070; b) 2071-2100.	115
Figure 8.6 – Diagramme des écarts relatifs médians entre quantiles DMA annuels (janvier à décembre) des périodes futures et du climat de référence aux tronçons sous étude pour le RCP 4.5 (partie supérieure) et le RCP 8.5 (partie inférieure) pour les PdR : a) 2 ans et b) 20 ans. Le quadrant supérieur droit correspond aux écarts positifs (à la hausse) et le quadrant supérieur gauche aux écarts négatifs (à la baisse). L'axe des y indique la fraction de modèle/simulation projetant des hausses (axe de droite) ou des baisses (axe de gauche). L'axe des x correspond à la valeur	

médiane des écarts relatifs à la hausse (quadrant droit) ou à la baisse (quadrant gauche).	117
Figure 8.7 – Diagramme des écarts relatifs médians entre quantiles DMA en hiver (DJF) des périodes futures et du climat de référence aux tronçons sous étude pour le RCP 4.5 (partie supérieure) et le RCP 8.5 (partie inférieure) pour les PdR : a) 2 ans et b) 20 ans. Voir la Figure 8.6 pour une description du contenu de la figure.	118
Figure 8.8 – Diagramme des écarts relatifs médians entre quantiles DMA au printemps (MAM) des périodes futures et du climat de référence aux tronçons sous étude pour le RCP 4.5 (partie supérieure) et le RCP 8.5 (partie inférieure) pour les PdR : a) 2 ans et b) 20 ans. Voir la Figure 8.6 pour une description du contenu de la figure.	119
Figure 8.9 – Diagramme des écarts relatifs médians entre quantiles DMA en été/automne (JJASON) des périodes futures et du climat de référence aux tronçons sous étude pour le RCP 4.5 (partie supérieure) et le RCP 8.5 (partie inférieure) pour les PdR : a) 2 ans et b) 20 ans. Voir la Figure 8.6 pour une description du contenu de la figure.....	120
Figure 8.10 – Carte des projections médianes des écarts relatifs entre quantiles DMA annuels entre la période 2071-2100 et la période de référence aux tronçons sous étude pour le RCP 8.5 pour la PdR : a) 2 ans et b) 20 ans. Les cercles correspondent aux tronçons où les hausses sont dominantes (plus de 50% des modèles/simulations projettent des hausses) et les carrés aux tronçons où les diminutions dominent (plus de 50% des modèles/simulations projettent des diminutions). La taille des points/carrés correspond au pourcentage de modèles/simulations projetant des hausses ou des diminutions. Les couleurs indiquent la médiane des écarts relatifs simulés par les modèles/simulations projetant des hausses ou des diminutions.	123
Figure 8.11 – Carte des projections médianes des écarts relatifs entre quantiles DMA en hiver (DJF) entre la période 2071-2100 et la période de référence aux tronçons sous étude selon le RCP 8.5 pour la PdR : a) 2 ans et b) 20 ans. Voir la Figure 8.10 pour une description du contenu de la figure.	124
Figure 8.12 – Carte des projections médianes des écarts relatifs entre quantiles DMA au printemps (MAM) entre la période 2071-2100 et la période de référence aux tronçons sous étude selon le RCP 8.5 pour la PdR : a) 2 ans et b) 20 ans. Voir la Figure 8.10 pour une description du contenu de la figure.	125
Figure 8.13 – Carte des projections médianes des écarts relatifs entre quantiles DMA en été/automne (JJASON) entre la période 2071-2100 et la période de référence aux	

tronçons sous étude selon le RCP 8.5 pour la PdR : a) 2 ans et b) 20 ans. Voir la Figure 8.10 pour une description du contenu de la figure.....	126
Figure 8.14 – Diagramme comparant les écarts des DMA de juin-novembre et de PdR 20 ans simulés par l’Atlas hydroclimatique et les projections d’augmentation des pluies extrêmes (valeurs minimales et maximales du Tableau 8.1) aux différents tronçons sous étude pour les trois périodes futures selon : a) le RCP 4.5 et b) le RCP 8.5. Seuls les tronçons où les hausses sont dominantes (plus de 50% des modèles/simulations projettent des hausses) sont présentés.	130
Figure B.1 - Périodes couvertes par les données hydrométriques aux stations sous étude. Les stations sont ordonnées en fonction de leur date de mise en opération. Les zones en blanc correspondent aux périodes où les données sont manquantes. Le code de couleur identifie les périodes suivantes de l’année : 1) décembre-janvier-février (en marron); 2) mars-avril mai (en bleu); 3) juin à novembre (en rouge) et la période de simulation INFO-Crue (en gris)	159
Figure C.1 – Exemple de fonction de densité de probabilité de la distribution GEV pour les cas $\xi < 0$ (distribution bornée; ligne bleu), $\xi = 0$ (distribution Gumbel; ligne rouge) et $\xi > 0$ (distribution non bornée ou à queue lourde - ‘heavy-tailed’; ligne jaune)....	162
Figure E.1 – Réseau hydrographique complet et cours d’eau principal (en bleu) du BV de la station de Kamouraska (022601).	175
Figure H.1 - Comparaison des DMA spécifiques observés et estimés avec la MÉRA après application des facteurs de corrections (Tableau 7.1) pour les BV du Québec (Qc, Groupes A et B), du Nouveau-Brunswick (N-B, Groupe D), des États-Unis (É-U, Groupe E), de l’Ontario (Ont, Groupe F) et les BV urbains (Groupe G) pour les PdR : a) 100 ans, b) 350 ans. Les marqueurs entourés d’un trait noir indiquent que le débit MÉRA est à l’intérieur de l’intervalle de confiance 95 % du quantile de débit observé	195
Figure H.2 - Comparaison des DMA spécifiques observés et estimés avec la MÉRA après application des facteurs de corrections (Tableau 7.1) pour les BV du Québec (Qc, Groupes A et B), du Nouveau-Brunswick (N-B, Groupe D), des États-Unis (É-U, Groupe E), de l’Ontario (Ont, Groupe F) et les BV urbains (Groupe G) pour les PdR : a) 5 ans, b) 10 ans, c) 25 ans, d) 50 ans. Les marqueurs entourés d’un trait noir indiquent que le débit MÉRA est à l’intérieur de l’intervalle de confiance 95 % du quantile de débit observé.....	197

Figure H.3 - Distribution des rapports entre quantiles DMA estimés à partir de la MÉRA et des quantiles correspondant estimés à partir des séries observées $FT(MÉRA)$ (MÉRA/observé) pour l'ensemble des BV (Tout) et les BV du Québec (Qc), du Nouveau-Brunswick (N-B), des États-Unis (É-U), de l'Ontario (Ont) et les BV urbains (Urbain) pour les PdR : a) 5 ans, b) 10 ans, (c), 25 ans, (d) 50 ans. Les chiffres sur l'axe des ordonnées à droite correspondent aux nombres de BV pour lesquels les DMA de la MÉRA se trouve à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95 % des quantiles observés (numérateur) et au nombre total de BV considéré (dénominateur). La ligne bleue pointillée verticale correspond à la valeur MÉRA/observé = 1. Le trait rouge à l'intérieur des boxplots représente la médiane (2^e quartile), les limites des boîtes représentent les 1^{er} et 3^e quartiles, la moustache supérieure correspond à $[3^e \text{ quartile} + 1.5 (3^e \text{ quartile} - 1^e \text{ quartile})]$ et la moustache inférieure au $3^e \text{ quartile} - 1.5 (3^e \text{ quartile} - 1^e \text{ quartile})$, les croix bleues présentent les valeurs supérieures à $[3^e \text{ quartile} + 1.5 (3^e \text{ quartile} - 1^e \text{ quartile})]$199

Figure H.4 - Rapports des DMA estimés à partir de la MÉRA et des quantiles correspondant estimés à partir des données observées (MÉRA/observé) en fonction du débit spécifique observé pour les BV du Québec (Qc), du Nouveau-Brunswick (N-B), des États-Unis (É-U), de l'Ontario (Ont) et BV urbains (urbain) pour les PdR : a) 5 ans, b) 10 ans, c) 25 ans, d) 50 ans. Les marqueurs entourés d'un trait noir indiquent que le débit MÉRA est à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95 % du quantile de débit observé. Le nombre de BV pour lesquels cette situation survient est indiqué entre parenthèses dans le haut des graphiques.201

Figure H.5 - Rapport entre quantiles DMA estimés à partir de la MÉRA et quantiles DMA estimés à partir des séries observées (MÉRA/Obs.) pour les BV dont l'occupation urbaine est supérieure à 10 % (Groupe G) pour les PdR : a) 5 ans, b) 10 ans, c) 25 ans, d) 50 ans. Le code de couleur indique le % d'occupation urbaine et les croix signifie que le quantile MÉRA est à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95 % du quantile observé203

Figure H.6 - Comparaison des quantiles de débits spécifiques estimés par la MÉRA en fonction des quantiles correspondants estimés à partir des débits simulés INFO-Crue pour les 42 BV prioritaires (Groupe C) pour les PdR a) 5 ans, b) 10 ans, c) 25 ans, d) 50 ans. Le code de couleur indique le % d'occupation urbaine.205

Figure H.7 - Rapport des quantiles estimés selon les différentes approches aux quantiles estimés à partir des données observées pour les BV du Québec (Qc,

Groupes A et B) et pour les périodes de retour : a) 5 ans, b) 10 ans, c) 25 ans, d) 50 ans. Les symboles entourés d'un trait noir indiquent que les débits estimés sont à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95 % du quantile de débit observé. MÉRA : méthode rationnelle, MHP : modèle hydrologique parcimonieux, IC : INFO-Crue. ...207

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 - Modèles globaux du climat et simulations utilisées dans l'Atlas hydroclimatique (DEH, 2018).....	24
Tableau 3.1 – Caractéristiques des différents groupes de bassins versants considérés dans le cadre de la présente étude.....	30
Tableau 4.1 - Liste des stations avec plus de 15 années valides (période de juin à novembre) avec des tendances (test de Mann-Kendal au seuil de significativité de 5%).....	43
Tableau 5.1 – Valeurs de coefficients de ruissellement pour l'approche S-2	56
Tableau 5.2 – Description des caractéristiques retenues pour l'estimation du temps de concentration à partir de l'arbre présenté à la Figure 4.1	56
Tableau 6.1 - Valeurs de NSE obtenues pour l'ensemble des bassins modélisés à l'aide de GR5H.	62
Tableau 6.2 - Valeurs des paramètres obtenus pour les différents tronçons lors du calage du modèle GR5H. (pour plus de détails sur la signification des paramètres, voir la Section 3.2 de Mailhot et al. 2020).	64
Tableau 7.1 – Caractéristiques considérées par la MÉRA et retenues pour l'estimation des coefficients de détermination (R^2) des régressions linéaires entre caractéristiques et quantiles de débits.....	71
Tableau 7.2 - Facteurs de correction appliqués aux valeurs MÉRA et intervalles 10 ^e -90 ^e percentiles de la distribution des rapports $FT(MÉRA)$ avant et après correction.	75
Tableau 8.1 Majorations (%) à appliquer aux courbes IDF en climat de référence (1991-2020) selon différentes périodes futures pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5.	107
Tableau 8.2 Majorations recommandées (%) selon les périodes futures pour les pluies maximales annuelles de durées 1 à 72 h selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5. La période de référence est 1980-2020. Les valeurs ont été arrondies à $\pm 0.5\%$	107
Tableau A.1 - Caractéristiques des stations hydrométriques retenues et appartenant aux bassins versants des Groupes A et B (Québec)	147
Tableau A.2 – Liste des bassins versants prioritaires retenus pour les analyses (inclus dans Groupe C).....	148
Tableau A.3 - Liste des bassins versants prioritaires retirés des analyses (non inclus dans Groupe C).....	149

Tableau A.4 – Caractéristiques des stations hydrométriques retenues et appartenant aux bassins versants du Groupe D (Nouveau-Brunswick)	150
Tableau A.5 - Caractéristiques des stations hydrométriques retenues et appartenant aux bassins versants du Groupe E (États-Unis : Me : Maine ; Ma : Massachussetts ; Vt : Vermont ; NY : New York).	151
Tableau A.6 - Caractéristiques des stations hydrométriques retenues et appartenant aux bassins versants du Groupe F (Ontario)	153
Tableau A.7 - Caractéristiques des stations hydrométriques retenues et appartenant aux bassins versants du Groupe G	155
Tableau C1 - Valeurs des paramètres régionaux de la GEV et valeurs estimées par Villeneuve et al. (2007).	163
Tableau D.1 – Quantiles de débits estimés pour diverses périodes de retour à partir des données observées et paramètres de la distribution GEV (Generalized extreme value) pour les bassins versants des Groupes A et B (Québec)	165
Tableau D.2 – Quantiles de débits estimés pour diverses périodes de retour à partir des données observées et paramètres de la distribution GEV (Generalized extreme value) pour les bassins versants du Groupe C (INFO-Crue, Québec)	165
Tableau D.3 – Quantiles de débits estimés pour diverses périodes de retour à partir des données observées et paramètres de la distribution GEV (Generalized extreme value) pour les bassins versants du Groupe D (Nouveau-Brunswick)	167
Tableau D.4 - Quantiles de débits estimés pour diverses périodes de retour à partir des données observées et paramètres de la distribution GEV (Generalized extreme value) pour les bassins-versants du Groupe E (États-Unis : Me : Maine ; Ma : Massachussetts ; Vt : Vermont ; NY : New York)	167
Tableau D.5 - Quantiles de débits estimés pour diverses périodes de retour à partir des données observées et paramètres de la distribution GEV (Generalized extreme value) pour les bassins-versants du Groupe F (Ontario)	168
Tableau D.6 - Quantiles de débits estimés pour diverses périodes de retour à partir des données observées et paramètres de la distribution GEV (Generalized extreme value) pour les bassins-versants du Groupe G (Urbain), États-Unis : Me : Maine ; Ma : Massachussetts ; Vt : Vermont ; NY : New York.	169
Tableau E.1 – Caractéristiques physiographiques nécessaires à l'estimation des débits de conception avec la MÉRA	171

Tableau E.2 – Sources d'information utilisées pour la caractérisation des BV des Groupes A, B et C (Québec).....	172
Tableau E.3 - Sources d'information utilisées pour la caractérisation des BV du Groupe D (N-B).....	172
Tableau E.4 - Sources d'information utilisées pour la caractérisation des BV du Groupe E et G (États-Unis)	173
Tableau E.5 - Sources d'information utilisées pour la caractérisation des BV du Groupe F et G (Ontario)	173
Tableau F.1 - Caractéristiques physiographiques des bassins versants des Groupes A et B (Québec).....	177
Tableau F.2 - Caractéristiques physiographiques des bassins versants du Groupe C (Québec)	178
Tableau F.3 - Caractéristiques physiographiques des bassins versants du Groupe D (Nouveau-Brunswick)	180
Tableau F.4 - Caractéristiques physiographiques des bassins versants du Groupe E (États-Unis ; Me : Maine; Ma : Massachussets ; Vt : Vermont ; NY : New York) .	181
Tableau F.5 - Caractéristiques physiographiques des bassins versants du Groupe F (Ontario).....	183
Tableau F.6 - Caractéristiques physiographiques des bassins versants du Groupe G (Ontario et États-Unis, Me : Maine; Ma : Massachussets ; Vt : Vermont ; NY : New York)	185
Tableau G.1 - Station météorologique associée aux bassins versants des Groupes A, B et C et valeurs des paramètres a et b pour l'estimation de l'intensité des précipitations pour les périodes de retour 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100 et 350 ans.	187
Tableau G.2 - Station météorologique associée aux bassins versants du Groupe D et valeurs des paramètres a et b pour l'estimation de l'intensité des précipitations pour les périodes de retour 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100 et 350 ans.	189
Tableau G.3 - Valeur des paramètres a et b (échelle logarithmique) des bassins versants des Groupes E et G pour l'estimation de l'intensité des précipitations pour les périodes de retour 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100 et 350 ans.	190
Tableau G.4 - Valeur des paramètres a des bassins versants des Groupes F et G pour l'estimation de l'intensité des précipitations pour les périodes de retour 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100 et 350 ans. La valeur du paramètre b est de -0.699.....	192

LISTE DES ABRÉVIATIONS

BV	: Bassin versant
CC	: Changements climatiques
CGVD28	: Système canadien de référence altimétrique de 1928
CMIP5	: Coupled Model Intercomparison Project Phase 5
CN	: Curve number
CORDEX	: Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment
CR	: Coefficient de ruissellement
DEH	: Direction de l'expertise hydrique
DMA	: Débits maxima annuels
ECCC	: Environnement et changement climatique Canada
É-U	: États-Unis
GEV	: Generalized Extreme Value
GNB	: Gouvernement du Nouveau-Brunswick
GR5H	: Génie Rural à cinq paramètre et à résolution horaire
IAC	: Inventaire annuel des cultures du Canada
IDF	: Intensité-Durée-Fréquence
MAPAQ	: Ministère de l'Agriculture, des Pêches et de l'Alimentation
MELCC	: Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques
MÉRA	: Méthode rationnelle
MERN	: Ministère de l'énergie et des ressources naturelles
MFFP	: Ministère des forêts, de la faune et des parcs
MGC	: Modèles globaux du climat
MHP	: Modèle hydrologique parcimonieux
MNT	: Modèle numérique de terrain
MRLC	: Multi-Resolution Land Characteristics Consortium
MTQ	: Ministère des transports du Québec
N-B	: Nouveau-Brunswick
NLCD	: National Land Cover Database
MTQ	: Ministère des transports du Québec

NSE : Nash-Sutcliffe

Ont : Ontario

PAM : Précipitation annuelle moyenne

PdR : Période de retour

PFDS: Precipitation Frequency Data Server

POT : Peak Over Threshold

Qc : Québec

RMSE : Root mean square error

RMSNE : Root mean square normalised error

SCE-UA: Shuffled Complex Evolution Method, University of Arizona

SCS : Soil conservation service

SHG : Stations hydrométriques géoréférencées

TC: Temps de concentration

TM : Temps de montée

USDA : United States Department of Agriculture

USGS : United States Geological Survey

REMERCIEMENTS

Les auteurs souhaitent d'abord remercier Mme Mélanie Taylor et M. Alton Stead (*Ontario Region – Data Control and Client Services Lead, National Hydrological Service, Meteorological Service of Canada, Environment and Climate Change Canada*) qui leur ont gentiment fourni les données de débit des stations de l'Ontario.

Un merci également à M. Jasmin Boisvert (Spécialiste de ressources en eau, Sciences de l'eau, Ministère de l'Environnement et Gouvernements Locaux, Gouvernement du Nouveau-Brunswick) et M. Guy Morin (Superviseur en Hydrométrie, Environnement et Changement climatique Canada, Section Hydrologie et Écohydraulique) qui nous ont fourni les données de débit des stations du Nouveau-Brunswick.

Nos remerciements à M. Gabriel Lanthier (Agent de promotion- Station de biologie des Laurentides, Université de Montréal, Département de sciences biologiques) pour nous avoir transmis les données de débit du lac Croche.

Merci également à M. Louis Duchesne (Chercheur scientifique sur les écosystèmes et l'environnement, Direction de la recherche forestière, Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs) qui nous a gracieusement fourni les données de débit et les données météorologiques du lac Tirasse et du lac Laflamme.

Finalement, nos remerciements à toute l'équipe du MELCC participant au projet : Charles Malenfant, Hind El-Housni, Édouard Mailhot, Simon Lachance-Cloutier et Jean-François Cyr.

CHAPITRE 1. INTRODUCTION

Le projet INFO-Crue vise à offrir des outils permettant de délimiter les zones inondables dans une grande partie du Québec méridional dans un contexte de changements climatiques. Dans le cadre de ce projet, les débits de crues nécessaires à la cartographie des zones inondables seront intégrés dans la prochaine version de l'Atlas hydroclimatique. Toutefois, la méthode actuelle d'estimation des débits de crues utilisée n'est pas adaptée aux petits bassins ($< 100 \text{ km}^2$) et ceux comportant une occupation urbaine supérieure à 20 %. Dans un tel contexte, il est important de recourir à d'autres méthodes d'estimation des débits de crues pour ces bassins versants (BV).

Le présent projet vise à documenter, tester et comparer différentes approches pour estimer des débits de crues de récurrences 2, 10, 20, 50, 100 et 350 ans sur des BV non-jaugés de moins de 250 km^2 du Québec méridional. Une approche devra ensuite être sélectionnée pour l'estimation des débits de crues applicable aux BV non-jaugés du Québec méridional.

Cette approche devra : 1) être adaptée aux BV jaugés et non-jaugés de moins de 250 km^2 ; 2) être simple et rapide à mettre en place ; 3) être applicable à grande échelle à partir des données physiographiques généralement disponibles ; 4) s'accompagner d'une estimation des incertitudes sur les quantiles de débits de crues estimés ; 5) être utilisable pour développer des projections des débits de pointe en climat futur.

L'évaluation de ces méthodes et la sélection de l'une d'entre elles ont été réalisées en comparant les débits de crues estimés aux débits de crues calculés à partir des débits observés à des stations à l'exutoire de petits BV. Ainsi, 111 stations en aval de BV de moins de 250 km^2 du Québec, de l'Ontario, du Nouveau-Brunswick et de quatre états des États-Unis (Maine, Massachussets, New York et Vermont) ont été considérés. Un minimum de 15 années de débits observés à un pas de temps sous-journaliers (généralement horaire ou aux 15 minutes) durant la période du 1^{er} juin au 30 novembre de chaque année (période d'écoulement en eau libre où les crues résultent d'épisodes de pluie intenses) est disponible à tous ces BV. Les débits à ces stations constituent un échantillon unique de données mesurées sur de petits BV.

Le présent rapport fait un bilan des travaux réalisés dans le cadre de ce projet. Ces travaux ont débuté par une revue de littérature des grandes catégories de méthodes

d'estimation des débits de crues sur des BV non-jaugés. Une analyse critique de ces méthodes est présentée au Chapitre 2 de même que l'identification des méthodes qui seront examinées plus en détails dans le cadre de la présente étude. Deux approches ont été retenues pour une analyse plus poussée au terme de ce travail : 1) la méthode rationnelle (MÉRA) et 2) la modélisation hydrologique parcimonieuse (MHP). Les débits simulés dans le cadre de la plateforme INFO-Crue et de l'Atlas hydroclimatique seront également évalués.

La collecte et le traitement de données de débits et la caractérisation des BV sont ensuite abordés au Chapitre 3. Les BV ont été classés en différents groupes selon le type de données disponibles et la nature des analyses qui peuvent être menées. Ces groupes sont décrits au Chapitre 3.

Le Chapitre 4 traite de l'approche statistique utilisée pour l'estimation des débits maxima annuels (DMA). Les résultats de certaines analyses préliminaires (p. ex. contrôle de qualité des données, traitement des données manquantes et analyse de tendance) sont également présentés.

Une description détaillée de la MÉRA est présentée au Chapitre 5. La version utilisée est celle développée dans le cadre d'un projet réalisé pour le compte du Ministère des transports du Québec sur la révision des critères de conception des ponts pour des bassins de drainage de 25 km² et moins dans un contexte de changements climatiques. Les rapports finaux de la première phase de ce projet (Mailhot *et al.* 2018) et de la deuxième phase du projet (Mailhot *et al.* 2021) résument l'ensemble des travaux réalisés dans le cadre de ce projet.

Le Chapitre 6 décrit le modèle hydrologique parcimonieux (MHP) retenu (modèle GR5H) et les étapes de son application à 26 BV. Les résultats de la calibration y sont également présentés.

Le Chapitre 7 compare, dans un premier temps, les valeurs de DMA estimés selon les différentes approches retenues (MÉRA, MHP, INFO-Crue) et les DMA calculés à partir des débits mesurés. Les résultats et les conclusions de la comparaison des quantiles MÉRA et des quantiles INFO-crue sont ensuite abordés.

La question des projections des débits de crues en climat futur est discutée au Chapitre 8. Après une discussion générale des crues au Québec, l'évolution future de celles-ci est

traîtée selon deux angles. Le premier s'intéresse à l'évolution des précipitations extrêmes qui demeurent l'intrant météorologique clef pour les crues d'été et d'automne et le second examine les projections futures des crues d'été/automne pour les petits BV telles que simulées dans l'Atlas hydroclimatique. Une comparaison des projections des précipitations intenses et des débits de crues est finalement réalisée afin de voir dans quelle mesure elles sont cohérentes.

Le rapport se termine par l'identification de la MÉRA comme méthode recommandée pour l'estimation des débits de crues aux BV de moins de 250 km² non-jaugés. Les raisons de ce choix sont détaillées et les limites et incertitudes des estimés MÉRA rappelées.

CHAPITRE 2. ESTIMATION DES DÉBITS DE CRUES DE BV NON JAUGÉS

Ce chapitre a pour objectif de dresser un portrait global des grandes catégories de méthodes d'estimation des débits de crues à des bassins versants (BV) non jaugés. Il est important de spécifier que ce portrait n'est pas exhaustif et que seules quelques méthodes appartenant à chacune de ces catégories sont présentées.

Les catégories de méthodes examinées sont les suivantes :

1. Méthodes empiriques (de type méthode rationnelle) (Section 2.1)
2. Méthodes statistiques (Section 2.2)
3. Modèles hydrologiques (Section 2.3)

Les sections suivantes présentent donc une revue générale de ces différents types de méthodes et discutent de leurs avantages, désavantages et limites.

La Section 2.4 donne une description de la plateforme INFO-Crue et de l'Atlas hydroclimatique. Les quantiles de débits simulés par la plateforme INFO-Crue pour plusieurs BV du Québec seront comparés aux débits estimés par la méthode rationnelle (Groupes A et C, voir Chapitre 3) et, dans un nombre plus restreint de cas, aux quantiles estimés à partir des séries observées (Groupe A, voir Chapitre 3). Quant à l'Atlas hydroclimatique, les débits simulés seront utilisés pour développer des projections sur l'évolution future des quantiles de débits maxima annuels (DMA) aux BV prioritaires (Groupe C, voir Chapitre 3). Ces projections seront comparées aux projections d'évolution future des précipitations extrêmes.

2.1 Méthodes empiriques

Les méthodes empiriques regroupent des méthodes développées sur la base de l'expérience pratique et de l'application en ingénierie. Un seul exemple sera présenté à savoir la méthode rationnelle (MÉRA). Encore largement utilisée dans la pratique, la MÉRA a été d'abord développée sur la base de considérations hydrologiques simples afin de répondre à une problématique précise. Cette approche se présente sous une foule de variantes (Section 2.1.4). La méthode de Caquot, utilisée en France, est également incluse dans les méthodes empiriques bien qu'elle ait été développée sur la base de considérations hydrologiques (Section 2.1.5). Il va de soi que la distinction entre méthode empirique et méthode statistique peut être sujet à interprétation.

2.1.1 Méthode rationnelle

L'origine de la MÉRA, bien qu'elle reste à certains égards imprécise (Cleveland *et al.*, 2011), remonte à 1851 et est souvent attribuée à un ingénieur irlandais nommé Thomas Mulvany (Dooge, 1957). Une description plus précise en a cependant été donnée pour la première fois par Emil Kuichling (Kuichling, 1889). Cette méthode est encore largement utilisée pour estimer les débits de pointe dans la conception de différents ouvrages hydrauliques, notamment en raison de sa simplicité d'application, de sa large diffusion et de la littérature abondante à son sujet (Ponce, 1989; Brustsaert, 2005; Dhakal *et al.*, 2013; Grimaldi et Petroselli, 2015).

La MÉRA sous sa forme la plus générale est représentée par l'équation suivante :

$$Q = CR \frac{AI}{360} \quad (2.1)$$

où Q est le débit (en m³/s), I l'intensité de la précipitation (en mm/h), A la superficie du BV considéré (en hectares) et CR est le coefficient de ruissellement (adimensionnel) (le facteur 1/360 est lié aux unités). Elle repose sur l'hypothèse de l'existence d'un lien entre les quantiles des débits de pointe et les quantiles des intensités de la précipitation de même période de retour (PdR). À ce titre, elle peut être vue comme une version possible d'un modèle de régression simplifiée (ce point est discuté plus en détails à la Section 2.2.2).

L'utilisation de la MÉRA, près de 125 ans après sa première formulation, peut sembler surprenante considérant les avancées scientifiques réalisées depuis son premier énoncé (Rossmiller, 1980). La MÉRA a d'ailleurs fait l'objet de plusieurs critiques, notamment par Yen (1992) qui se questionnait à savoir si l'utilisation de cette approche s'explique par le fait qu'elle repose sur des assises scientifiques solides ou par l'absence d'avancées significatives en hydrologie. En réponse à Yen (1992), Wong (2002) soutient que l'utilisation de la MÉRA est tout à fait justifiée lorsque le coefficient de ruissellement (CR) est interprété dans un sens probabiliste. Cette interprétation probabiliste de la MÉRA établit une relation entre le débit de pointe de PdR donnée et le produit de l'intensité de la précipitation, de même PdR, et la superficie d'un BV :

$$CR_{PdR} = \frac{Q_{PdR}}{I_{PdR} A} \quad (2.2)$$

Il est alors question du CR rationnel où CR_{PdR} est le CR pour une PdR donnée, Q_{PdR} est le débit (m^3/sec) et I_{PdR} l'intensité de la précipitation (mm/h) de même PdR. Le CR peut donc être perçu dans cette formulation comme une constante d'ajustement liant le quantile de pluie et le débit. Cette interprétation aurait été initialement proposée par Horner et Flynt (1936). C'est également ce qui est mentionné dans Pilgrim et Cordery (1993) qui soulignent que la MÉRA aurait d'ailleurs été initialement développée dans cet esprit (Kuichling, 1889 ; French *et al.*, 1974 ; Dhakal *et al.*, 2012). Elle aurait été un peu oubliée par la suite jusqu'aux travaux de Schaake *et al.* (1967), portant sur des BV en milieu urbain, et ceux de French *et al.* (1974) sur des BV en milieu rural (Pilgrim et Cordery, 1993).

Une majorité des critiques formulées à l'encontre de la MÉRA concerne d'ailleurs l'interprétation conceptuelle ou déterministe selon laquelle le CR, désigné comme volumétrique, est associé au volume de ruissellement pour une pluie donnée ou encore pour un événement pluvieux individuel. De fait, la MÉRA, selon plusieurs auteurs, ne devrait pas être utilisée dans ce contexte (French *et al.*, 1974 ; Dhakal *et al.*, 2012). French *et al.* (1974), ainsi que Hotchkiss et Provaznik (1995), suite à des travaux réalisés sur des BV en Australie et au Nebraska (É.U.) respectivement, mentionnent que la MÉRA donne de piètres résultats quand elle est utilisée pour estimer les débits de pointe d'événements pluvieux spécifiques.

2.1.2 Interprétation simple de la méthode rationnelle

L'équation 2.1 peut être simplement interprétée de la façon suivante (Figure 2.1). Le numérateur de cette équation ($A I$) multiplié par T_C (temps de concentration) correspond au volume d'eau généré sur l'ensemble du BV par la pluie de PdR donnée (V_p ; éq. 1 de la Figure 2.1). Une partie de ce volume est infiltrée et une partie est emmagasinée dans le BV (rétention) et n'est pas disponible pour le ruissellement et l'écoulement. Supposons par ailleurs que l'hydrogramme résultant présente la forme simple de la Figure 2.1 où l'hydrogramme est asymétrique et le temps de relaxation est αT_C . Le volume de l'hydrogramme, V_r , peut alors être simplement calculé (éq. 2 de la Figure 2.1).

Si le CR est défini par le rapport entre le volume de l'hydrogramme et le volume de la pluie, alors ce coefficient est donné par l'éq. 3 de la Figure 2.1. Enfin, la valeur de Q peut être isolée et on obtient l'équation 4. Si on suppose $\alpha = 1$, c'est-à-dire un hydrogramme symétrique, alors on retrouve l'équation de la MÉRA (à un facteur près pour les unités).

Le cas suppose $\alpha > 1$ correspond à un hydrogramme asymétrique où le temps de relaxation est plus grand que le temps de montée. Une asymétrie plus importante apparaîtra lorsque le laminage sera plus important, laminage qui détermine la répartition temporelle des apports. Plusieurs facteurs physiographiques peuvent contribuer au plus ou moins grand laminage de l'hydrogramme (occupation du territoire, présence de lacs et milieux humides, pente, etc.).

Un examen de l'équation 4 de la Figure 2.1 montre que si un nouveau CR est défini comme suit :

$$C' = \frac{2}{(1+\alpha)} C \quad (2.3)$$

alors on retrouve l'équation de la MÉRA où le CR intègre à la fois les processus d'infiltration et de rétention qui ont un impact sur le volume disponible pour le ruissellement mais également sur les processus influençant le laminage et l'asymétrie de l'hydrogramme résultant. Il est important de noter que ces effets de laminage de l'hydrogramme sont également pris en compte dans l'estimation du T_c . En effet, on peut penser qu'un BV avec une réponse hydrologique plus lente aura un T_c plus long et sera sujet à un laminage plus important qui résultera en un hydrogramme plus asymétrique.

Il est important de noter que cette interprétation de la MÉRA s'apparente à l'interprétation conceptuelle mentionnée plus tôt. Les auteurs du présent rapport considèrent toutefois plus appropriée l'interprétation statistique où le coefficient C est interprété comme un coefficient d'ajustement entre quantiles de débits et de pluies. La Figure 2.1 suggère que ce coefficient peut dépendre de plusieurs facteurs, tant physiographiques que liés aux caractéristiques des événements pluvieux. Le terme de 'coefficient de ruissellement' semble à cet égard un peu réducteur.

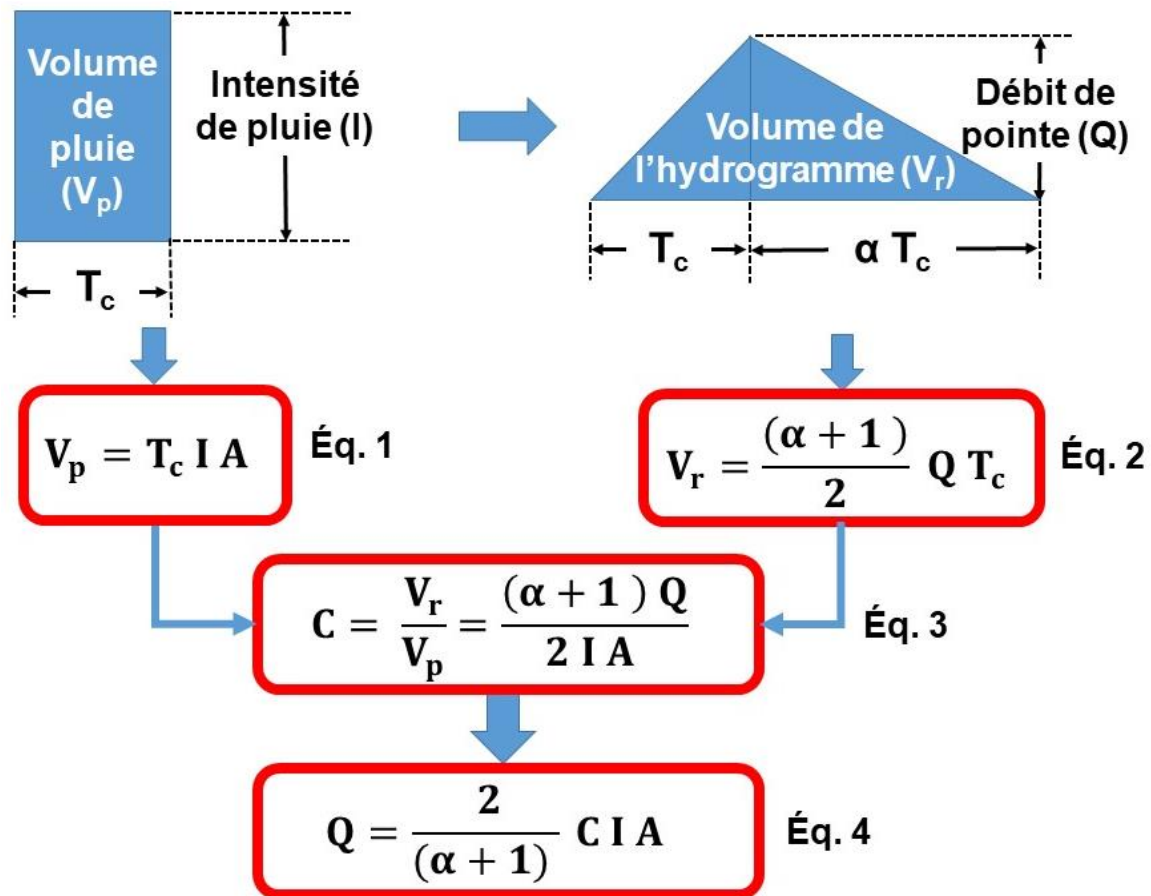


Figure 2.1 Interprétation simple de la méthode rationnelle

2.1.3 Version de la méthode rationnelle proposée par Mailhot et al. (2021)

Dans le cadre du projet *Révision des critères de conception des ponceaux pour des bassins de drainage de 25 km² et moins dans un contexte de changements climatiques* (voir Mailhot et al. 2018, 2021), la MÉRA a été mise à jour et adaptée au Québec méridional. Il est important également de rappeler que l'utilisation de la MÉRA a été étendue à des BV dont la superficie peut atteindre 100 km², une valeur supérieure à la limite précédente suggérée de 25 km².

Ce projet a conduit à de nombreuses recommandations quant aux sources d'informations et aux procédures à utiliser pour l'estimation des caractéristiques physiographiques. Ces recommandations sont détaillées dans Mailhot et al. (2018). Ce projet a également permis de mettre en place une nouvelle approche d'estimation du temps de concentration (TC) et de revoir les tables de valeurs de CR (Mailhot et al. 2021). L'application de la MÉRA

aux BV à l'étude est basée sur les recommandations de Mailhot *et al.* (2021) et est identifiée ainsi : D-4/S-2. Le Chapitre 5 décrit comment cette version de la MÉRA est appliquée au BV à l'étude.

Dans Mailhot *et al.* (2021), cette version révisée de la MÉRA (D-4/S-2) a été appliquée à 93 BV situés en Ontario (37), au Québec (14) et dans les états du Maine (4), du Massachussetts (5), de New-York (27) et du Vermont (6). Les résultats obtenus montrent une amélioration de l'estimation des débits de conception comparativement à la méthode décrite dans le Manuel de conception des ponceaux (Transports Québec, 2017) du Ministère des transports du Québec (MTQ). C'est-à-dire que les débits de conception sont plus près des quantiles de débits estimés à partir des séries mesurées. Ces résultats se traduisent par une augmentation du coefficient de détermination (R^2) passant de 0.65 à 0.72, nécessairement par une diminution de l'erreur quadratique moyenne (*Root Mean Square Error*; RMSE) et par une légère tendance à la surestimation. Il est important de spécifier que dans un cadre de conception et de mise en place d'infrastructure de drainage, une surestimation des débits a été privilégiée à une sous-estimation.

La Figure 2.2, tirée de Mailhot *et al.* (2021, Section 8.5) pour la PdR 25 ans, montre que la probabilité pour la MÉRA de sous-estimer les valeurs observées (Quantiles MÉRA/Quantiles observés < 1) est de l'ordre de 0.40 donc moins importante que la probabilité de surestimation. De même, on constate que la probabilité de sous-estimer de plus d'un facteur deux la valeur observée est de l'ordre de 0.05 alors que la probabilité de surestimer de plus d'un facteur deux est de 0.20.

2.1.4 Autres versions de la MÉRA

La MÉRA est décrite dans de nombreux guides et manuels similaires au Manuel de conception des ponceaux du MTQ que ce soit, par exemple, en Suède (Vägverket, 2008), en Australie (Goyen *et al.* 2014) et bien entendu aux États-Unis (ASCE et WPCF, 1969). Dans tous ces cas, la MÉRA est représentée par l'équation 2.1 mais différentes méthodes d'estimation du TC sont utilisées. Souvent, comme c'est le cas dans Vägverket (2008), la MÉRA est recommandée pour de très petits BV urbains (< 1km²) avec un écoulement en réseau important et utilise une équation pour l'estimation du TC faisant intervenir un coefficient de rugosité.

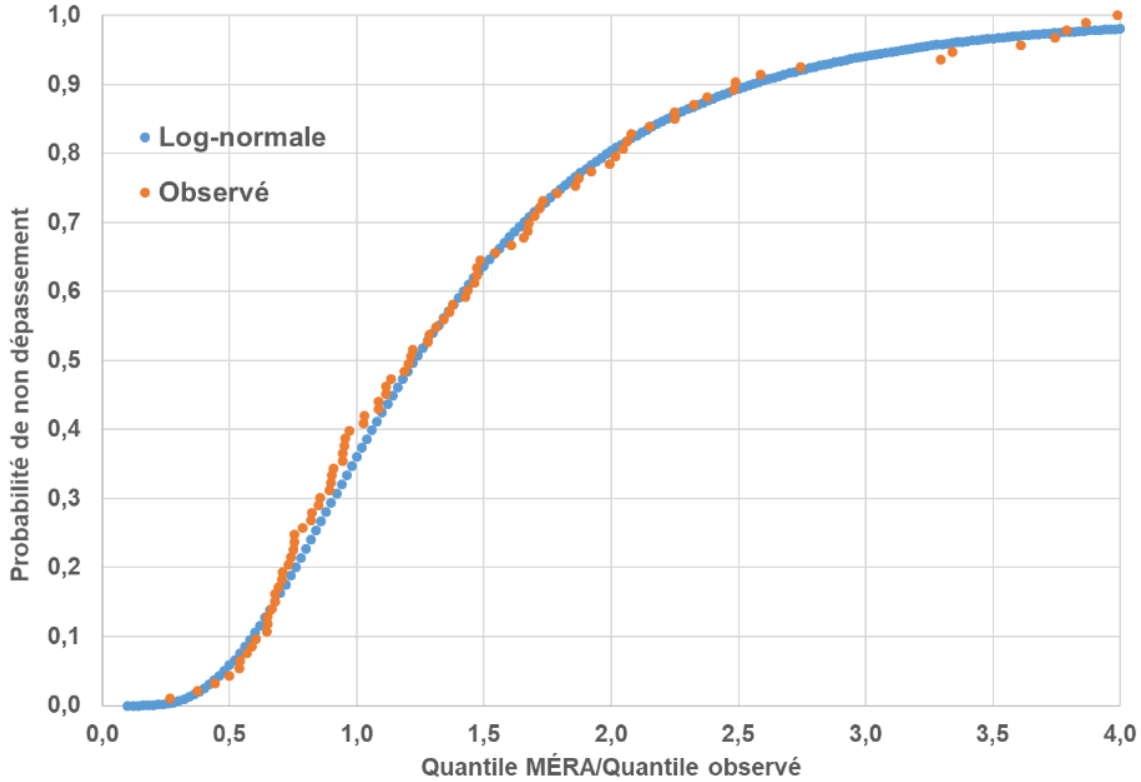


Figure 2.2 - Fonction de répartition des rapports entre quantiles de PdR 25 ans estimés à partir de la MÉRA et quantiles estimés à partir des séries observées (Quantile MÉRA/Quantile observé) aux 93 BV sous étude (Mailhot *et al.* 2021). Les points rouges correspondent aux valeurs observées alors que les points bleus correspondent à la distribution Log-normale ($\mu = 0.205$; $\sigma = 0.572$).

En ce qui concerne l'estimation du CR, il est très souvent estimé à partir des tables de ASCE et WPCF (1969) pour des BV urbains. À noter que ces tables n'ont jamais été mises à jour (voir à ce sujet Dhakal *et al.* 2012; 2013). D'autres, comme Goyen *et al.* (2014) utilisent, toujours pour des BV urbains, une équation du type :

$$CR_{10} = \alpha f + CR_{10}^1 (1 - f) \quad (2.4)$$

$$CR_{10}^1 = \beta + \gamma (I_{10}^1 - 25) \quad (2.5)$$

où α, β, γ sont des constantes, CR_{10} est le coefficient de ruissellement pour une PdR 10 ans, CR_{10}^1 est le coefficient de ruissellement de PdR 10 ans associés aux surfaces imperméables, f est la fraction imperméables et I_{10}^1 est l'intensité (mm/h) de PdR 10 ans. Pour d'autres PdR (1, 2, 5, 20, 50 et 100), différents facteurs directement appliqués sur la CR de PdR 10 ans sont suggérés. Il est important de noter que cette relation est établie

sur la base d'une analyse incluant seulement six BV de Sydney, Melbourne et Canberra (Australie) et que la démarche visant à estimer les CR observés pour chacun de ces BV n'est pas détaillée. Plus récemment Dhakal *et al.* (2012) ont développé des équations liant l'imperméabilisation de 90 BV provenant du Texas (États-Unis) et le CR :

$$CR = \alpha IMP^3 - \beta IMP^2 + \gamma IMP + \delta \quad (2.6)$$

où α, β, γ et δ sont des constantes et IMP représente la fraction imperméable. Le pourcentage d'imperméabilisation de ces BV variait entre 0 et 74 %. Finalement, pour des BV plus ruraux, d'autres tables ont été proposées (Schwab, 1957; Dunne et Leopold, 1978; Schwab et Frévert, 1985; et MTO, 1997). Toutes ces tables ont une chose en commun à savoir qu'aucune information n'est donnée quant à l'origine ou la façon dont ces valeurs de CR ont été estimées.

Les travaux visant à modifier la MÉRA afin notamment d'améliorer l'estimation du CR ou du TC sont étonnamment peu nombreux. Parmi les publications récentes sur ce sujet, mentionnons Grimaldi et Petroselli (2015) qui ont proposé une procédure estimant le volume de ruissellement à partir de la méthode SCS-CN (*Soil conservation service et Curve Number*, USDA-NRCS, 1986) et l'utilisation d'un hydrographe synthétique pour estimer l'hydrographe de conception et le débit de pointe. Selon ces auteurs, les CN apportent une information plus fiable, plus robuste et moins subjective que les CR pour deux raisons majeures. Premièrement, toujours selon ces auteurs, les CN ont été estimés suite à des milliers de tests alors que les valeurs de CR ne reposent que sur l'expérience et l'expertise des utilisateurs. Deuxièmement parce qu'une seule valeur de CN est disponible pour les différents types de sol ou occupation du territoire à défaut d'un intervalle de valeurs pour les CR, notamment en zones urbaines. Puisque les résultats de Grimaldi et Petroselli (2015) ne sont appliqués et validés que sur un seul BV, aucune conclusion définitive ne peut être avancée quant à la performance réelle de cette version de la MÉRA. Toutefois, ils rappellent que cette modification de la MÉRA permet de diminuer les incertitudes associées au TC et à l'estimation des volumes de ruissellement (déterminés par CR ou CN) et qu'elle pourrait conduire à une estimation plus réaliste des débits de conception.

Concernant les travaux de Grimaldi et Petroselli (2015), des mises en garde s'imposent. Dans le cadre du projet *Hydrologie à l'échelle de petits bassins-versants agricoles* (Mailhot *et al.* 2016) réalisé pour le compte du Ministère de l'Agriculture, des Pêches et de

l'Alimentation (MAPAQ), une revue de littérature portant sur la méthode SCS-CN avait mis en lumière de nombreux problèmes reliés à cette méthode :

1. Il est très difficile de trouver de l'information sur le développement de cette méthode qui demeure en partie obscure. Elle est basée sur de nombreux tests d'infiltration réalisés dans les années 1940 dans différentes régions des États-Unis.
2. Les travaux reliés au développement de cette méthode n'ont pas fait l'objet de publications scientifiques et n'ont jamais été révisés par des pairs.

Pour ces raisons, la méthode SCS-CN a été remise en question et critiquée à plusieurs reprises (Ponce et Hawkins, 1996) malgré les prétentions de Grimaldi et Petroselli (2015). Pour plus de renseignement sur l'histoire et le développement de la méthode SCS-CN, le lecteur est invité à consulter Fennessey *et al.* (2001) et Jiang (2001). Dès lors, il est permis de se questionner sur la plus grande fiabilité et robustesse des CN comparativement aux CR et sur la valeur ajoutée à la MÉRA suite aux modifications apportées par Grimaldi et Petroselli (2015). Plus important encore, l'application à un BV unique de 445 km² en Italie ne permet pas de statuer sur la réelle valeur ajoutée de cette approche par rapport à la MÉRA.

Un autre article récent visant à améliorer l'estimation du CR est celui de Baiamonte (2020). Ce dernier a développé une procédure pour construire des tables de CR dont les valeurs s'appuient sur des considérations physiques. Cette procédure n'est toutefois applicable qu'à très petite échelle c'est-à-dire pour une pente ou un versant relativement uniforme. Son utilisation pour de plus grands BV comprenant une topographie complexe deviendrait rapidement laborieuse d'autant plus que cette procédure fait intervenir plusieurs processus qui ne simplifient en rien l'application de la MÉRA.

2.1.5 Méthode de Caquot

La méthode de Caquot, utilisée en France, a été développée pour les BV urbains par A. Caquot et présentée pour la première fois le 20 octobre 1941 (Caquot, 1941). Elle est basée sur un bilan volumétrique et prend en compte le remplissage des conduites. Pour plus de détails sur le développement de la méthode de Caquot, le lecteur est invité à consulter Wikhydro (2021).

L'équation de la méthode de Caquot s'écrit sous la forme :

$$Q(T) = \alpha_1 S^{\alpha_2} C_r^{\alpha_3} A^{\alpha_4} \quad (2.7)$$

où $Q(T)$ est le débit de conception de période de retour T , S la pente moyenne du BV, C_r le coefficient de ruissellement, A la superficie du BV et $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ des coefficients de régression dépendant de la pluviométrie locale et de PdR T (voir ASTEE, 2017 pour plus de détails sur la méthode de Caquot). Le paramètre α_1 est également fonction du coefficient d'allongement du BV, égal à $L/\sqrt{A}$ avec L la longueur de cours d'eau et A sa surface.

La pluviométrie locale est prise en compte à travers les paramètres de la loi de Montana qui établit une relation entre les quantiles de précipitation extrêmes de différentes durées pour une PdR donnée. La loi de Montana s'écrit :

$$H(d, T) = a d^{(1-b)} \quad (2.8)$$

où $H(d, T)$ est la hauteur de précipitation de durée d et de PdR T et a et b les paramètres de la loi de Montana, tous deux fonction de la PdR T .

La méthode est toujours utilisée en France mais son domaine d'application est limité aux BV fortement urbanisés de moins de 2 km². Trois régions pluviométriques homogènes ont été définies pour la France et des valeurs des coefficients $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ sont proposées pour chacune de ces régions pour les PdR de 1 à 10 ans (ASTEE, 2017).

Il faut rappeler qu'à la base, la version Caquot a été développée pour une utilisation dans la région de Paris seulement bien que son utilisation ait été étendue à toute la France et dans les territoires outre-mer (Bertrand-Krajewski, 2008). Le manque de données de précipitations, à l'époque où la méthode a été développée, ne permettait pas d'appliquer l'équation à d'autres régions. Il est intéressant de noter que l'équation de Caquot, bien qu'elle prenne la forme d'une régression, a d'abord été développée sur la base de considérations théoriques (voir Wikhydro, 2021).

La méthode de Caquot dans sa forme actuelle paraît difficilement transposable à des BV non urbains. Par ailleurs la dépendance aux quantiles de pluies extrêmes prend une forme relativement complexe dans les paramètres $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ (voir les équations 20 à 24 de ASTEE, 2017). Sa relative complexité et la nature très différente des BV considérés dans la présente étude nous paraît mal adaptée à son utilisation.

2.2 Analyse fréquentielle régionale des crues (*Regional flood-frequency analysis*)

Les méthodes de type analyse fréquentielle régionale des crues, parfois appelées sous leur dénomination anglaise *Regional flood-frequency analysis*, sont des méthodes statistiques ayant pour point commun de regrouper plusieurs BV jaugés en régions dites homogènes, i.e. que les BV ont des caractéristiques communes tant en termes géographiques, physiographiques que climatiques. Une analyse statistique visant à lier les quantiles de débits de crues de ces BV à leurs caractéristiques physiographiques est par la suite réalisée et ces résultats sont alors transposés à d'autres BV, ceux-là non-jaugés.

Les méthodes de ce type peuvent être divisées en trois groupes suivant la classification proposée par Salinas *et al.* (2013), :

- a. Indice de crue (Section 2.2.1)
- b. Régression (Section 2.2.2)
- c. Géostatistique (Section 2.2.3)

L'une des étapes cruciales de ce type d'approche, notamment pour les groupes a et b (indice de crue et régression), est l'identification de régions homogènes. Salinas *et al.* (2013) dressent une liste d'approches pour diviser le territoire en régions homogènes. Ceux-ci expliquent qu'il n'existe pas de consensus à cet égard et que l'utilisation de l'une ou l'autre de ces méthodes implique de nombreux choix méthodologiques. Toutefois, ils spécifient que la performance de ces méthodes dépend fortement de cette régionalisation. Requena *et al.* (2017) sont quant à eux plus sévères à l'égard des méthodes d'identification de régions homogènes et mentionnent qu'aucune des procédures proposées dans la littérature ne repose sur des bases solides ou ne fait consensus. D'ailleurs, deux approches pour estimer l'hétérogénéité de différentes régions sont analysées dans cet article et les auteurs recommander l'utilisation des deux approches à des fins de comparaisons et soulignent que des efforts sont encore nécessaires pour développer une procédure plus robuste.

Une bonne partie de l'information présentée dans ce qui suit provient de Salinas *et al.* (2013) et Spence *et al.* (2013) qui dressent un portrait de ces méthodes, passent en revue les applications et comparent les performances de ces différentes méthodes. Plusieurs conclusions très intéressantes ont été tirées de cette analyse comparative. Les sections

suivantes présentent ces méthodes alors que la section 2.2.4 expose les principales conclusions de l'étude comparative de Salinas *et al.* (2013).

2.2.1 Indice de crue

La première catégorie de méthodes est désignée sous le nom de méthodes d'indices de crues ou *index flood method* (Dalrymple, 1960, Grover *et al.* 2002) ou encore *pooled frequency analysis* (Spence *et al.* 2013). Il s'agit selon Salinas *et al.* (2013), de l'approche classique et l'une des premières développées. Ce type d'approche suppose que les débits de crues pour les BV d'une région, considérée homogène, sont représentés par une même distribution ou une courbe de fréquence de crues. Les valeurs spécifiques en un site sont obtenues en multipliant cette distribution par un facteur, l'indice de crue, qui est fonction des caractéristiques locales du BV. À cet égard, la MÉRA pourrait être assimilée dans une certaine mesure à ce type d'approche. En effet, la distribution régionale est représentée par la courbe d'Intensité-Durée-Fréquence (IDF) dans le cas de la MÉRA et l'indice de crue est le coefficient de ruissellement.

2.2.2 Régression

Les méthodes basées sur des régressions cherchent à établir une relation entre les quantiles de débit de crues de PdR donnée et les caractéristiques physiographiques des BV à partir de régressions pour des ensembles de BV provenant d'une même région ou de BV présentant des caractéristiques physiographiques et climatiques similaires.

Le type d'équations souvent utilisé pour représenter ces régressions est de la forme (Pandey et Nguyen 1999) :

$$Q(T) = \alpha X_1^{\beta_1} X_2^{\beta_2} \quad (2.9)$$

où $Q(T)$ est le débit pour la période de retour T , X_1 et X_2 , les variables explicatives (caractéristiques physiographiques) et α, β_1 et β_2 des paramètres d'ajustement qui dépendront de la période de retour T . Il est intéressant de noter que la MÉRA est de cette forme avec $\alpha = C_R/360$, $X_1 = A$, $X_2 = I$, et $\beta_1 = \beta_2 = 1$.

Young et McEnroe (2014) ont utilisé une approche de ce type et l'on appliqué à 72 BV jaugés (avec 20 ans ou plus de données disponibles) du Kansas (États-Unis) de superficies variant de 1 à 77 km². Plusieurs variables explicatives ont été examinées, certaines liées à la pluviométrie (p. ex. intensité de la pluie, précipitation moyenne

annuelle) d'autres à l'hydrologie (p. ex. déficit hydrique annuel moyen) et d'autres enfin aux BV (p. ex. superficie, perméabilité des sols, pente moyenne du cours d'eau). Leur analyse a permis de montrer que le modèle offrant la meilleure performance était de la forme suivante :

$$Q(T) = C(T) I(T) A \quad (2.10)$$

où $I(T)$ est l'intensité de la précipitation de période de retour T (mm/h), A est la superficie du BV (km^2), et où $C(T)$ est décrit par une équation du type :

$$C(T) = \theta(T) PAM^{\rho(T)} \quad (2.11)$$

où PAM est la précipitation annuelle moyenne, θ, ρ deux paramètres dépendant de la période de retour T . L'équation 2.11 est privilégiée parce que l'analyse ne permet pas de conclure que les exposants de la régression associés à A et I sont significativement différents de 1. Cette équation est en fait la MÉRA avec un CR fonction de la précipitation moyenne annuelle. Ces auteurs concluent donc que la MÉRA représente le 'meilleur' modèle dans ce cas précis d'application. L'absence de caractéristiques physiographiques comme variables explicatives du coefficient C est attribuable selon eux à la relative homogénéité des BV considérés. Cette étude est donc intéressante en ce sens qu'elle suggère, pour les BV retenus, que l'utilisation d'une méthode de régression conduit à la 'sélection' d'un modèle similaire à la MÉRA. Évidemment cette conclusion ne peut être indument généralisée mais elle est tout de même révélatrice.

2.2.3 Géostatistiques

Les méthodes géostatistiques sont quant à elles basées sur la corrélation spatiale des inondations dans une zone donnée (Merz and Blöschl, 2005) ou encore le long d'un réseau hydrographique (Skøien *et al.*, 2006). Des techniques de krigeage sont utilisées pour réaliser l'interpolation spatiale de plusieurs critères hydrologiques (débit annuel moyen, inondation, étiage, etc.). Le principal avantage de ces méthodes est que l'étape de régionalisation du territoire n'est pas nécessaire. L'envers de la médaille est qu'un réseau relativement dense de stations de jaugeage à l'intérieur de la zone d'étude est nécessaire.

2.2.4. Étude de Salinas *et al.* (2013)

L'étude de Salinas *et al.* (2013) a permis de recenser les applications de ces différents types de méthodes. Ces auteurs ont pu ainsi comparer les performances selon le types de méthodes mais aussi selon le type de climat (les climats considérés sont aride, humide, tropical et froid). La métrique de performance utilisée par ces auteurs est la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne normalisée (*root mean square normalised error*, RMSNE) définie par l'expression :

$$\text{RMSNE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{Q_{\text{est},i} - Q_{\text{obs},i}}{Q_{\text{obs},i}} \right)^2} \quad (2.12)$$

où $Q_{\text{est},i}$ et $Q_{\text{obs},i}$ sont les valeurs de débits estimés et observés au site i et n est le nombre de sites considérés. Le débit de crues de PdR 100 ans est considéré et le Tableau 3 de Salinas *et al.* (2013) présente un résumé des 20 études recensées.

Pour les climats 'froids', classe auquel appartient le Québec méridional, les performances estimées sont très variables avec des valeurs de RMSNE variant de 0.85 à 0.30 (voir la Figure 2 de Salinas *et al.*, 2013). Rappelons que plus la valeur du RMSNE est près de zéro meilleure est la performance. La comparaison des performances selon le type d'approche (Figure 3 de Salinas *et al.*, 2013) suggère que les méthodes de régression sont moins performantes que les autres approches. Les méthodes géostatistiques quant à elles performeraient mieux. L'une des conclusions importantes de l'étude de Salinas *et al.* (2013) est que la performance globale, toutes méthodes confondues, de ces approches diminuent pour les plus petits BV (Figure 7 de Salinas *et al.*, 2013). Cette diminution de la performance suggère, comme la présente étude le montrera, que des facteurs hydrologiques spécifiques, plus locaux, jouent souvent un rôle important dans la réponse hydrologique des petits BV.

2.3 Modélisation hydrologique

La modélisation hydrologique est un domaine vaste et complexe avec une littérature très abondante. Ainsi la présente revue de littérature se limitera à décrire sommairement les modèles hydrologiques parcimonieux (MHP) ainsi que les modèles hydrologiques plus complexes (modèles physiques distribués ou semi-distribués) et à exposer les raisons justifiant de choisir un modèle simple dans le cadre de la présente étude (Section 2.3.1).

La Section 2.3.2 explique les raisons justifiant le choix, parmi les nombreux MHP proposés, du modèle GR5H. À noter que des revues de littérature plus complètes ont été réalisées aux cours des dernières années portant tant sur les MHP que les modèles hydrologiques plus complexes (voir p. ex. Islam, 2011; Jajarmizadeh *et al.* 2012 ; Devi *et al.* 2015 ; Sitterson *et al.* 2017).

2.3.1 Avantages et limites des modèles hydrologiques parcimonieux

D'entrée de jeu, il est pertinent de se questionner sur l'à-propos d'utiliser des MHP considérant qu'ils existent des modèles hydrologiques plus complexes (p. ex. les modèles distribués basés sur une représentation plus physique des processus hydrologiques où le territoire à l'étude est découpé en plusieurs sous-unités ; pour une revue de littérature sur les modèles hydrologiques à base physique voir Islam, 2011). Le qualificatif de MHP réfère ici à des modèles empiriques et/ou conceptuels où le BV est généralement représenté par une seule unité (modèle global) et où une combinaison d'équations conceptuelles cherche à reproduire les principaux processus hydrologiques.

Les deux principaux avantages des MHP sont, selon Jaiswal *et al.* (2020) : 1) une mise en place plus simple et rapide puisqu'ils requièrent moins de données et une caractérisation moins détaillée des BV ; 2) une calibration moins complexe et plus rapide en raison du faible nombre de paramètres.

À ces avantages s'ajoutent le fait qu'il n'est pas toujours évident qu'un modèle plus complexe est plus performant. Divers travaux ont montré que selon les contextes (climat, saison, etc.) et les variables considérées (étiage, crue extrême, bilan hydrologique, etc.), des modèles hydrologiques simples peuvent offrir des performances comparables voire, sous certaines conditions, supérieures à celles de modèles plus complexes (Orth *et al.* 2015 ; Sitterson *et al.* 2017 ; Jaiswal *et al.* 2020). Ces résultats suggèrent, tel que le mentionnent Orth *et al.* (2015), que l'ajout de paramètres et la complexification du modèle ne conduit pas toujours à une amélioration significative de la performance et que les MHP demeurent des options valables. Perrin *et al.* (2001) en arrivent à une conclusion similaire après comparaison de différents MHP, à savoir que l'augmentation du nombre de paramètres ne garantit pas une amélioration de la performance. L'ajout de paramètres conduirait souvent, selon ces auteurs, à une surparamétrisation du modèle et à une augmentation des incertitudes.

2.3.2 Sélection du modèle hydrologique parcimonieux

Il existe de nombreux MHP (pour une description des principaux MHP voir Perrin *et al.* 2001) ; Seiller et Anctil 2014 ; Arsenault *et al.* 2015). Un seul est considéré dans le cadre de ce projet, le modèle GR5H. Ce modèle est mieux connu sous sa version journalière, le modèle GR4J (Perrin *et al.* 2001 et 2003). Il s'agit d'une des nombreuses versions du modèle hydrologique GR (pour Génie Rural) où le chiffre indique le nombre de paramètres de calage du modèle et la lettre J ou H réfère à la résolution temporelle du modèle, J pour journalier et H pour horaire. Le Chapitre 3 de Mailhot *et al.* (2020) décrit l'évolution du modèle depuis sa version à trois paramètres GR3J.

Le modèle GR5H a été retenu dans le cadre de ce projet d'abord parce qu'il est connu de l'équipe de recherche et qu'il pouvait rapidement être mis en place et appliqué à d'autres BV. En effet, ce modèle a été appliqué à six BV dont les superficies variaient entre 1.5 et 265 km² avec des séries historiques de débits, de précipitations et de températures allant de 10 à 18 ans (Chapitre 9 de Mailhot *et al.* 2021).

La deuxième raison motivant ce choix est que ce modèle a été l'objet de nombreux travaux et études dans des contextes très variés. Le Chapitre 3 de Mailhot *et al.* (2020) recense 18 études dans lesquelles les modèles GR3J ou GR4J ont été utilisés pour différents contextes. Les principaux constats de l'examen de ces différentes applications sont les suivantes :

1. Elles s'intéressent à différentes problématiques, notamment aux prévisions hydrologiques ;
2. Plusieurs applications plus récentes concernent les impacts des changements climatiques sur les régimes hydrologiques ;
3. Le modèle est encore couramment utilisé comme le démontrent de nombreux articles récents ;
4. Le modèle est appliqué à des BV localisés dans plusieurs régions du monde ;
5. Les applications concernent majoritairement des BV de superficies moyennes (> 500 km²) ou de grande superficie (> 5 000 km²).

En ce qui concerne la version horaire du modèle, sept études ont été recensées (Mailhot *et al.* 2020). On remarque que les modélisations horaires ont surtout porté sur la prévision hydrologique, notamment en Australie (Li *et al.*, 2013, 2014, 2017; Bennet *et al.*, 2014) et au Canada (Han *et al.*, 2019). Les autres études recensées se sont plutôt intéressées à évaluer la performance du modèle, par exemple, pour des BV non jaugés à partir d'une paramétrisation estimée selon les caractéristiques physiographiques d'un BV donné

(Saadi *et al.*, 2019a) et pour des BV ayant une composante urbaine plus importante (Saadi *et al.*, 2019b).

Le Chapitre 6 donne plus de détails sur la structure du modèle GR5H et sa mise en place dans le cadre de ce projet. Le Chapitre 3 de Mailhot *et al.* (2020) peut également être consulté à cet effet.

2.4 Plateforme INFO-Crue et Atlas hydroclimatique

Les débits simulés dans le cadre du projet INFO-Crue et de l'Atlas hydroclimatique ont été utilisés dans la présente étude afin de : 1) comparer les quantiles des DMA estimés à partir de ces séries simulées aux DMA observés, aux DMA estimés avec le MHP et aux débits MÉRA (BV du Groupe A, Section 3.1) et 2) comparer les projections d'évolution future des DMA à celles obtenues en utilisant la MÉRA et les courbes IDF majorées (BV des Groupes A et C, Sections 3.1 et 3.3). La présente section décrit sommairement les données provenant de la plateforme INFO-Crue et de l'Atlas hydroclimatique utilisées dans le cadre de ce projet.

Deux types de données simulées ont été considérés à savoir les données simulées en climat de référence (1991-2017) de la plateforme INFO-Crue et les débits simulés en climat futur de l'Atlas hydroclimatique (DEH, 2018). Il est important toutefois de spécifier que dans le cadre de projet, les données de l'Atlas hydroclimatique proviennent d'une version plus récente (2020) qui n'a pas encore fait l'objet d'un rapport (communication personnelle d'Édouard Mailhot). Toutes ces simulations utilisent le modèle HYDROTEL (Fortin *et al.* 1995 ; Fossey *et al.* 2015) et considèrent l'ensemble des BV du Québec méridional.

Les débits reçus en climat de référence proviennent de la plateforme INFO-Crue, MG03HS (communication personnelle de Charles Malenfant). Ces simulations utilisent les données sur grille (GC3H) produites par le Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques (MELCC) (10 km x 10 km à un pas de temps 3 h couvrant la période 1991-2017). Les débits simulés pour les tronçons à l'exutoire des cinq BV du Groupe A (Section 3.1) et des 42 BV prioritaires (Groupe C, Section 3.3) d'INFO-Crue ont été considérés. Les quantiles de PdR 2 à 350 ans estimés à partir de ces séries ont été comparés aux quantiles observés et ceux des autres approches pour le Groupe A (MÉRA et MHP) et aux quantiles MÉRA pour les 42 BV prioritaires d'INFO-Crue (Groupe C).

Les simulations en climat futur de l'Atlas hydroclimatique couvrent la période 1950-2100 et utilisent les simulations des ensembles ClimEx (Leduc et al. 2019), CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment; Martynov et al. 2013) et CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5; Taylor et al. 2012). Toutefois, dans le cadre du présent projet, seul l'ensemble CMIP5 a été retenu aux fins d'analyses. Ce choix se justifie par l'échéancier du projet qui n'a pas permis de considérer toutes les simulations en climat futur issus des différents ensembles. Ces séries sont à un pas de temps journalier. Les scénarios de forçage radiatif RCP 4.5 et 8.5 ont été utilisés (Meinshausen et al. 2015). Un total de 99 simulations, 52 pour le RCP 4.5 et 47 pour le RCP 8.5, provenant de 29 modèles globaux du climat (MGC) ont été utilisées (Tableau 2.1). Les simulations CMIP5 ont été post-traitées avant leur utilisation par le modèle hydrologique (correction par quantiles en utilisant la grille produite par Ressources Naturelles Canada - McKenney et al., 2001; pour plus de détails sur la méthode de post-traitement, voir Rondeau-Genesse et Braun 2020).

Les paramètres de calage obtenus en climat de référence estimés à partir des précipitations et des débits observés (voir paragraphe précédent) ont été utilisés. Il est à noter que les débits simulés n'ont pas été post-traités, c'est-à-dire qu'il peut subsister des biais dans les débits simulés par rapport aux débits observés pour la période de référence. Trois périodes de 30 ans sont considérées : 2011-2040 (futur 1), 2041-2070 (futur 2) et 2071-2100 (futur 3). L'évolution future des quantiles des DMA est déterminée en estimant les différences entre quantiles de DMA de chaque période future et ceux en période de référence.

Des six différentes calibrations réalisées par l'équipe du MELCC, seule la calibration MG24HS a été considérée en climat de référence. Ce choix est basé sur le niveau de confiance des intervenants de la DEH vis-à-vis cette calibration et a été suggérée de manière générale lors des rencontres pour la réalisation du projet. Dès lors, il n'a pas été jugé nécessaire de retenir les cinq autres calibrations. Ces calibrations ont été développées afin d'analyser la sensibilité des projections à différentes paramétrisation du modèle hydrologique (communication personnelle de Charles Malenfant). Les autres paramétrisations n'ont pas été analysées dans le cadre du présent projet. Leurs analyses permettraient de déterminer leur impact sur les changements des DMA projetés et de voir dans quelle mesure ces changements sont peu ou très sensibles à la paramétrisation du modèle hydrologique.

2.5 Analyse critique des méthodes répertoriées et méthodes retenues

Les sections précédentes ont permis de faire un bilan de différentes approches d'estimation de débits de crues pour des BV non jaugés. Les prochaines sections reprennent les trois grands groupes d'approches et explique pourquoi certaines approches n'ont pas été retenues et identifient par le fait même celles retenues pour les analyses ultérieures.

Tableau 2.1 - Modèles globaux du climat et simulations utilisées dans l'Atlas hydroclimatique (DEH, 2018).

Modèles globaux du climat	Nombre de simulations	
	RCP 4.5	RCP 8.5
ACCESS1-0	1	1
ACCESS1-3	1	1
BCC-CSM1-1	1	1
BCC-CSM1-1-m	1	1
BNU-ESM	1	1
CMCC-CESM	0	1
CMCC-CM	1	1
CMCC-CMS	1	1
CNRM-CM5	1	1
CSIRO-Mk3-6-0	10	10
CanESM2	5	5
FGOALS-g2	1	1
GFDL-CM3	3	1
GFDL-ESM2G	1	1
GFDL-ESM2M	1	1
GISS-E2-H	1	0
GISS-E2-R	2	0
INMCM4	1	1
IPSL-CM5A-LR	4	4
IPSL-CM5A-MR	1	1
IPSL-CM5B-LR	1	1
MIROC-ESM	1	1
MIROC-ESM-CHEM	1	1
MIROC5	3	3
MPI-ESM-LR	3	3
MPI-ESM-MR	3	1
MRI-CGCM3	1	1
MRI-ESM1	0	1
NorESM1-M	1	1
Total	52	47

Il est important de rappeler que dans le cadre de ce projet les approches retenues doivent être :

- adaptées aux BV jaugés et non-jaugés de moins de 100 km² du Québec méridional;
- relativement simples à mettre en place ;
- applicables à grande échelle à partir des données physiographiques généralement disponibles;
- en mesure de fournir une estimation des incertitudes sur les quantiles de débits;
- utilisables pour développer des projections des débits de pointe en climat futur.

2.5.1 Méthodes empiriques de type méthode rationnelle

La version de la MÉRA développée par Mailhot *et al.* (2021) a été préférée aux autres approches du même type parce qu'elle a été adaptée et mise à jour à partir des données

de BV du Québec méridional dont la superficie est inférieure à 100 km². Dès lors, elle répond très bien à l'objectif principal du présent projet.

Les autres versions de la MÉRA ont été exclues essentiellement parce que les méthodes d'estimation des variables de la MÉRA, notamment le TC et CR, sont basées sur des méthodes non adaptées aux BV du Québec méridional ou dont la genèse est souvent inconnue, ou du moins très incomplète et obscure. D'autres ont été développées à partir de données de territoire ou de régions précises de sorte que ces méthodes sont difficilement transposables au Québec.

Les résultats de travaux visant à modifier la MÉRA dans le but de réduire soit l'incertitude ou encore le côté arbitraire de l'estimation de certains paramètres de la MÉRA n'ont pas été retenus. La principale raison est qu'aucune des études recensées ne démontre clairement que la nouvelle approche proposée pour l'estimation des paramètres de la MÉRA, par exemple en estimant le CR à partir des CN, diminue l'incertitude et améliore l'estimation des débits. De plus, une modification de l'estimation d'une variable de la MÉRA se traduit souvent par une complexification de la MÉRA dont l'un de ces principaux avantages réside précisément dans sa simplicité d'application. Finalement, ces travaux sont souvent testés sur un BV ou un nombre très limité de BV ce qui permet difficilement de tirer de conclusions probantes sur la performance de ces approches.

2.5.2 Analyse fréquentielle régionale des crues

Ces méthodes (indice de crue et régression) reposent sur l'identification de régions homogènes tant sur le plan géographique que physiographique et climatique. Or, pour le Québec, considérant l'étendue et la diversité du territoire en termes physiographiques et les différents facteurs pouvant affecter la pluviométrie, par exemple, la proximité avec le fleuve Saint-Laurent, il est difficile d'imaginer cette région comme étant homogène dans le sens de ces approches. Un découpage du territoire en sous-régions homogènes serait nécessaire pour appliquer l'une ou l'autre de ces méthodes. Mis à part la difficulté de sélectionner une méthode d'identification des régions homogènes et le temps nécessaire à l'application de cette méthode, ce découpage conduirait très vraisemblablement à des sous-régions où les densités de BV jaugés restent faibles. Ainsi certaines régions et types de BV risquent d'être sous-représentés rendant difficile la validation de ce type d'approche. L'enjeu de la disponibilité des données reste central et problématique pour la mise en place de méthode plus complexe.

Pour les méthodes géostatistiques, le seul fait qu'un réseau de station de jaugeage dense soit nécessaire suffit à éliminer ce type d'approche. Il n'existe pas à notre connaissance de BV au Québec ayant une densité de stations de jaugeage suffisante pour s'y attarder et encore moins lorsqu'il est question de BV de moins de 100 km².

2.5.3 Modélisation hydrologique

Le MHP GR5H a été retenu et privilégié à des modèles plus complexes en raison notamment de sa simplicité d'application (collecte de données, mise en place et calibration) condition nécessaire à sa mise en place à plus grande échelle. L'utilisation d'un modèle plus complexe sur plusieurs BV aurait été irréaliste considérant le temps de mise en place et la disponibilité des données.

Le modèle GR5H a été retenu parce qu'il est connu de l'équipe de recherche et qu'il pouvait rapidement être appliqué à d'autres BV. Il a été aussi fréquemment appliqué et utilisé dans le cadre de travaux s'intéressant notamment aux impacts hydrologiques des changements climatiques. Ainsi, ce choix répond à plusieurs des critères énumérés en début de section.

Il convient toutefois de rappeler certaines difficultés d'application du modèle GR5H à de petits BV. Tel qu'indiqué à la Section 2.3.2, ce modèle, peu importe la version, est rarement appliqué à des BV dont la superficie est inférieure à 500 km². Ainsi, considérant la petite superficie des BV sous étude et leurs temps de réponse relativement courts (de l'ordre de quelques heures; voir Chapitre 5), il est essentiel de mettre en place un modèle hydrologique qui puisse simuler les débits à un pas de temps sous-journalier, idéalement un pas de temps horaire. La mise en place de tels modèles présente deux défis majeurs. Le premier est que la grande majorité des modèles hydrologiques développés jusqu'ici simule à un pas de temps journalier. Le second est que la simulation des débits à des pas de temps sous-journaliers, p. ex. horaires, exige de disposer de données de précipitations et de températures sous-journalières de même que de mesures de débits sous-journaliers pour le calage du modèle. Or peu de stations hydrométriques et météorologiques enregistrant et archivant des données sous-journalières, et encore moins de stations localisées à proximité les unes des autres, sont disponibles. De plus, lorsqu'elles le sont, les données enregistrées à ces diverses stations doivent couvrir une période commune qui soit la plus longue possible, pour être utilisable pour caler le modèle

et réaliser des simulations. On le voit, plusieurs conditions doivent être satisfaites qui réduisent d'autant le champ des applications possibles.

Lorsque toutes ces conditions sont remplies, un autre enjeu est celui de la proximité entre le BV et la station météorologique retenue. En effet, la petite superficie des BV (moins de 100 km²) réduit les probabilités de trouver une station localisée dans les limites du BV et dès lors il est souvent nécessaire d'avoir recours à une station météorologique située à proximité. Toutefois ces données seront de moins à moins représentatives de la pluviométrie du BV à mesure que l'on s'éloigne de ce dernier et ce spécialement pour les événements pluvieux courts et intenses souvent localisés. Ainsi, même pour une station située à quelques kilomètres d'un BV, une pluie pourra être enregistrée sans qu'elle affecte le BV et donc qu'elle ne se traduise pas par une augmentation des débits, et, vice versa, une pluie pourra s'abattre sur le BV et générer une hausse des débits sans que la station pluviométrique n'enregistre de pluie. Ce type de situation a été observé à quelques reprises.

Une alternative aux données aux stations peut consister en l'utilisation de jeux de données, telles les réanalyses ou un ensemble de données interpolées sur grille. Une réanalyse consiste en une simulation d'un modèle météorologique à laquelle sont assimilées des données observées (pour une description d'une réanalyse voir Kay *et al.* 2015). Une réanalyse reproduit donc la séquence météorologique observée. Il existe plusieurs types de réanalyses de résolutions spatiales et temporelles différentes mais peu présentent des résolutions sous-journalières et des résolutions spatiales adéquates pour leur utilisation sur de petits BV. Enfin, les réanalyses ne sont pas exemptes de biais qui pourraient rendre leur utilisation problématique dans un contexte de modélisation hydrologique.

Les données interpolées sur grille sont des ensembles produits à partir de différents ensembles de données observées, essentiellement des données de stations météorologiques, qui sont interpolées spatialement sur une grille de résolution donnée. La qualité de ces ensembles dépend fortement de la densité de stations disponibles. Ces ensembles 'distribuent spatialement' l'information disponible aux stations et seront d'autant moins fiables que l'on s'éloignera des stations ou que l'on considérera des régions où la densité de stations est faible.

Aux incertitudes sur les valeurs mesurées comme telles, s'ajoutent les incertitudes et les biais liés à la modélisation météorologique pour les réanalyses et aux méthodes d'interpolation dans le cas des données sur grille. De ces différents ensembles, les données aux stations demeurent les valeurs les plus 'représentatives de la réalité' et les plus pertinentes particulièrement pour les petits BV où la météorologie locale est déterminante d'un point de vue hydrologique. Cependant, tel que mentionné plus haut, la couverture spatiale et temporelle offerte historiquement par les réseaux en place demeure insuffisante et donc problématique pour la modélisation hydrologique des petits BV.

CHAPITRE 3. BASSINS VERSANTS À L'ÉTUDE

Pour la réalisation de ce projet, un vaste échantillon de bassins-versants (BV) de moins de 250 km², à l'exutoire desquels des données de débits sont disponibles, a été considéré. Ces BV se trouvent au Québec, mais considérant le nombre restreint de BV jaugés de petites superficies au Québec, d'autres BV situés à l'extérieur de la province ont été recensés. Ces BV se trouvent en Ontario, au Nouveau-Brunswick (N-B) et dans les états du Nord-Est des États-Unis (Maine, Massachussets, New York et Vermont). Pour tous ces BV, le pas de temps d'archivage des données de débit est sous-journalier, généralement de 15 minutes, bien qu'il puisse varier de cinq à 60 minutes selon les BV.

Les BV considérés dans le cadre de cette étude ont été regroupés en fonction du type de données disponibles et des analyses possibles à partir de ces données. Le Tableau 3.1 présente les caractéristiques de ces différents groupes. Les paragraphes suivants donnent plus de détails sur certains des éléments apparaissant à ce tableau.

- **Stations hydrométriques avec plus de 15 ans de données observées valides :** une année est valide si la période du 1^{er} juin au 30 novembre compte moins de 20% de données non valides ou manquantes. La période 1^{er} juin – 30 novembre a été retenue puisque pour la Direction de l'expertise hydrique (DEH), elle correspond à la période estivale et désigne la période d'écoulement en eau libre (ce point est discuté à la Sections 4.2).
- **Tronçon modélisé INFO-Crue :** Ces tronçons où l'on retrouve des stations hydrométriques ont été modélisés dans le cadre de la plateforme INFO-Crue.
- **Bassin versant prioritaire INFO-Crue :** Il s'agit des 42 tronçons de la plateforme INFO-Crue jugés prioritaires par les intervenants de la DEH pour l'estimation des débits de pointe.
- **Application de la MÉRA :** Ces BV ont été caractérisés de manière à pouvoir estimer des débits de conception pour différentes PdR à partir de la MÉRA. Le Chapitre 5, ainsi que les Annexes E, F et G donnent tous les détails concernant la caractérisation des BV et l'application de la MÉRA. À noter que la MÉRA a pu être appliquée à tous les groupes de BV.
- **Application du modèle hydrologique GR5H :** Le MHP GR5H a été appliqué aux BV de ces groupes. Le Chapitre 6 donne tous les détails concernant le MHP GR5H et son application.

Tableau 3.1 – Caractéristiques des différents groupes de bassins versants considérés dans le cadre de la présente étude.

Caractéristique	Groupe						
	A	B	C ²	D	E	F	G
Nombre de bassins	5	9	42	10	34	30	23
Localisation	Québec			N-B ³	É-U ⁴	Ontario	Ontario-É-U
Superficie (km ²)	32 à 247	0.5 à 30	0.2 à 50	4 à 240	4 à 100	0.6 à 90	7 à 205
Nombres moyens d'années valides ¹ (min.-max.)	14.5 (11-19)	16.9 (11-22)	-	19.9 (14 - 24)	22.5 (13 - 29)	29.8 (15 - 50)	33.4 (16 - 50)
Tronçon modélisé INFO-Crue	Oui	Non	Oui	Non	Non	Non	Non
Bassin versant prioritaire INFO-Crue	Non	Non	Oui	Non	Non	Non	Non
Application de la MÉRA	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Application GR5H	Oui	Oui	Non	Non	Non	Non	Non

1. Une station est retenue si elle compte 15 années ou plus de données valides (une année valide compte moins de 20% de données non valides pendant la période du 1 juin au 30 novembre).

2. Le Groupe C comprend tous les BV prioritaires INFO-Crue pour lesquels aucune donnée observée n'est disponible. Il s'agit du seul groupe sans débit mesuré.

3. Nouveau-Brunswick

4. États-Unis

Les prochaines sections décrivent chacun des groupes de BV à l'étude ainsi que les analyses qui seront réalisées pour chacun de ces groupes.

3.1 Groupe A (Québec)

Les BV du Groupe A comprennent à la fois des BV avec des données observées et des données simulées par la plateforme INFO-Crue. Ainsi, pour ces BV, les quantiles de débits observés peuvent être comparés aux débits estimés par la MÉRA et aux débits simulés par INFO-Crue et le MHP. Le Tableau A.1 de l'Annexe A présente les principales caractéristiques des cinq stations hydrométriques du Groupe A (identification de la station, localisation, années d'opération, années disponibles et résultat du test de tendance) et identifie le tronçon INFO-Crue correspondant. La carte de la Figure 3.1 localise les stations du Groupe A (points bleus).

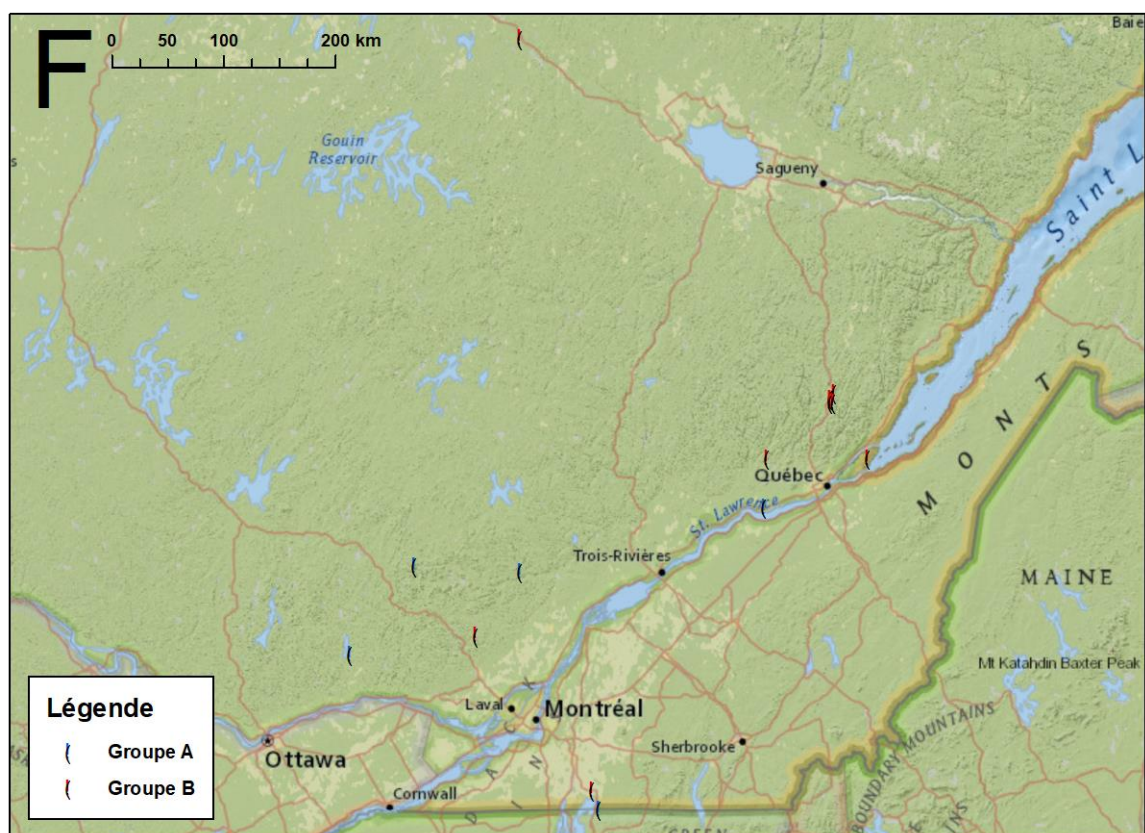


Figure 3.1 – Localisation des stations des BV des Groupes A et B (Québec).

3.2 Groupe B (Québec)

Le Groupe B inclut les BV où l'on ne dispose que de données observées. Aucun de ces BV n'est simulé dans la plateforme INFO-Crue. Ainsi, pour ce groupe de BV, il est possible de comparer les quantiles de débits observés aux débits estimés à partir de MÉRA et aux débits simulés par le MHP. Le Tableau A.1 de l'Annexe A décrit les principales informations relatives aux stations du Groupe B (identification de la station, localisation, années d'opération, années disponibles et résultat de test de tendance). La carte de la Figure 3.1 localise ces stations (points rouges).

3.3 Groupe C (Québec)

Les BV du Groupe C proviennent d'une liste de tronçons et de BV jugés prioritaires par les intervenants de la DEH. Il s'agit de BV de moins de 50 km², comportant des zones urbaines, et dont les débits simulés par la plateforme INFO-Crue sont jugés plus incertains puisque le modèle hydrologique simulant ces débits est moins bien adapté à ce type de BV.

Au départ, la liste des BV du Groupe C comptait 75 BV. Elle a toutefois été réduite à 42 BV considérant que plusieurs de ces 75 BV étaient des sous-bassins de BV déjà inclus dans la liste des BV prioritaires. Le Tableau A.2 de l'Annexe A présente les BV finalement retenus pour le Groupe C alors que le Tableau A.3 présente les BV de la liste initiale des 75 BV qui n'ont pas été intégrés au groupe C. La carte de la Figure 3.2 localise les tronçons à l'exutoire des BV du Groupe C.

On ne dispose pour les BV de ce groupe que des débits simulés par la plateforme INFO-Crue. Ainsi, aucune comparaison des quantiles simulés aux quantiles observés n'est possible. Une comparaison des quantiles simulés par INFO-Crue avec ceux simulés à partir de la MÉRA sera toutefois possible.

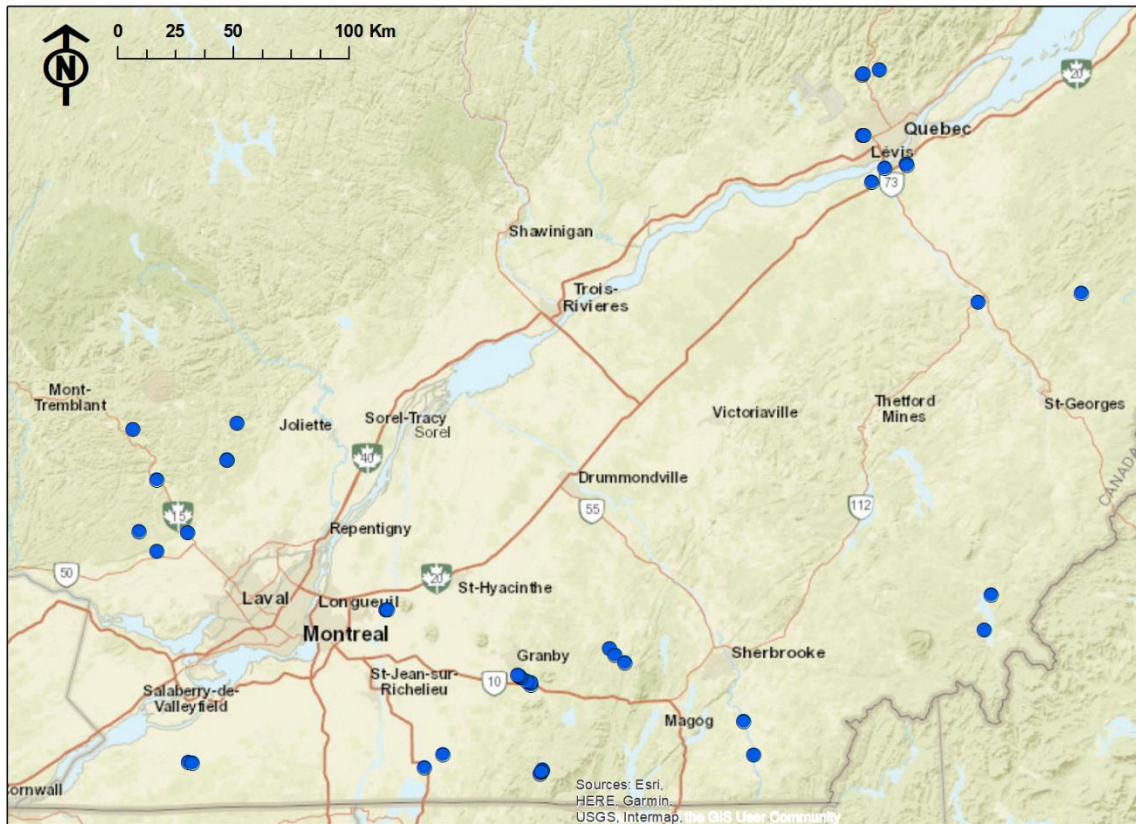


Figure 3.2 – Localisation des tronçons à l'exutoire des BV du Groupe C (Québec).

3.4 Groupe D (Nouveau-Brunswick)

Les BV du Groupe D se trouvent au Nouveau-Brunswick (N-B) et sont situés en amont de stations hydrométriques pour lesquels on dispose de débits observés. Il est dès lors possible pour ces BV de comparer les quantiles de débits de crues obtenus avec la MÉRA

aux quantiles de débits observés. L'intérêt de ce groupe est qu'il permet d'augmenter l'échantillon de petits BV pour lesquels des données de débits sont disponibles considérant que les BV répondant à ces critères sont peu nombreux au Québec.

Le Tableau A.4 de l'Annexe A présente les principales informations relatives à ces stations (identification de la station, localisation, années d'opération, années disponibles et résultat du test de tendance). La carte de la Figure 3.3 permet de les localiser.



Figure 3.3 - Localisation des stations du Groupe D (Nouveau-Brunswick).

3.5 Groupe E (États-Unis)

Les BV du Groupe E se trouvent aux États-Unis, plus particulièrement dans les états du Nord-Est (New York, Massachussets, Vermont et Maine). Des données de débits à l'exutoire de ces BV sont disponibles. Il est possible pour ces BV de comparer les

quantiles de débits de crues obtenus avec la MÉRA aux quantiles de débits observés. L'intérêt de ce groupe de BV est similaire à celui du Groupe D à savoir d'augmenter l'échantillon de petits BV pour la validation de la MÉRA.

Le Tableau A.5 de l'Annexe A présente les principales informations relatives à ces stations de jaugeage (identification de la station, localisation, années d'opération, années disponibles et résultat du test de tendance). La carte de la Figure 3.4 permet de les localiser.

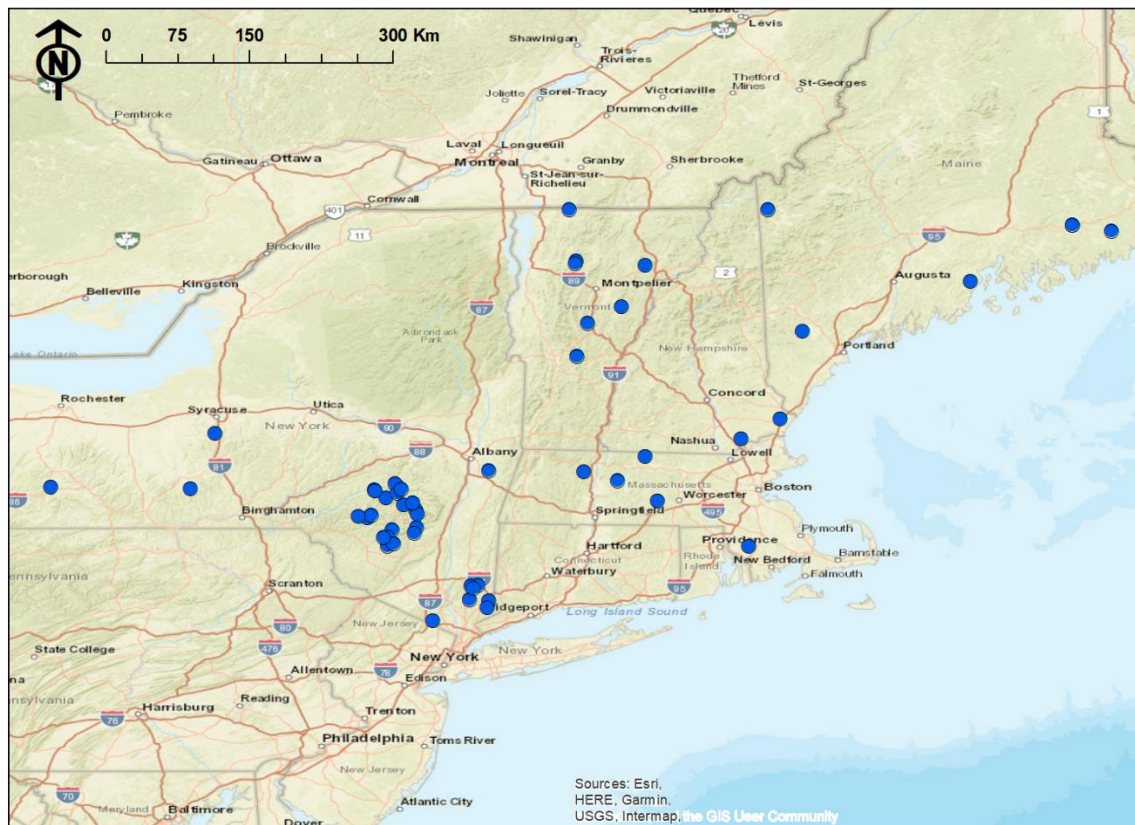


Figure 3.4 - Localisation des stations du Groupe E (États-Unis).

3.6 Groupe F (Ontario)

Les BV du Groupe F se trouvent en Ontario et sont situés en amont de stations hydrométriques. Les quantiles de débits de crues estimés à partir de la MÉRA peuvent donc être comparés aux quantiles de débits observés. Ce groupe s'ajoute aux Groupes D et E et augmente l'échantillon de petits BV où l'on dispose de débits mesurés.

Le Tableau A.6 de l'Annexe A présente les informations relatives à ces stations (identification de la station, localisation, années d'opération, années disponibles et résultat du test de tendance). La carte de la Figure 3.5 permet de les localiser.

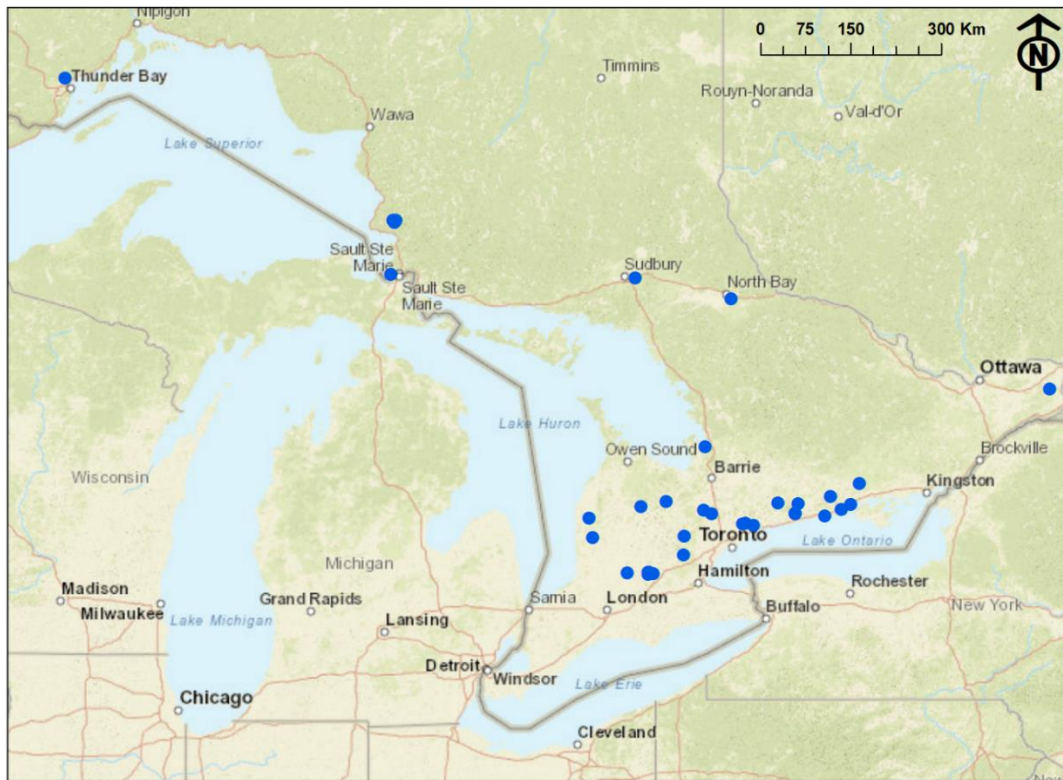


Figure 3.5 - Localisation des stations du Groupe F (Ontario).

3.7 Groupe G (Urbain)

Les BV du Groupe G se trouvent très majoritairement en Ontario, mais aussi aux États-Unis et sont situés en amont de stations hydrométriques. Ce groupe de BV est caractérisé par la présence d'une occupation urbaine supérieure à 10 %, pouvant atteindre 96 % et d'en moyenne 39.3 %. Il est important de noter qu'aucun BV situé au Québec ou au N-B ne répondait aux critères de ce groupe. L'intérêt de ce groupe est qu'il permet d'évaluer la performance de la MÉRA pour des BV possédant une fraction urbaine importante.

Le Tableau A.7 de l'Annexe A présente les principales informations relatives à ces stations (identification de la station, localisation, années d'opération, années disponibles et résultat du test de tendance) alors que la carte de la Figure 3.6 permet de les localiser.

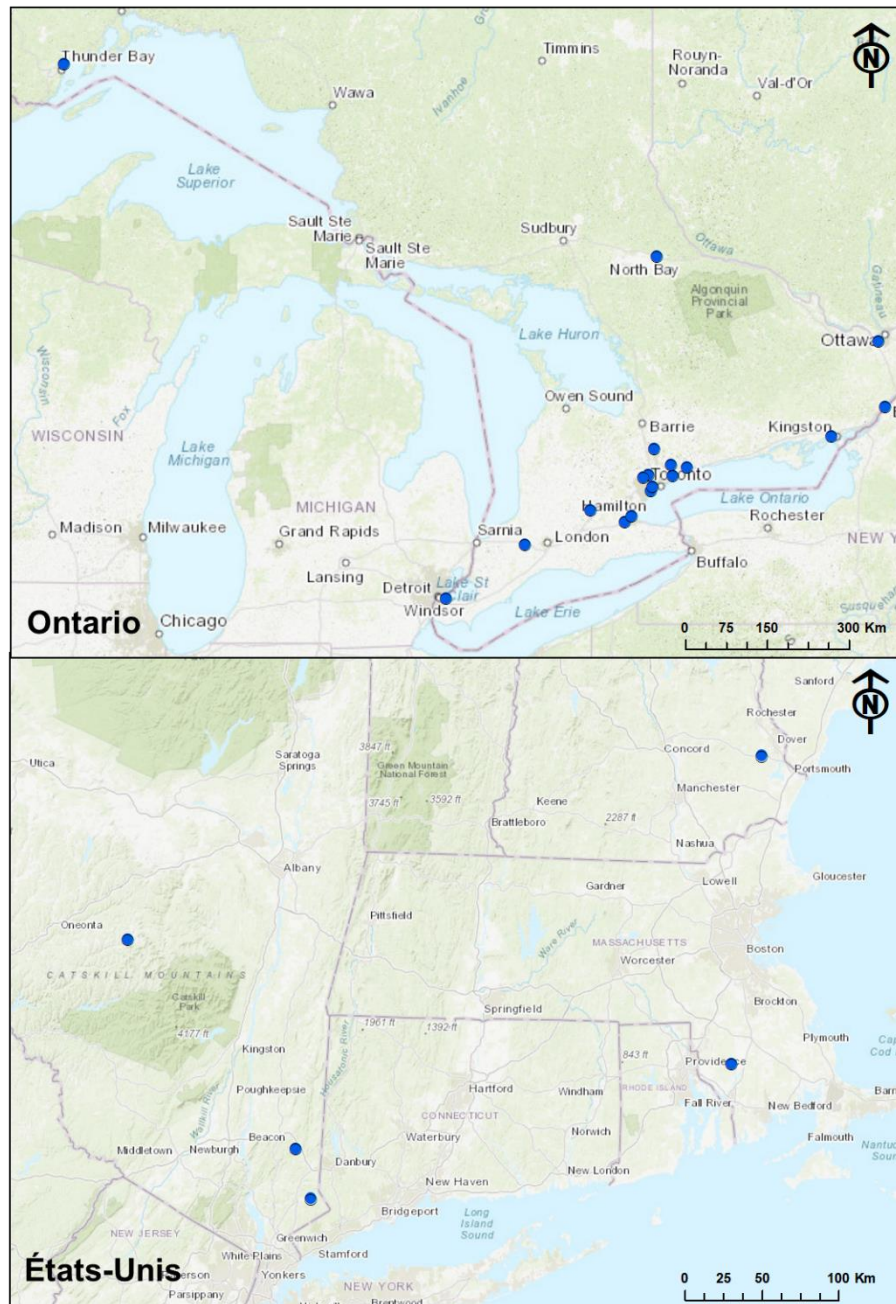


Figure 3.6 - Localisation des stations du Groupe G (Ontario et États-Unis).

CHAPITRE 4. ESTIMATION DES QUANTILES DES DÉBITS DE CRUES

Le présent chapitre rend compte des travaux portant sur l'estimation des débits de crues annuels. Ces valeurs, estimées à partir des séries observées ou des séries simulées dans le cadre d'INFO-Crue ou de l'Atlas hydroclimatique, seront comparées entre elles afin d'évaluer la performance relative des différentes méthodes. Le chapitre est structuré de la façon suivante. La Section 4.1 présente un certain nombre de considérations préliminaires sur les débits de crues et l'analyse fréquentielle. La section 4.2 présente les résultats de quelques analyses préliminaires concernant la disponibilité des données alors que la Section 4.3 discute des tendances observées dans quelques séries historiques de débits. La fréquence mensuelle d'occurrence des débits maxima annuel (DMA) observés aux stations est discutée à la Section 4.4. Enfin, la section 4.5 discute de l'estimation des quantiles extrêmes.

4.1 Considérations préliminaires

L'approche standard, dite méthode de maxima par bloc (ou *block maxima method*), pour l'estimation des quantiles de débits extrêmes consiste à construire les séries des DMA et d'ajuster ensuite ces séries à une distribution donnée. Les quantiles de différentes PdR sont ensuite estimés à partir de cette distribution. D'autres approches existent, la plus connue étant l'approche *Peak Over Threshold* (ou POT) mais ne sera pas considérée dans le cadre de la présente étude. Bien que cette dernière présente certains avantages par rapport à l'approche *block maxima*, elle exige de définir un seuil et de s'assurer de l'indépendance des valeurs extraites de la série brute ce qui peut s'avérer difficile particulièrement pour des séries de débits temporellement corrélées (pour une discussion de ces approches voir Coles 2001).

La question de la période annuelle à considérer pour l'extraction des DMA est importante dans le contexte du présent projet. En effet, la nature et les processus hydrologiques générateurs de crues au Québec varient sensiblement tout au long de l'année. Ainsi si les crues printanières représentent très souvent les crues les plus importantes au Québec (ce point est discuté à la Section 4.4), des crues estivales, automnales ou même hivernales sont possibles qui parfois, pour une année donnée, pourront générer des débits supérieurs à la crue printanière. Il faut se souvenir toutefois que la MÉRA ne considère que les crues en eau libre associées à des épisodes de précipitations liquides extrêmes

et, à ce titre, les quantiles de crues extrêmes estimés par la MÉRA ne concernent que les crues survenant pendant l'été ou l'automne.

Un autre élément à prendre en considération est la disponibilité et la qualité des débits mesurés aux stations. Un examen des données colligées montre en effet que les données en périodes hivernales (en présence de couvert de glace soit de décembre à mars selon les régions) sont souvent manquantes et on peut présumer de qualité douteuse lorsque disponibles, notamment à cause de la présence d'un couvert de glace. Ce point est développé à la Section 4.2.

Ces diverses considérations conduisent donc à restreindre la période annuelle utilisée pour l'extraction des DMA à la période de juin à novembre. Pour l'ensemble des BV sous étude, cette période correspond généralement à une période d'écoulement en eau libre et les crues qui y seront enregistrées seront associées à des événements de pluies intenses en absence de neige au sol et de couvert de glace en rivière. Le mois de mai a été exclu puisque les crues printanières à certains BV plus au nord peuvent survenir durant ce mois. Les analyses justifiant ce choix sont présentées à la Section 4.4.

4.2 Analyses préliminaires des séries de débits disponibles aux stations

Un examen préliminaire des séries disponibles aux stations hydrométriques des BV sous étude confirme l'existence de plusieurs données manquantes. La Figure 4.1 montre les périodes couvertes par les données disponibles à certaines stations (les figures correspondantes pour les autres stations sont regroupées à l'Annexe B). Cette figure montre une couverture très inégale selon les saisons et selon les stations. Ainsi plusieurs stations ne disposent pas de données en périodes hivernales avant 1995 alors que d'autres stations n'enregistrent jamais de données en hiver (voir Figure 4.1).

La Figure 4.2 des distributions du nombre moyen de données disponibles aux stations pour chaque mois de l'année confirme cette observation. On constate que si pour les mois d'avril à octobre ce nombre avoisinent 90% en moyenne, il chute de façon marquée pour les mois d'hiver pour se situer à environ 45 % en moyenne pour les mois de janvier et février alors que sept et onze stations ne présentent aucune donnée pour les mois de janvier et février respectivement.

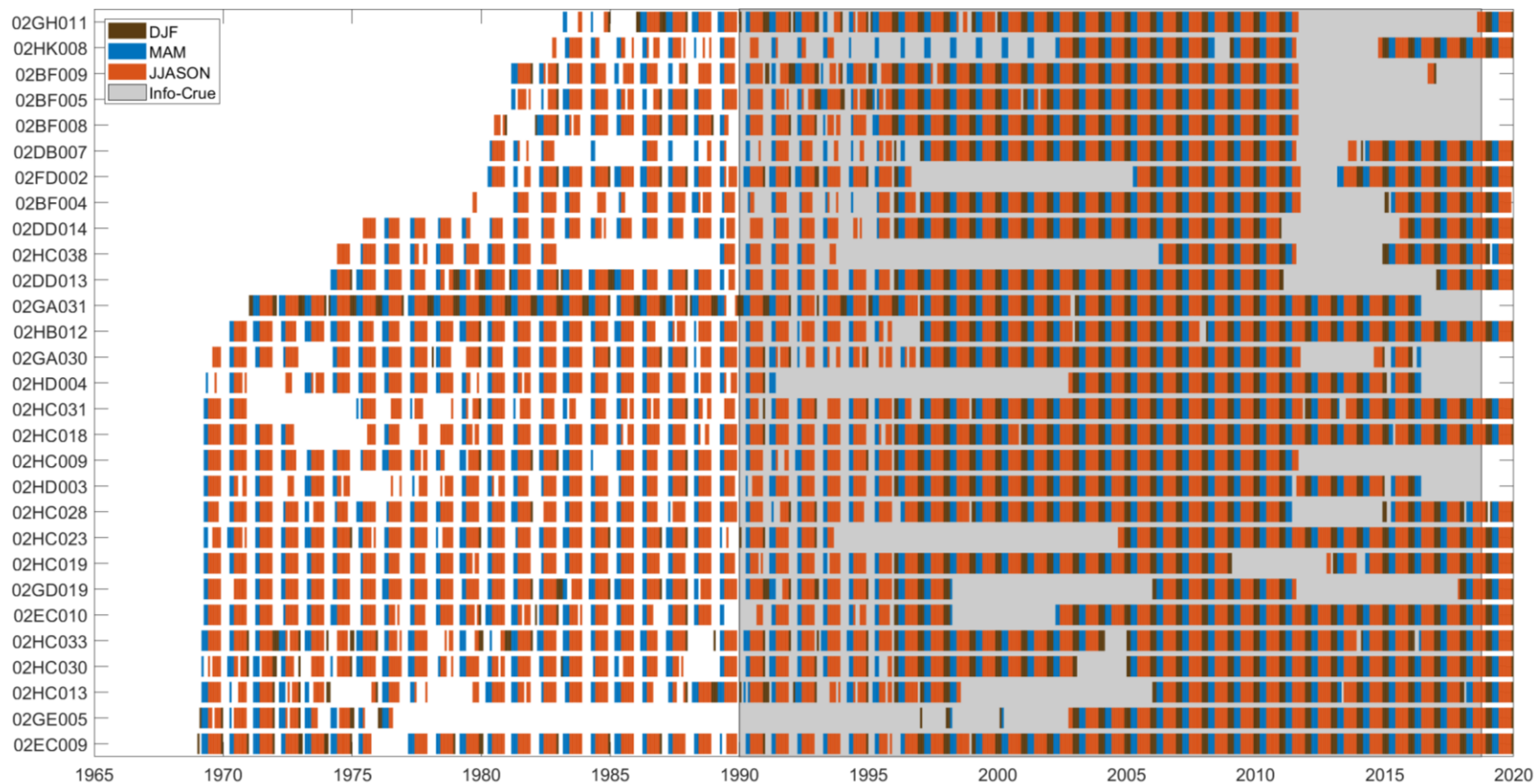


Figure 4.1 - Périodes couvertes par les données hydrométriques aux stations sous étude. Les stations sont ordonnées en fonction de leur date de mise en opération. Les zones en blanc correspondent aux périodes où les données sont manquantes. Le code de couleur identifie les périodes suivantes de l'année : 1) décembre-janvier-février (en marron); 2) mars-avril mai (en bleu); 3) juin à novembre (en rouge) et la période de simulation INFO-Crue (en gris).

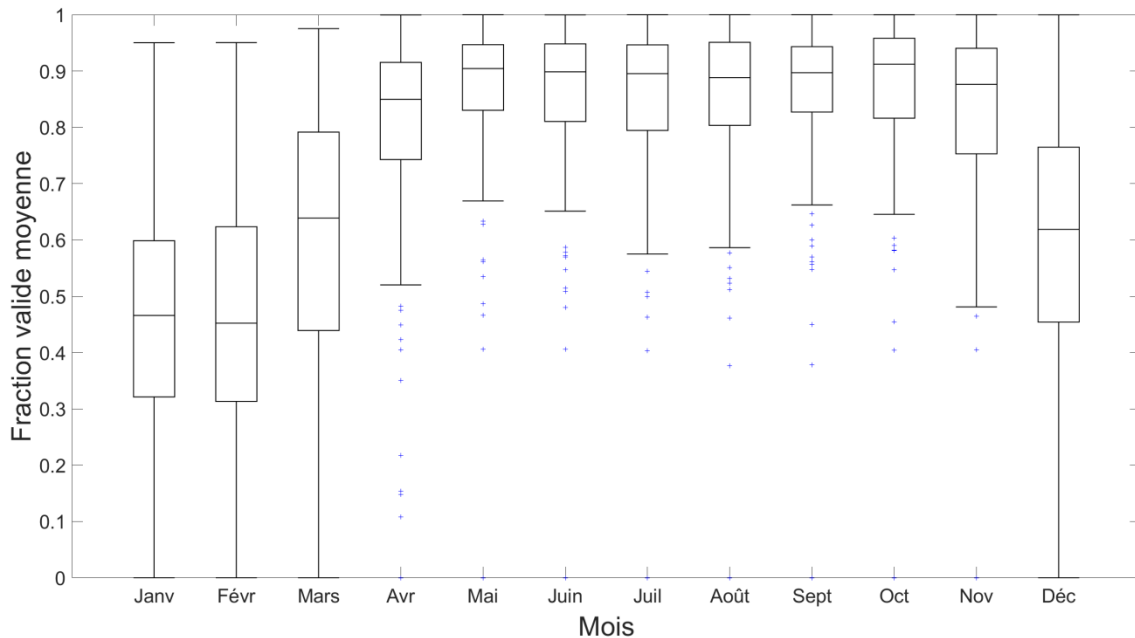


Figure 4.2 - Distributions des fractions moyennes de données disponibles aux stations pour chaque mois de l'année.

Cette absence plus ou moins grande de données à certaines stations pendant certaines périodes de l'année doit être mise en relation avec les périodes de l'année où il est plus probable d'observer les débits de crues. Tel que mentionné plus tôt, la MÉRA est utile pour l'estimation des débits de crues en eau libre associés aux événements de pluie intenses en absence de couvert de neige. Ces événements et les crues résultantes surviennent en période estivale et automnale au Québec soit *grosso modo* la période de juin à novembre. Or, heureusement cette période semble généralement bien couverte par les données disponibles (Figure 4.2).

Considérant la quantité importante de données manquantes, il est nécessaire de définir un ensemble de critères permettant de définir une année valide et d'identifier les stations valides qui seront utilisées dans le cadre de l'étude. Ainsi une année valide devra comporter moins de 20% de données manquantes sur la période annuelle considérée, dans le cas présent la période de juin à novembre. Ce critère peut paraître permissif mais imposer un pourcentage moindre résulterait en une réduction marquée du nombre d'années valides. Par ailleurs une station sera valide et retenue pour la suite des analyses si elle compte 15 années valides ou plus. Cette dernière valeur a été retenue puisque l'ajustement d'une distribution à une série de DMA de moins de 15 années est beaucoup

trop incertaine pour justifier son utilisation pour l'estimation de quantiles de PdR élevées (p. ex. 100 ou 350 ans).

Après application de ces critères, 111 stations ont été retenues avec un nombre d'années valides allant de 15 à 50 années pour une moyenne de 25 années valides par station.

4.3 Analyse de tendances des DMA

Les DMA ont été extraits aux stations avec 15 années ou plus de données valides pour la période de juin à novembre. Le test de Mann-Kendall a ensuite été appliqué à ces séries. Une tendance sera statistiquement significative si l'hypothèse nulle (absence de tendance) est rejetée au seuil de significativité 5%. Les résultats du test de tendance pour l'ensemble des sites à l'étude sont présentés à l'Annexe A.

De ces stations, 14 présentent des tendances significatives (13 à la hausse et une seule à la baisse) (voir le Tableau 4.1). Un examen des séries révèle certaines anomalies (p. ex. Eel River near Dundee, N.B. 01BJ012) qui jettent une ombre sur la validité de ces séries. Par ailleurs, huit de ces stations avec tendances (les huit dernières du Tableau 4.1) font partie du Groupe G des BV urbains. Ces séries couvrent pour la plupart une période relativement longue (de 30 à plus de 40 ans dans plusieurs cas) ce qui suggère que l'urbanisation progressive de ces BV pourrait être la cause de ces tendances observées.

Les Figures 4.3 à 4.6 montrent deux exemples de BV avec de telles tendances (02EC009 et 02HC030) et où l'occupation urbaine, et par conséquent les surfaces imperméables, ont augmenté considérablement en 35 ans. Dans le cas du BV en amont de la station 02EC009, l'occupation urbaine est passée d'environ 11 % en 1984 à près de 52% en 2019 (Figure 4.3) alors que pour le BV en amont de la station 02HC030, l'occupation urbaine a progressivement augmenté de 40% en 1982 à 70% en 2019 (Figure 4.6). Les DMA moyens ont dès lors progressivement augmenté d'un facteur 2 à 3 pour le BV de la station 02EC009 (Figure 4.4) et d'un facteur 2 pour le BV de la station 02HC030 (Figure 4.5). Des modifications de l'occupation du territoire d'une telle ampleur sont très vraisemblablement à l'origine des tendances observées dans les DMA. Un constat similaire vaut pour plusieurs des BV urbains avec des séries des DMA caractérisées par des tendances significatives.

La dernière colonne du Tableau 4.1 indique quelles stations ont été éliminées des analyses. Les principales raisons justifiant ces choix sont : 1) la présence d'une ou de plusieurs valeurs 'anormales' (p. ex. station 01BJ012); 2) des tendances 'suspectes' (p. ex. station 01AK006); 3) la présence de ruptures et de périodes prolongées sans données (p. ex. station 02HC023). Cinq stations sont ainsi éliminées dont une station du Groupe G (station 02HC013). Aucune des séries INFO-Crue aux 47 BV sous étude ne présente de tendance significative au seuil 5%.

Tableau 4.1 - Liste des stations avec plus de 15 années valides (période de juin à novembre) avec des tendances (test de Mann-Kendal au seuil de significativité de 5%).

Station (identifiant)	Nombre années valides	p-value	Commentaires
Middle Branch Nashwaaksis Stream at Sandwith's Farm, N.B. (01AK006)	17	< 0.01	Tendance à la hausse très marquée – série éliminée
Eel River near Dundee, N.B. (01BJ012)	23	0.04	Deux dernières années (20981 et 2019) avec DMA anormalement élevées ($\approx 200\text{m}^3/\text{sec}$ alors que les DMA des années antérieures sont de $\approx 15\text{-}20\text{m}^3/\text{sec}$) – série éliminée
Rivière Caraquet at Burnsville, N.B. (01BL002)	23	< 0.01	Tendance à la hausse très marquée et variabilité des DMA plus importante en période récente – série éliminée
Branch River at Beersvillen N.B. (01BS001)	19	0.78	DMA anormalement élevées en 2014 ($\approx 224\text{m}^3/\text{sec}$) sur une durée de 15 minutes sans montée ni relaxation des débits avant et après– série éliminée
Beatty Saugeen River near Holstein, Ont. (02FC017)	19	0.224	Rupture de 12 ans dans la série (1994-2005) - série éliminée
Trout Creek near Fairview (02GD019)	42	0.06	Rupture de 8 ans dans la série (1998-2005) - série éliminée
Cold Creek near Bolton, Ont. (02HC023)	38	< 0.01	Aucun DMA entre de 1993 à 2004; DMA généralement plus élevés et variables après cette période – série éliminée
Rawdon Creek near West Hintingdon (02HK008)	20	0.71	Rupture de 12 ans dans la série (1990-2001) - série éliminée
Mill Brook, N.-Y. (NY_01414500)	26	0.03	Hausse marquée et variabilité plus importante au cours des dernières décennies – série éliminée
Pike River, Vermont (Vt_04294300)	18	0.04	Baisse progressive des DMA; deux années en débit de série avec des DMA plus élevées que les autres années – série conservée

Station (identifiant)	Nombre années valides	p-value	Commentaires
Holland River at Holland Landing, Ont. (02EC009)	49	< 0.01	Hausse très progressive des DMA et de la variabilité – série conservée
Grinstone Creek near Aldershot, Ont. (02HB012)	48	0.04	Tendance à la hausse progressive avec DMA très supérieure aux autres DMA en 2006 – série conservée
East Humber River near Pine Grove, Ont. (02HC009)	39	0.02	Variabilité interannuelle des DMA augmente avec le temps – série conservée
Highland Creek near West Hill, Ont. (02HC013)	35	< 0.01	Hausse marquée pendant la période 1969-1989 avec série stationnaire après 1980; absence de DMA sur période 1999- 2005 – série éliminée
Lynde Creek near Whitby, Ont. (02HC018)	45	0.02	Hausse très progressive et soutenue des DMA – série conservée
Etobicoke Creek below Queen Elizabeth Highway, Ont. (02HC030)	46	< 0.01	Hausse progressive et soutenue des DMA – série conservée
West Humber River at Highway No. 7, Ont. (02HC031)	44	0.04	Faible variabilité de 19689 à 1984; forte variabilité par la suite – série conservée
Mimico Creek at Islington, Ont. (02HC033)	46	0.02	Hausse progressive de 1969 à 1985 – série conservée

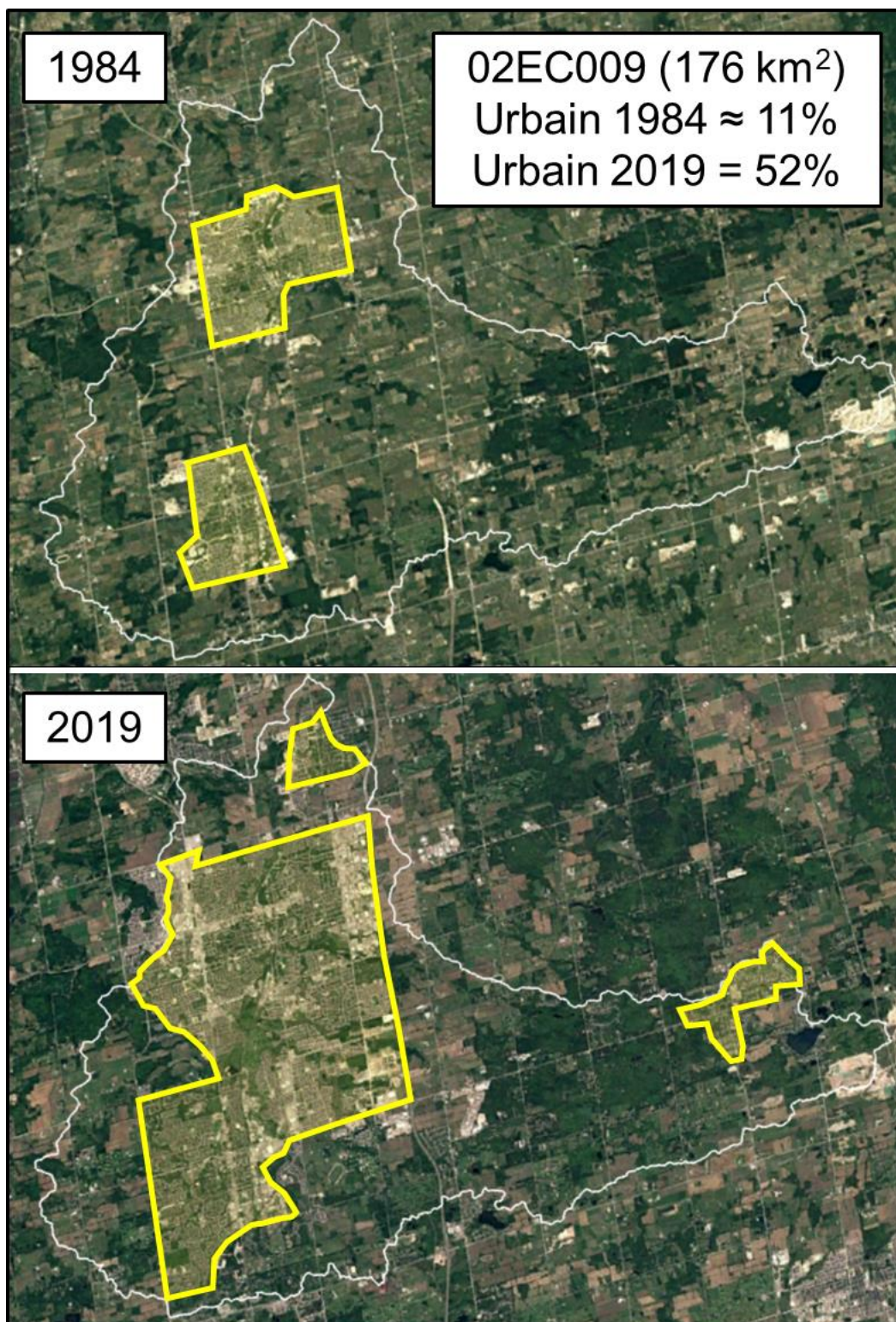


Figure 4.3 – Occupation urbaine (%) pour le BV 02EC009 (Ontario) entre 1984 et 2019. Les zones jaunes délimitent les principales zones urbaines et la ligne blanche délimite le bassin versant.

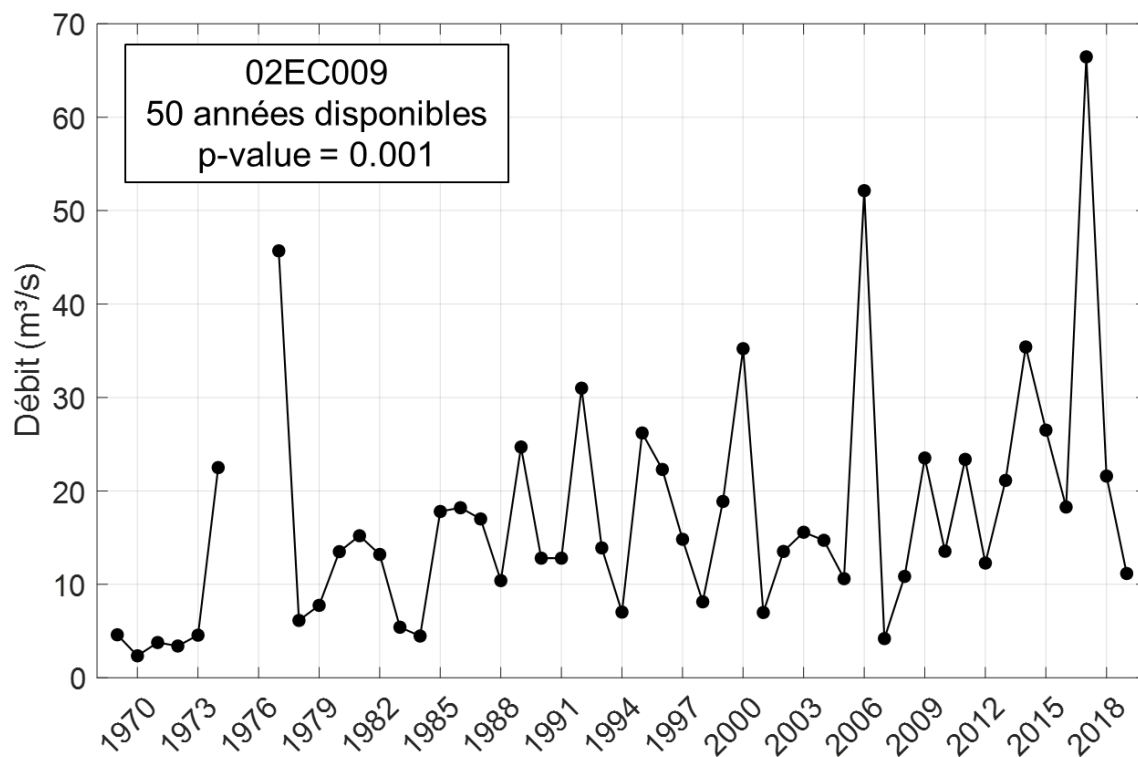


Figure 4.4 – Série des débits maxima annuels pour le BV 02EC009 (Ontario).

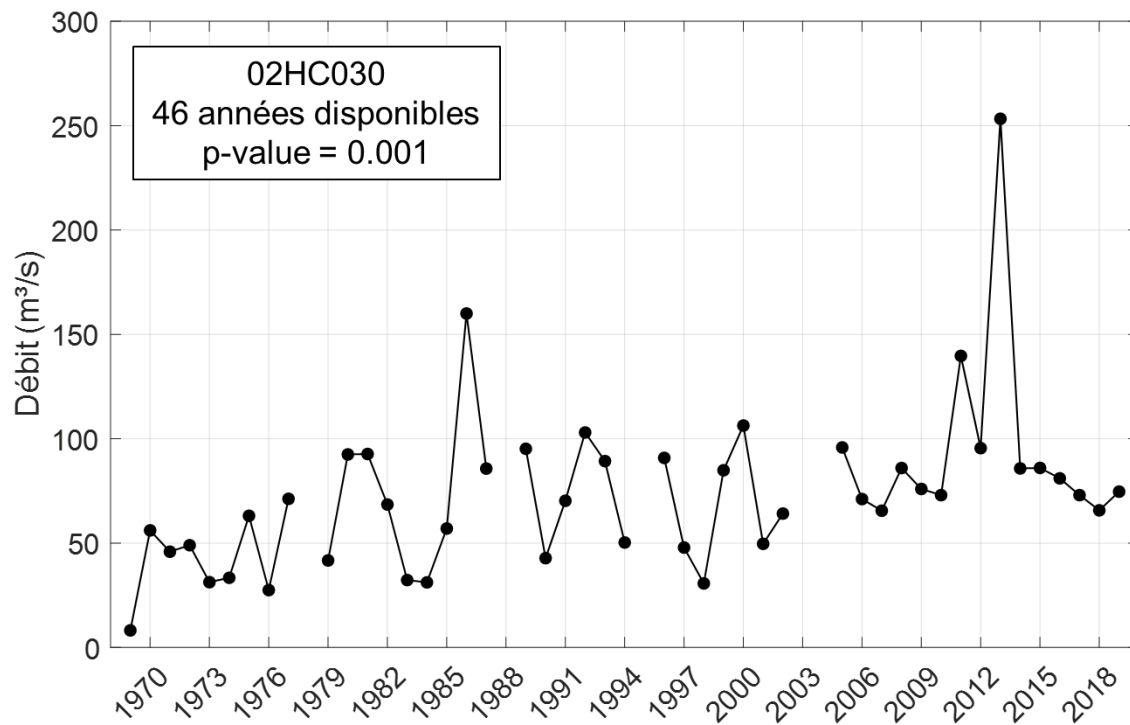


Figure 4.5 - Série des débits maxima annuels pour le BV 02HC030 (Ontario).

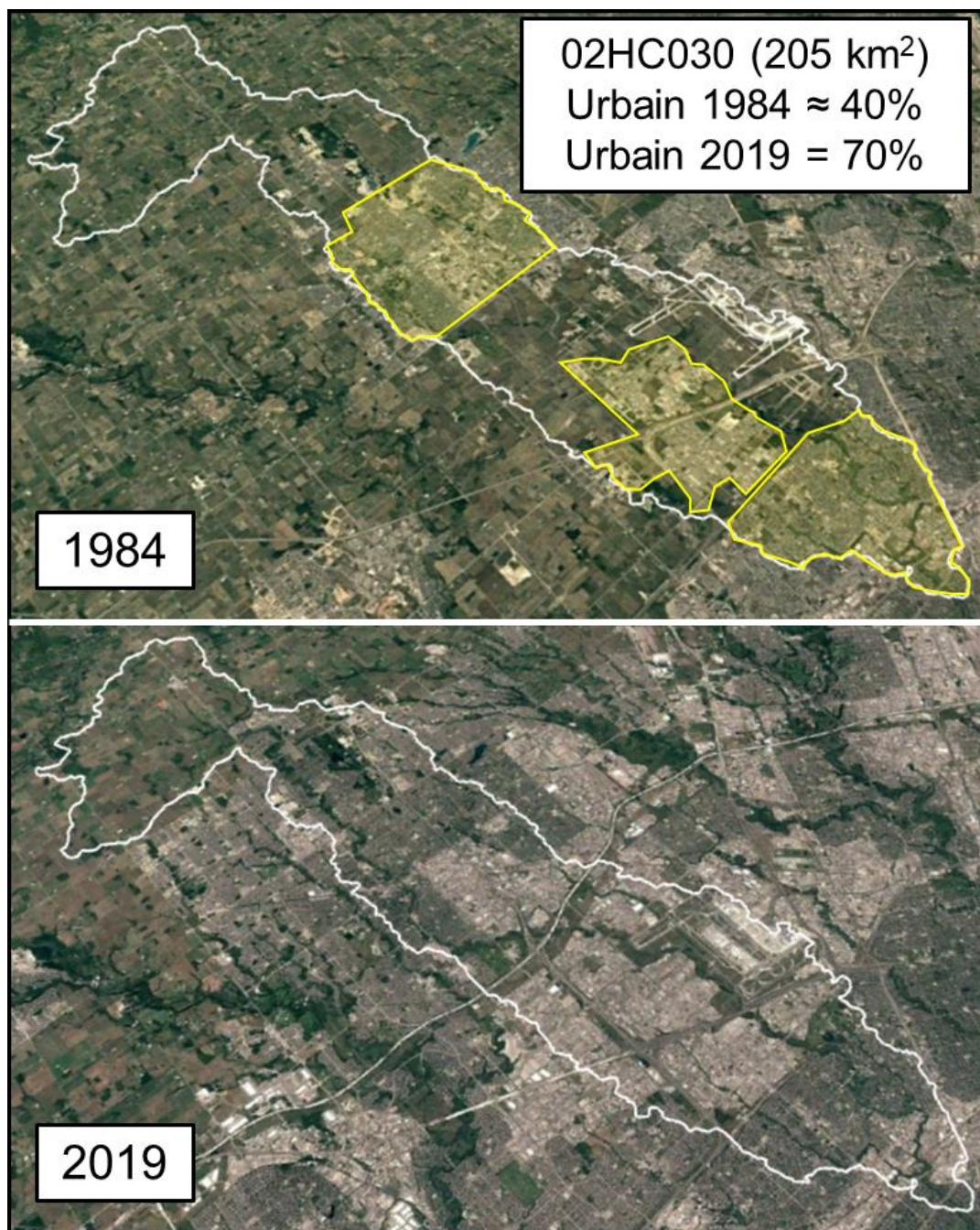


Figure 4.6 - Occupation urbaine (%) pour le bassin versant 02HC030 (Ontario) entre 1984 et 2019. Les zones jaunes délimitent les principales zones urbaines en 1984 et la ligne blanche délimite le bassin versant. À noter qu'en 2019 le bassin versant est presque entièrement urbain à l'exception d'une zone en amont.

4.4 Mois d'occurrence des DMA

Tel que mentionné précédemment, la MÉRA permet l'estimation des débits de crues associés aux pluies intenses en conditions d'eau libre et en absence de couvert de neige donc survenant pendant la période de juin à novembre. Dès lors se pose la question de savoir dans quelle mesure les crues maximales annuelles surviennent pendant cette période de l'année.

Afin de répondre à cette question les stations hydrométriques avec des données disponibles pendant toutes l'année ont été analysées. Un total de 114 stations a ainsi été considéré avec quatre années ou plus de données valides (moins de 20% de données manquantes sur la période de janvier à décembre). Les DMA sur la période de janvier à décembre ont été extraits de même que la date d'occurrence de ces DMA. La fréquence mensuelle d'occurrence des DMA a ensuite été estimée en combinant les mois d'occurrence pour toutes les années valides et toutes les stations.

La Figure 4.7 montre très clairement que les crues annuelles surviennent dans une large mesure en mars, avril ou mai (46.8% des cas) alors que la probabilité d'observer la crue annuelle pendant la période de juin à novembre est de 33.3%. Enfin les crues hivernales (décembre, janvier ou février) représentent 19.9% des cas. La Figure 4.8 donne un aperçu de la distribution des probabilités d'occurrence des DMA pendant la période de juin à novembre aux différentes stations. On voit que ce nombre est variable selon les BV mais que très majoritairement entre 20 et 50 % des crues aux BV sous étude surviennent pendant la période de juin à novembre.

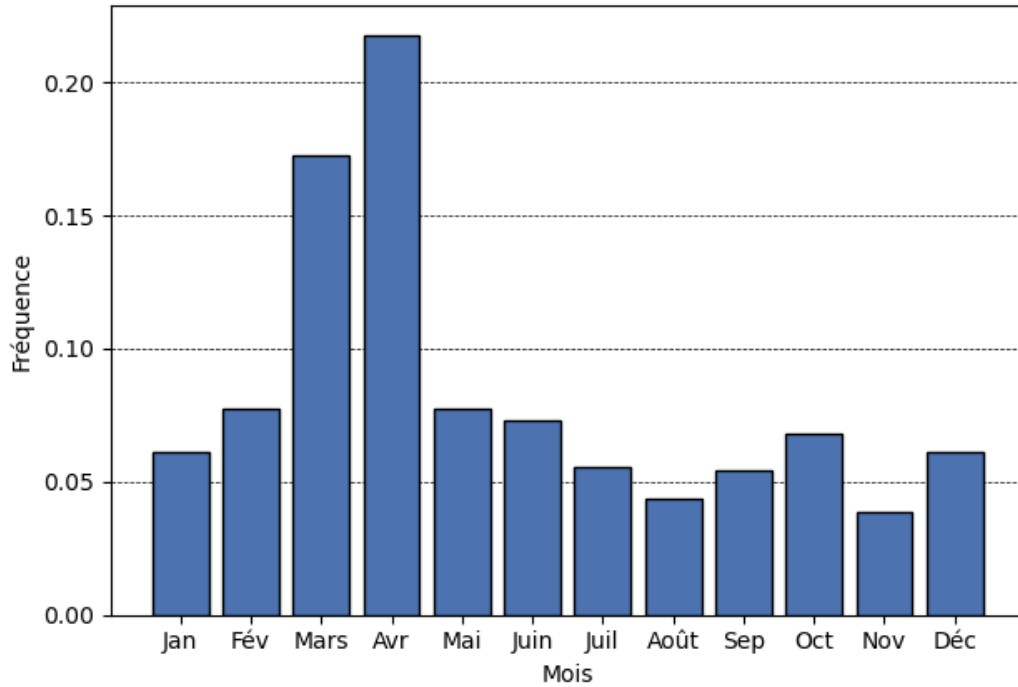


Figure 4.7 - Fréquence mensuelle d'occurrence des DMA aux 114 stations avec moins de 20% de données manquantes sur la période de janvier à décembre et plus de 4 années valides.

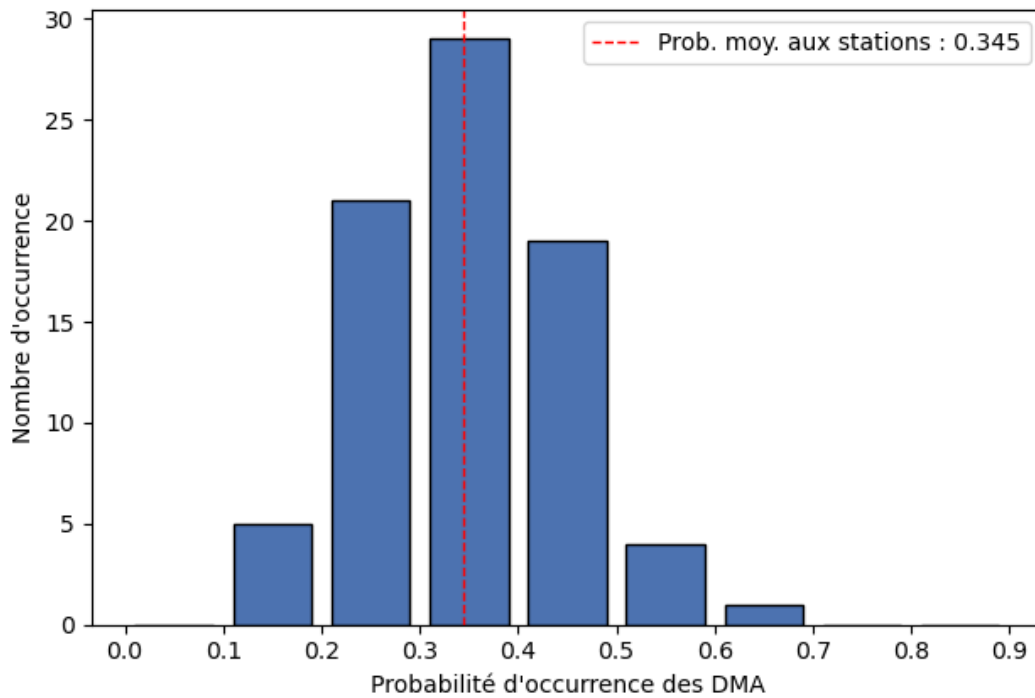


Figure 4.8 - Histogramme des probabilités d'occurrence des DMA durant les mois de juin à novembre aux stations. La valeur moyenne aux stations est représentée par le trait en tiret rouge.

Sans surprise, ces divers résultats montrent que les crues maximales annuelles surviennent principalement au printemps et beaucoup plus rarement pendant les périodes estivales et automnales.

Une analyse similaire a été réalisée à partir des 42 BV INFO-Crue prioritaires (Groupe C). Puisque tous ces BV ont des superficies inférieures à 50 km², seules les 44 stations à l'exutoire de BV de moins de 50 km² et avec 15 années valides ou plus ont été considérées pour fin de comparaison. La Figure 4.9 montre les histogrammes des probabilités mensuelles d'occurrence des DMA aux stations et aux BV d'INFO-Crue. On constate une sous-estimation par INFO-crue, variables selon les mois, des probabilités d'occurrence des DMA pendant les mois de janvier à juillet et une surestimation pour les autres mois sauf septembre. La surestimation est particulièrement importante en octobre et les sous-estimations pendant les mois de crues printanières (mars, avril et mai).

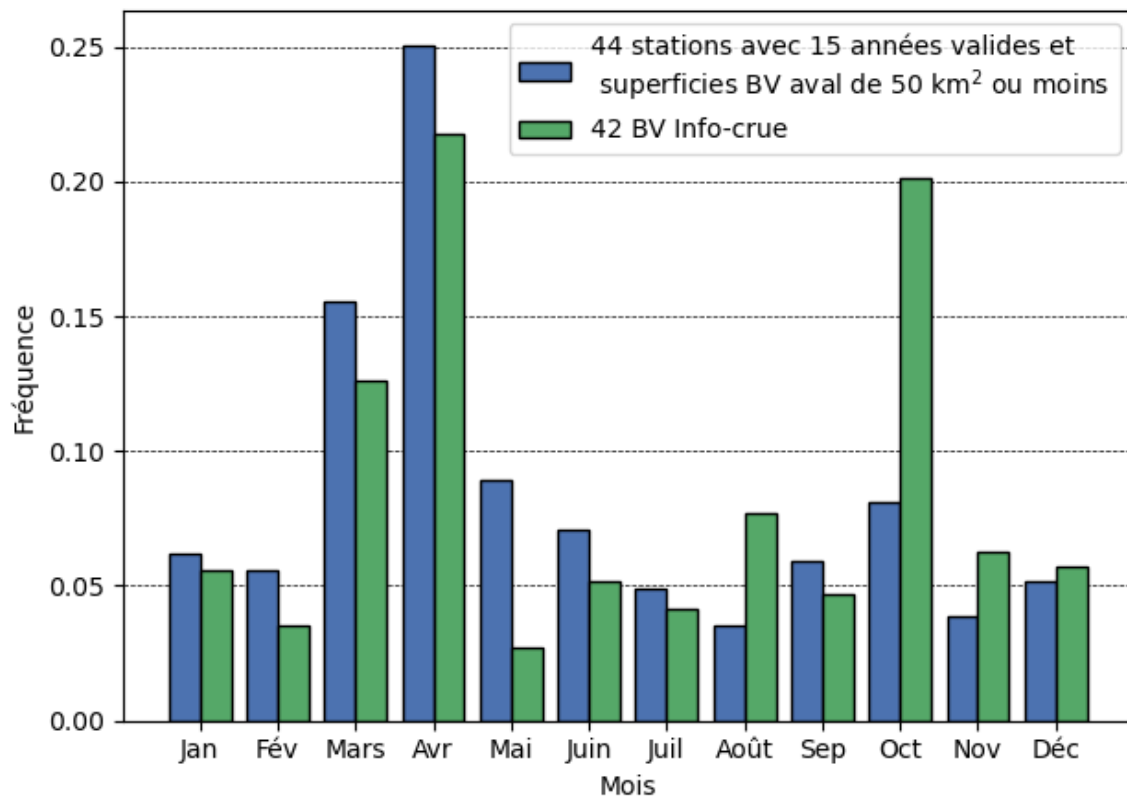


Figure 4.9 - Fréquence mensuelle d'occurrence des DMA aux 44 stations avec 15 années ou plus valides et situées à l'exutoire de BV de moins de 50 km² et aux 42 BV d'INFO-Crue prioritaires (Groupe C).

4.5 Estimation des quantiles de débits de crues aux stations

Un total de 111 stations a été retenu après élimination des séries douteuses. Huit de ces stations présentent des tendances significatives, sept à la hausse et une à la baisse. Toutes ces stations comportent au moins 15 années valides (période de juin à novembre). La Figure 4.10 présente l'histogramme du nombre de stations retenues selon le nombre d'années valides disponibles. On constate qu'une majorité des stations compte moins de 25 années. La longueur moyenne des séries disponibles est de 24.9 ans.

Le diagramme des L-moments $\tau_3 - \tau_4$ aux stations a ensuite été construit (pour plus de détails à ce sujet voir Hosking et Wallis 1997). Rappelons que ce diagramme est utilisé pour identifier la distribution la mieux à même de représenter des séries. Le L-moment τ_3 est associé à l'asymétrie de la distribution ($\tau_3 = 0$ correspond à une distribution symétrique, $\tau_3 > 0$ à une queue plus lourde dans la partie droite de la distribution et, $\tau_3 < 0$ à une queue plus lourde dans la partie gauche de la distribution). Le L-moment τ_4 correspond au kurtosis (ou coefficient d'aplatissement) de la distribution et quantifie la présence de valeurs très extrêmes dans la série ou la propension de la distribution à produire de telles valeurs (Westfall, 2014).

La Figure 4.11 présente les valeurs des L-moments $\tau_3 - \tau_4$ aux stations retenues (points bleus) ainsi qu'aux BV INFO-Crue (points noirs) de même que les courbes $\tau_3 - \tau_4$ des distributions les plus communément utilisées. Le premier constat qui émerge de l'examen de cette figure est la grande dispersion des points. Ainsi on a $-0.16 < \tau_3 < 0.68$ et $-0.11 < \tau_4 < 0.61$ et les valeurs moyennes sont $\bar{\tau}_3 = 0.313$ et $\bar{\tau}_4 = 0.211$. Cette large dispersion s'explique par les séries disponibles relativement courtes.

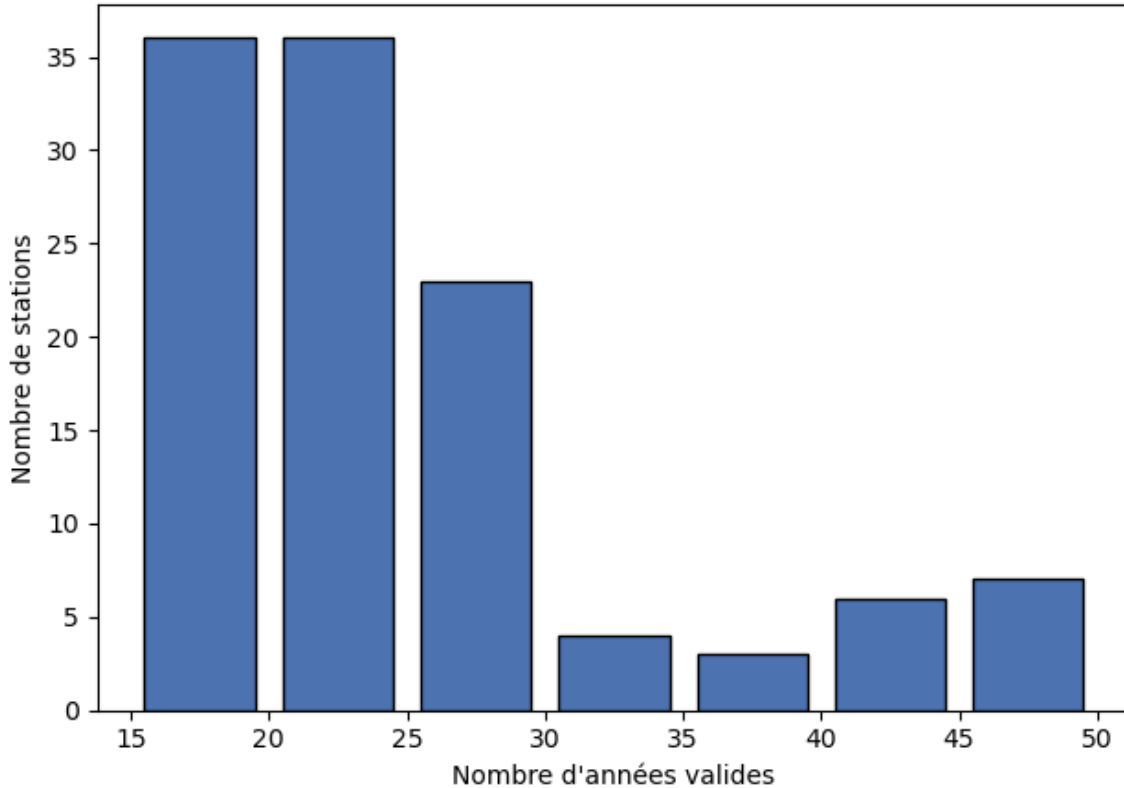


Figure 4.10 - Histogramme du nombre d'années disponibles aux stations retenues (moins de 20% de données manquantes sur la période de juin à novembre et plus de 15 années valides).

Afin de voir l'impact de la longueur des séries, 20 000 itérations Monte Carlo de 25 ans ont été réalisées en utilisant la distribution GEV (*Generalized Extreme Value*) correspondant à $\bar{\tau}_3$, c'est-à-dire avec un paramètre de forme $k = -0.21$ qui correspond à la valeur moyenne aux stations (le paramètre de position μ est fixé à zéro et d'échelle à 1). Les valeurs de $\tau_3 - \tau_4$ de chacune de ces séries ont ensuite été estimées et les contours de la fonction de densité des valeurs obtenues reportées à la Figure 4.11. Ce résultat confirme l'hypothèse précédente à savoir que la génération aléatoire de séries de 25 ans à partir d'une distribution de paramètres connus conduit à une grande dispersion des valeurs des L-moments $\tau_3 - \tau_4$. Les valeurs obtenues 'couvrent' largement le champ des valeurs observées aux stations. Ce faisant, il paraît illusoire de vouloir identifier une distribution à partir des valeurs de $\tau_3 - \tau_4$ calculées à partir d'une série de 25 ans.

La distribution GEV a dès lors été privilégiée pour le calcul des quantiles aux stations (voir l'Annexe C pour une description de la distribution GEV). Trois principales raisons militent en faveur de la GEV. La première est d'ordre théorique, cette distribution étant celle qui

décrit la distribution des valeurs extrêmes 'par bloc' générées aléatoirement selon la théorie des valeurs extrêmes (Coles 2001). La deuxième est que cette distribution a souvent été proposée pour décrire la distribution des valeurs extrêmes de débits (voir p. ex. Zhang *et al.* 2020). La troisième raison est que la valeur moyenne des L-moments $\tau_3 - \tau_4$ est près de la courbe associée à la distribution GEV dans le diagramme $\tau_3 - \tau_4$ (voir Figure 4.11).

Les paramètres de la distribution GEV ont été estimés aux séries DMA des stations valides. Tel que mentionné plus tôt l'un des paramètres importants de la GEV est le paramètre de forme (voir Annexe C). La Figure 4.12 présente l'histogramme des valeurs du paramètre de forme aux différents BV. Une forte majorité de BV a une valeur négative du paramètre de forme ce qui indique que la distribution est non bornée positivement (*heavy tailed*). L'Annexe D présente les valeurs des paramètres de la distribution GEV pour tous les BV à l'étude ainsi que les quantiles estimés pour les PdR 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100 et 350 ans.

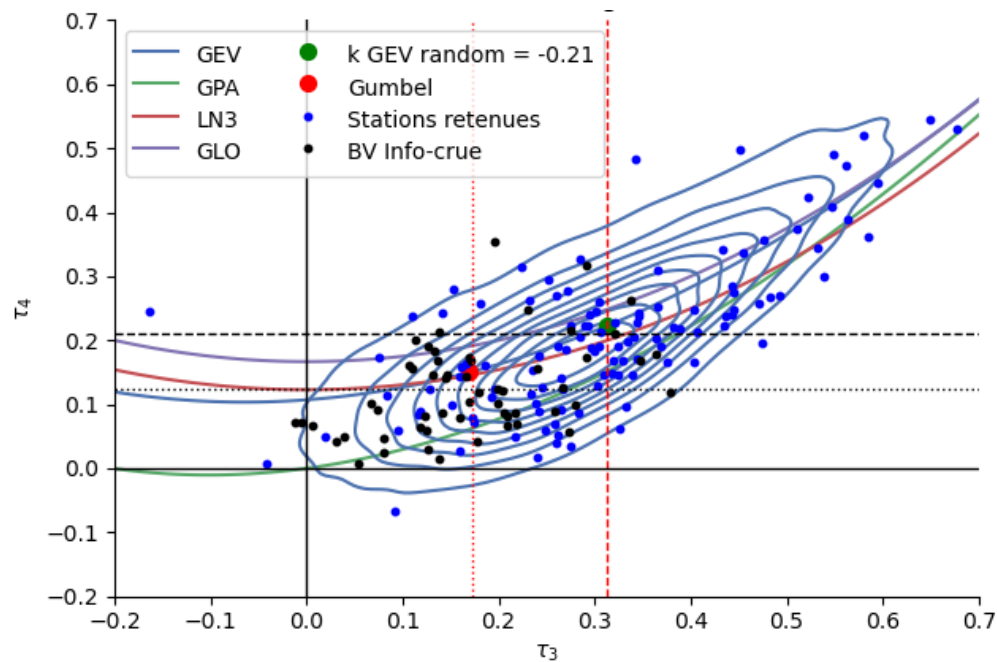


Figure 4.11 - Diagramme des L-moments $\tau_3 - \tau_4$ aux stations retenues (moins de 20% de données manquantes sur la période de juin à novembre et plus de 15 années valides). Les points bleus correspondent aux valeurs calculées aux stations retenues et les points noirs aux BV INFO-crue. Les lignes en tirets correspondent aux valeurs moyennes de τ_3 (en rouge) et de τ_4 (en noir) aux stations ($\bar{\tau}_3 = 0.313$; $\bar{\tau}_4 = 0.211$) et les lignes en pointillées aux valeurs correspondantes pour les BV INFO-crue ($\bar{\tau}_3 = 0.173$; $\bar{\tau}_4 = 0.124$). Les distributions représentées sont : GEV : *Generalized Extreme Value* ; GPA : *Generalized Pareto* ; LN3 : Log-normale à 3 paramètres; GLO : *Generalized Logistic*.

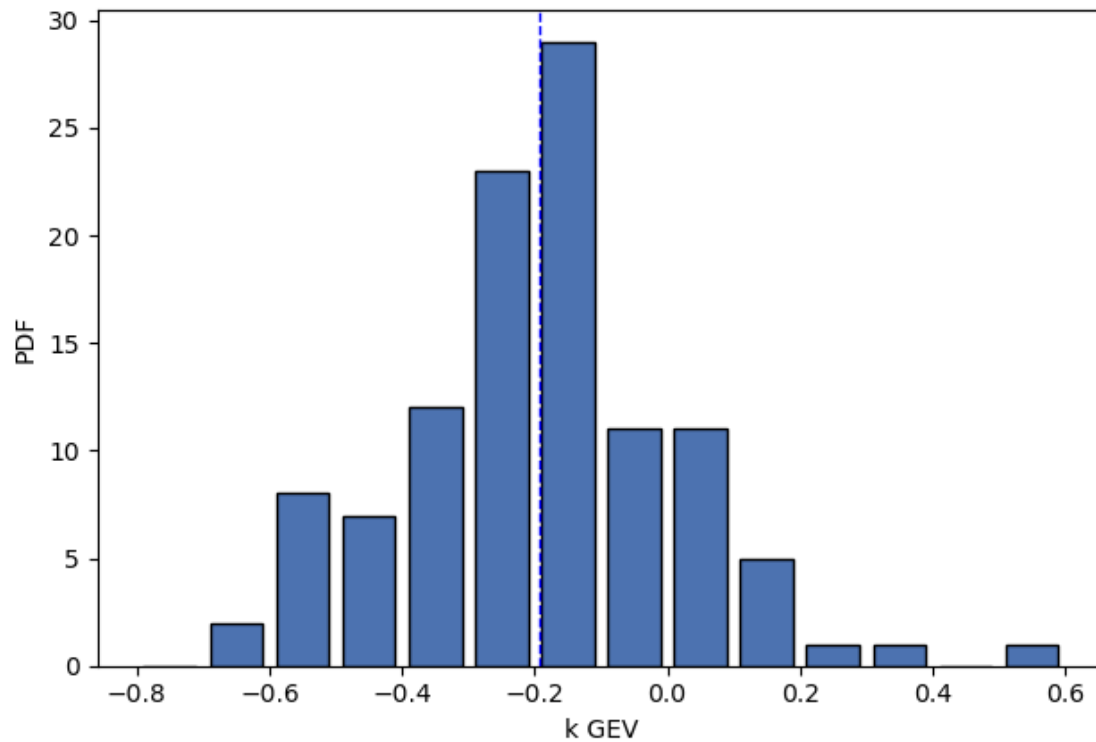


Figure 4.12 - Histogramme des valeurs du paramètre de forme k de la distribution GEV ajustée aux DMA (juin-novembre) aux BV retenus (moins de 20% de données manquantes sur la période de juin à novembre et plus de 15 années valides). Le trait en tiret vertical correspond à la valeur moyenne de ce paramètre aux BV retenus (k moyen = -0.204). À noter que selon la paramétrisation de la GEV utilisée, une valeur négative du paramètre de forme correspond à une distribution positive non bornée (*heavy tailed*)

CHAPITRE 5. APPLICATION DE LA MÉTHODE RATIONNELLE

L'application de la méthode rationnelle (MÉRA) nécessite préalablement de caractériser le BV de sorte à estimer :

- Superficie;
- Pente moyenne du BV;
- Longueur du cours d'eau principale;
- Pente du cours d'eau principal;
- Occupation du territoire.

L'Annexe E décrit comment chacune des caractéristiques est estimée alors que l'Annexe F présente les valeurs de ces caractéristiques pour chaque groupe de BV.

Dans le cadre de ce projet, l'application de la MÉRA est basée sur les travaux réalisés par Mailhot *et al.* (2021). Les prochaines sections donnent plus de détails quant à l'application de la MÉRA notamment en ce qui concerne l'estimation du coefficient de ruissellement (CR, Section 5.1), du temps de concentration (TC, Section 5.2) et de l'intensité de la précipitation (Section 5.3). Le Chapitre 11 de Mailhot *et al.* (2021) peut également être consulté. Ce chapitre donne un exemple d'application de la MÉRA pour un BV réel telle qu'elle a été utilisée dans le cadre de ce projet.

5.1 Coefficient de ruissellement

L'estimation du CR est basée sur l'approche nommée S-2 dans Mailhot *et al.* (2021). Il s'agit d'une simplification de la table de valeurs du *Manuel de conception des ponceaux* du MTQ (Transports Québec, 2017) puisqu'elle ne considère pas les groupes hydrologiques des sols et que les occupations Culture et Pâturage sont regroupées (Tableau 5.1). Pour plus de détails sur l'élaboration de cette table de valeurs, voir la Section 7.5 de Mailhot *et al.* (2021). Pour une explication quant aux avantages de cette table de valeurs par rapport à celle se trouvant dans le Manuel de conception des ponceaux, voir la Section 7.6 de Mailhot *et al.* (2021). Pour une démonstration de l'estimation du CR d'un BV réel, voir la Section 11.3 de Mailhot *et al.* (2021).

Tableau 5.1 – Valeurs de coefficients de ruissellement pour l'approche S-2

Pente (%)	Forestier	Agricole
[0-3]	0.20	0.30
]3-7]		
]7-12]	0.45	
]12-18]	0.60	
≥18	0.90	
Affleurement rocheux	Lac	Milieu humide
0.75	0.80	0.15
Urbain faible densité	Urbain densité moyenne	Urbain forte densité
0.20	0.50	0.90

5.2 Temps de concentration

Le TC de chaque BV est estimé à partir de l'arbre (ou clef dichotomique) présenté à la Figure 5.1. Le Tableau 5.2 donne une description des caractéristiques considérées dans cette approche. Pour plus de détails sur le TC, le lecteur peut consulter le Chapitre 5 de Mailhot *et al.* (2021). Pour les détails quant à l'élaboration de cette approche, voir le Chapitre 6 de Mailhot *et al.* (2021). Pour une démonstration de l'estimation du TC d'un BV réel, voir la Section 11.2 de Mailhot *et al.* (2021).

Tableau 5.2 – Description des caractéristiques retenues pour l'estimation du temps de concentration à partir de l'arbre présenté à la Figure 4.1

Abréviations	Description
LMH	% du territoire en lacs et milieux humides
$L/\sqrt{S_c}$	Rapport entre la longueur du cours d'eau principal (L) et la racine carrée de la pente du cours d'eau (S_c)

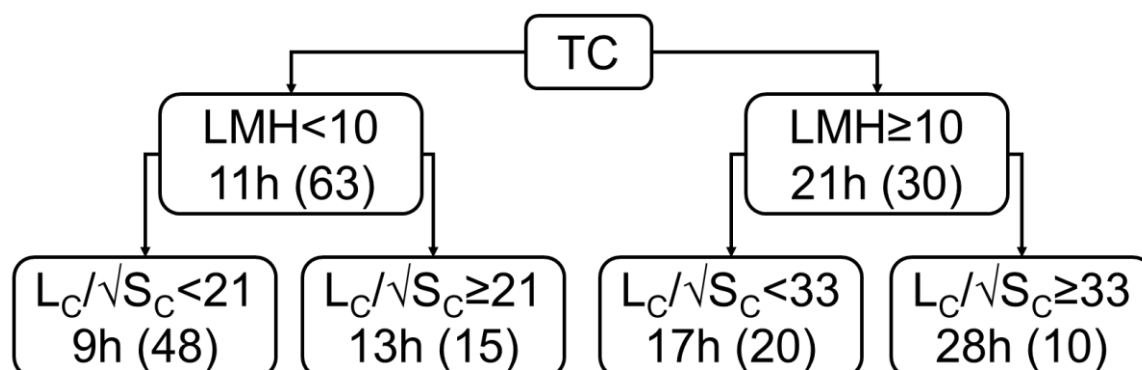


Figure 5.1 – Arbre (ou clef dichotomique) pour l'estimation du temps de concentration des bassins versants à l'étude.

5.3 Intensité des précipitations

L'application de la MÉRA exige d'estimer une intensité de précipitation de durée égale au TC (voir Section 5.2) et de PdR donnée. Dans le cadre de ce projet, les PdR considérées sont 2, 5, 10, 20, 50, 100 et 350 ans.

Pour les bassins du Québec et du Nouveau-Brunswick, les courbes Intensité-Durée-Fréquence (IDF) d'Environnement et changement climatique Canada (ECCC) aux stations météorologiques les plus près de chaque station hydrométrique ont été retenues. Les durées disponibles pour les courbes IDF d'ECCC sont : 5, 10, 15, 30 minutes, 1, 2, 6, 12 et 24 heures. Considérant que les TC de nombreux BV seront différents de ces durées et mêmes supérieures à 24 heures dans certains cas, il est dès lors nécessaire d'interpoler ou d'extrapoler les intensités IDF aux durées non couvertes. Les équations du type $I = ax^b$ où x est la durée (en heure), I l'intensité de précipitation (en mm/h) et a, b deux paramètres, telles que proposées par ECCC seront utilisées dans ces cas.

Les PdR couvertes par ECCC sont 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans. Ainsi, pour les PdR 20 et 350 ans, une interpolation et une extrapolation, basée sur une courbe logarithmique, des valeurs du paramètre a a été réalisée. Pour le paramètre b , considérant que sa valeur varie peu en fonction de la PdR, la valeur attribuée à la PdR 25 ans a été conservée pour la PdR 20 ans et la valeur pour 100 ans a été retenue pour la PdR 350 ans.

Le Tableau G.1 de l'Annexe G présente les valeurs des paramètres pour les BV du Québec (Groupes A, B et C). Le Tableau G.2 de l'Annexe G présente les valeurs des paramètres des BV du Nouveau-Brunswick (Groupe D).

Il est important de noter que les courbes IDF utilisées dans le cadre des évaluations de ce rapport sont celles proposées par ECCC. Or plusieurs de ces courbes ne sont pas à jour et n'intègrent pas les données des années, voire des décennies, plus récentes. Une mise à jour de ces courbes est donc essentielle mais n'est pas prévue dans le cadre des travaux du présent projet.

Par ailleurs, les valeurs des paramètres a, b proposées par ECCC sont obtenues en ajustant l'équation $I = ax^b$ à l'ensemble des durées x des courbes IDF à savoir 5 minutes à 24 heures. Or il s'avère que l'ajustement de la courbe ainsi estimée est très souvent relativement mauvais. Une solution possible est d'ajuster cette équation en considérant deux gammes de durées, par exemple les durées d'une heure et plus et les durées de moins d'une heure, résultant en deux jeux de paramètres a, b . Des

travaux préliminaires ont montré que les ajustements ainsi obtenus étaient nettement meilleurs. Cependant les valeurs utilisées dans le cadre du présent rapport sont celles d'ECCC.

Pour les États-Unis, l'outil *Precipitation Frequency Data Server* (PFDS) a été utilisé¹. Cet outil estime les hauteurs totales de précipitations pour différentes durées et PdR pour tout point à l'intérieur du pays. Les valeurs des paramètres a et b ont donc été estimées pour chaque site considérant les périodes de retour 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100 et 350 ans et les durées 1, 2, 3, 6, 12, 24 et 48 heures. Le Tableau G.3 de l'Annexe G présente les valeurs des paramètres, à l'échelle logarithmique, pour tous les BV des États-Unis (Groupes E et G).

Pour l'Ontario, l'outil *IDF CURVE LOOKUP*² a été utilisé pour obtenir les valeurs des paramètres a et b. Cet outil calcule les valeurs de ces paramètres en tout point de la province. Tout comme pour le Québec et le Nouveau-Brunswick, les valeurs pour les PdR 20 et 350 ans ne sont pas disponibles. La même procédure que celle présentée auparavant a donc été utilisée pour estimer le paramètre a. Pour la paramètre b, puisque la valeur est toujours de -0.699 pour les PdR 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans, cette valeur a été retenue pour les PdR 20 et 350 ans. Le Tableau G.4 de l'Annexe G présente les valeurs des paramètres pour tous les BV de l'Ontario (Groupes F et G).

¹ <https://hdsc.nws.noaa.gov/hdsc/pfds/>

² http://www.mto.gov.on.ca/IDF_Curves/map_acquisition.shtml

CHAPITRE 6. APPLICATION DU MODÈLE HYDROLOGIQUE PARCIMONIEUX

Ce chapitre présente les principaux éléments relatifs au modèle hydrologique GR5H. Une brève description de ce modèle est d'abord présentée à la Section 6.1. La Section 6.2 donne tous les détails quant aux données météorologiques utilisées pour réaliser les simulations avec le modèle GR5H. Finalement, la Section 6.3 explique le processus de calage du modèle et montre les résultats associés.

6.1 Description du modèle GR5H

Tel qu'expliqué à la Section 2.5.3, le modèle hydrologique retenu est le modèle GR5H, un modèle hydrologique comportant cinq paramètres de calage (pour une description de l'historique de développement et d'application de ce modèle, voir le Chapitre 3 de Mailhot *et al.* 2020). Ce modèle est dit parcimonieux puisqu'il compte peu de paramètres et global puisqu'il utilise les caractéristiques moyennes du bassin sans représentation des processus à fine échelle. Le modèle est basé sur une combinaison d'équations empiriques et conceptuelles reproduisant les principaux processus hydrologiques en jeu dans la génération du ruissellement et des débits à l'échelle d'un BV. Le modèle GR5H a la même structure que le modèle GR4H proposé par Mathevet (2005). La différence entre ces deux modèles réside dans le fait que le modèle GR5H considère un cinquième paramètre de calage, paramètre dont la valeur est fixée dans GR4H.

Le modèle GR5H intègre les composantes suivantes du cycle hydrologique : 1) la précipitation, 2) l'évapotranspiration potentielle, 3) une fonction de production qui détermine la précipitation nette ou la part de précipitation impliquée dans le ruissellement et 4) une fonction de routage basée sur un hydrogramme unitaire. Le module CemaNeige (Valéry, 2010) a été ajouté au modèle hydrologique GR5H afin de simuler les processus d'accumulation et de fonte de neige. La structure générale du modèle de même que les principales équations régissant les interactions entre les différentes composantes du modèle sont présentées à la Section 3.2 de Mailhot *et al.* (2020).

Les données d'entrée nécessaires à chaque pas de temps sont donc la température de l'air, les précipitations sous formes solides et liquides et l'évapotranspiration potentielle. Seules la température de l'air et les précipitations totales (neige et pluie combinées) sont disponibles pour l'ensemble du territoire d'étude (voir Section 6.2). On doit donc estimer la neige, la pluie et l'évapotranspiration au préalable. La partition des précipitations totales en fraction solide et liquide est réalisée à l'aide d'un modèle

linéaire simple qui suppose que la neige se transforme progressivement en pluie entre -1 et 3°C. L'évapotranspiration potentielle est estimée à partir d'une formulation simple prenant en compte la radiation solaire et la température (Oudin *et al.* 2005). Comme les données climatiques (voir Section 6.2) sont disponibles à un pas de temps de 3 heures, les débits ont été simulés à un même pas de temps.

6.2 Données météorologiques utilisées

Les données météorologiques utilisées comme données d'entrée du modèle hydrologique sont les données sur grille GC3H version 1 produites par le MELCC (Bergeron, 2016). Ces données ont été interpolées par krigeage simple à partir des données horaires historiques de plusieurs stations (nombre non-précisé) du MELCC et d'ECCC. La région couverte correspond au sud du Québec (sud du 53°N), interpolée à une résolution spatiale de 0.1° x 0.1° (environ 11 km par 6 km). Les variables météorologiques disponibles sont la température de l'air et les précipitations totales (solides et liquides combinées) à un pas de temps de 3 heures, pour une période allant de janvier 1990 à septembre 2019.

Un contrôle de qualité des données a été réalisé avant interpolation sur la base de divers critères (p. ex. plage de valeurs raisonnables, séquence de valeurs constantes, différence vraisemblable entre valeurs successives, entre deux instruments à une même station ou entre stations voisines). Il est aussi important de noter qu'une correction de température se basant sur l'altitude a été considérée pour chaque point de grille.

6.3 Calage du modèle hydrologique

Le calage des sept paramètres du modèle GR5H (cinq pour GR5H comme tel et deux pour CemaNeige) a été réalisé en minimisant l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre les débits observés et simulés par le modèle. Considérant la présence parfois importante de données manquantes et la qualité douteuse des débits mesurés pour certaines périodes de l'année (p. ex. en hiver), trois approches ont été envisagées pour le calcul des écarts entre débits observés et simulés où sont considérés les débits : 1) pour toute l'année ; 2) en période estivale (juin à octobre) ; 3) durant la période avec des écoulements à surface libre (mars à novembre).

Un calage sur toute l'année offre une certaine garantie que tous les processus hydrologiques importants en jeu au cours d'une année sont correctement modélisés. Toutefois, la présence de très nombreuses données manquantes en période hivernale

résulte en un déséquilibre entre l'ajustement en hiver, où les données sont plus rares, et celui pendant les autres périodes de l'année. De plus, sachant que la qualité des débits mesurés en hiver est souvent douteuse, l'utilisation de ces données pour le calage du modèle soulève des questions. On observe par ailleurs que la qualité du calage lorsque les données hivernales sont prises en compte est en général moindre.

L'utilisation des données de la période de juin à octobre est aussi discutable. En effet, si les données pendant cette période sont globalement de meilleure qualité et comportent moins de données manquantes, l'ajustement de paramètres liés par exemple à la fonte de neige pose problème puisque les débits de cette période ne sont qu'indirectement conditionnés par la fonte de neige.

Au final, la période de mars à novembre a été retenue pour le calage du modèle. Cette période est relativement bien couverte par les données disponibles et met en jeu les principaux processus hydrologiques en jeu dans la génération des débits de crues.

Une période d'initialisation du modèle (spin-up) d'un an a été utilisée avant que les débits simulés ne soient considérés pour le calage des paramètres du modèle. Les périodes où des données de débits sont disponibles ont été divisées en deux parties égales, la première étant utilisée pour le calage et l'autre pour la validation du modèle. L'optimisation des paramètres du modèle a été réalisée en utilisant l'algorithme SCE-UA (*Shuffled Complex Evolution Method, University of Arizona*), très fréquemment utilisé en hydrologie depuis environ 30 ans (Duan *et al.* 1994).

Le critère Nash-Sutcliffe (NSE ; McCueb *et al.*, 2006) a été retenu pour quantifier l'accord entre séries de débits simulés et observés. Les détails techniques concernant ce critère sont présentés à l'Annexe B de Mailhot *et al.* (2019). Rappelons simplement qu'une valeur de NSE égale à 1 correspond à un accord parfait entre les deux séries et qu'une valeur nulle correspond à une situation où le pouvoir prédictif du modèle est équivalent à la valeur moyenne.

Le Tableau 6.1 présente les valeurs de NSE obtenues en calibration, en validation et lorsque les séries complètes sont utilisées ainsi que les valeurs minimales et maximales annuelles obtenues. En effet, d'une année à l'autre le NSE varie grandement et en général celui-ci tend à être moins élevé les années de faible hydraulicité. Le Tableau 6.2 présente par ailleurs les valeurs de paramètres obtenues pour chacun des BV sous étude après calage du modèle.

Tableau 6.1 - Valeurs de NSE obtenues pour l'ensemble des bassins modélisés à l'aide de GR5H.

Numéro de station	Nom de station	Nombre années valides mars-novembre	NSE calibration (mars-novembre)	NSE validation (mars-novembre)	NSE total (calibration + validation)	Plus petit NSE annuel	Plus grand NSE annuel
030920	Noire	11	0.70	0.69	0.70	0.54	0.84
030426	Ewing	12	0.56	0.74	0.64	0.45	0.79
030425	De la Roche	14	0.61	0.75	0.69	0.07	0.78
030423	Morpions	9	0.62	0.79	0.71	0.48	0.82
024015	Bourbon	9	0.75	0.83	0.80	0.67	0.85
023432	Bras d'Henri	11	0.67	0.75	0.72	0.35	0.84
023002	Boyer Sud	9	0.72	0.32	0.38	-0.62	0.78
022601	Kamouraska	6	0.84	0.86	0.87	0.66	0.93
051007	Des Aulnaies	10	0.55	0.73	0.70	0.54	0.85
050916	Des Hurons	8	0.67	0.63	0.66	0.37	0.83
050915	Nelson	10	0.82	0.85	0.84	0.65	0.91
050812	Aux Pommes	14	0.87	0.86	0.86	0.70	0.91
050501	La Chevrotière	10	0.81	0.89	0.86	0.65	0.92
040409	Suffolk	17	0.79	0.66	0.71	-0.14	0.88
040212	Saint-Louis	8	0.76	0.78	0.78	0.55	0.87
040129	Doncaster	8	0.86	0.73	0.75	0.28	0.86
062002	Rouge	1	0.76	0.85	0.83	0.60	0.60
0120201	Dauphine	11	0.49	0.82	0.62	0.25	0.89
051002	Des Eaux Volées	20	0.70	0.73	0.72	0.15	0.81
051003	Des Eaux Volées	17	0.68	0.75	0.75	0.61	0.85
051004	Des Aulnaies	13	0.58	0.56	0.59	0.24	0.79
MFFP	Laflamme	17	0.66	0.83	0.82	0.65	0.90
MFFP	Tirasse	14	0.26	0.44	0.33	-0.40	0.62
UM	Lac Croche	14	0.76	0.71	0.77	0.49	0.89
052228	Noire	14	0.79	0.83	0.82	0.64	0.92
050813	Décharge du lac Clair	19	0.70	0.77	0.77	0.38	0.92

Le modèle GR5H offre une performance acceptable pour une majorité des BV (Figure 6.1). En effet, 70% des BV (18 sur 26) présentent un NSE total supérieur à 0.7. Seuls deux BV, Boyer Sud et Tirasse, sont plus problématiques avec des NSE de 0.38 et 0.33 respectivement.

Les Figures 6.2 et 6.3 présentent les séries des débits observés et simulés de même que la pluviométrie pour ces BV. Les séries des années avec la meilleure performance (NSE le plus élevé) et la pire performance (NSE le plus petit) sont présentées dans chaque cas.

Dans le cas du BV de la rivière Boyer, on constate que la simulation des conditions printanières en 2016 est très médiocre conduisant à un NSE de -0.62 pour cette année. Toutefois la forme de l'hydrogramme pendant le mois d'avril soulève des questions sur la validité de ces données. De même les débits simulés surestiment quasi-systématiquement les débits mesurés pendant une bonne partie de l'année.

L'hypothèse d'une mauvaise couverture météorologique pourrait expliquer la moins bonne performance pour le BV du lac Tirasse, au nord-ouest du Lac St-Jean (Figure 6.4). En effet, une seule station météorologique située à proximité de ce BV a été utilisée pour générer les données sur grille GC3H et la fraction de données valides à cette station n'est pas très élevée (Bergeron, 2016).

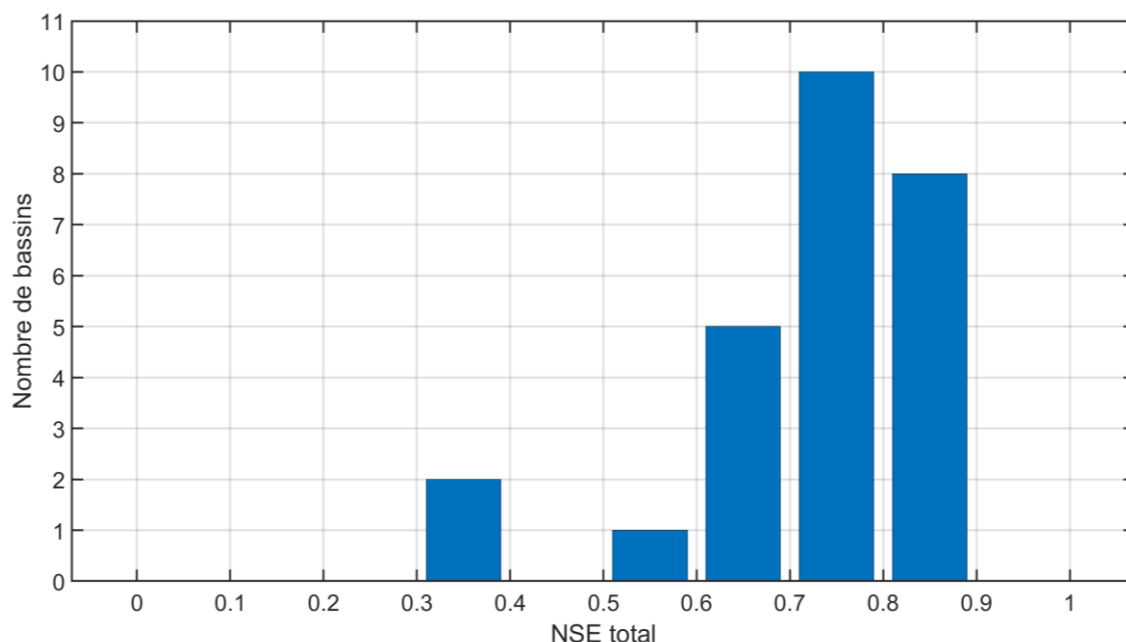


Figure 6.1 - Histogramme du NSE total (lorsque toutes les années sont considérées) pour les différents BV.

Tableau 6.2 - Valeurs des paramètres obtenus pour les différents tronçons lors du calage du modèle GR5H. (pour plus de détails sur la signification des paramètres, voir la Section 3.2 de Mailhot *et al.* 2020).

Capacité du réservoir de routage (X1, mm)	Capacité du réservoir de production (X2, mm)	Coefficient d'échange souterrain (X3, mm)	Temps de base de l'hydrogramme unitaire (X4, jours)	Coefficient de percolation (X5)	Facteur de degrés-jour (X6)	Facteur d'inertie du couvert neigeux (X7)
128.74	178.54	-1.42	0.88	300.57	0.98	0.85
54.76	141.70	-0.45	0.78	254.08	1.25	0.87
56.6	190.6	-0.96	0.92	9.58	0.81	0.81
69.3	270.4	-0.77	0.90	8.75	0.63	0.80
77.16	156.09	-0.44	0.50	544.65	0.70	0.68
61.44	140.53	0.09	1.48	145.29	0.66	0.74
218.3	42.9	-1.13	0.53	3.98	0.73	0.99
100.7	148.2	-0.38	2.64	5.85	0.64	0.54
60.0	262.0	-0.03	0.51	3.41	0.64	0.91
133.62	108.03	-0.21	0.88	377.84	0.50	0.07
159.1	270.8	-0.77	2.11	3.40	0.44	0.84
122.5	232.9	-0.18	3.60	3.41	0.62	0.92
81.8	250.8	-1.03	0.94	3.90	0.48	0.84
127.98	145.65	0.12	2.77	348.14	0.60	0.93
131.5	77.6	0.64	1.88	6.62	0.44	0.90
175.00	193.31	0.17	6.08	259.33	0.64	0.95
85.9	256.2	-0.39	0.89	3.12	0.68	0.57
147.84	116.68	1.26	0.92	131.99	0.72	0.93
51.7	696.3	-0.05	0.65	2.71	0.50	0.93
54.3	366.2	0.19	0.58	3.03	0.50	0.93
28.7	322.5	0.14	0.50	2.33	0.91	0.96
172.2	339.4	-0.80	2.72	3.60	0.51	0.97
371.5	477.0	-5.72	0.97	0.01	0.65	0.10
246.1	120.5	0.75	4.93	8.39	0.48	0.92
227.71	125.34	0.06	5.27	229.39	0.50	0.83
398.71	454.33	0.74	0.86	2.76	0.55	0.80

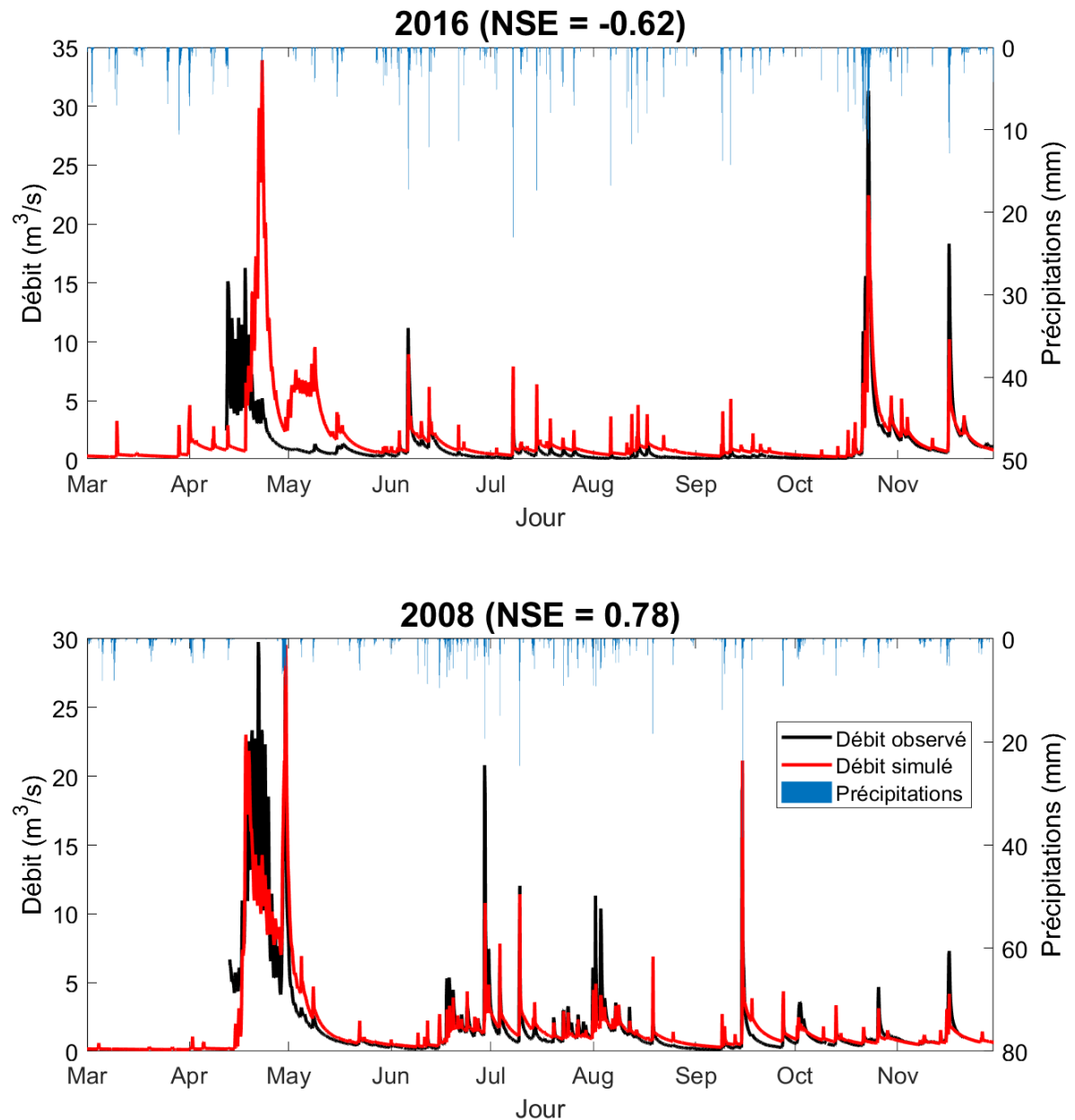


Figure 6.2 - Débits observés et simulés à la station 023002 (Boyer Sud) lors des années 2016 (graphique du haut) et 2008 (graphique du bas). Les précipitations totales (en mm) au pas de temps 3 heures sont présentées dans le haut du graphique et réfèrent à l'axe des ordonnées à droite.

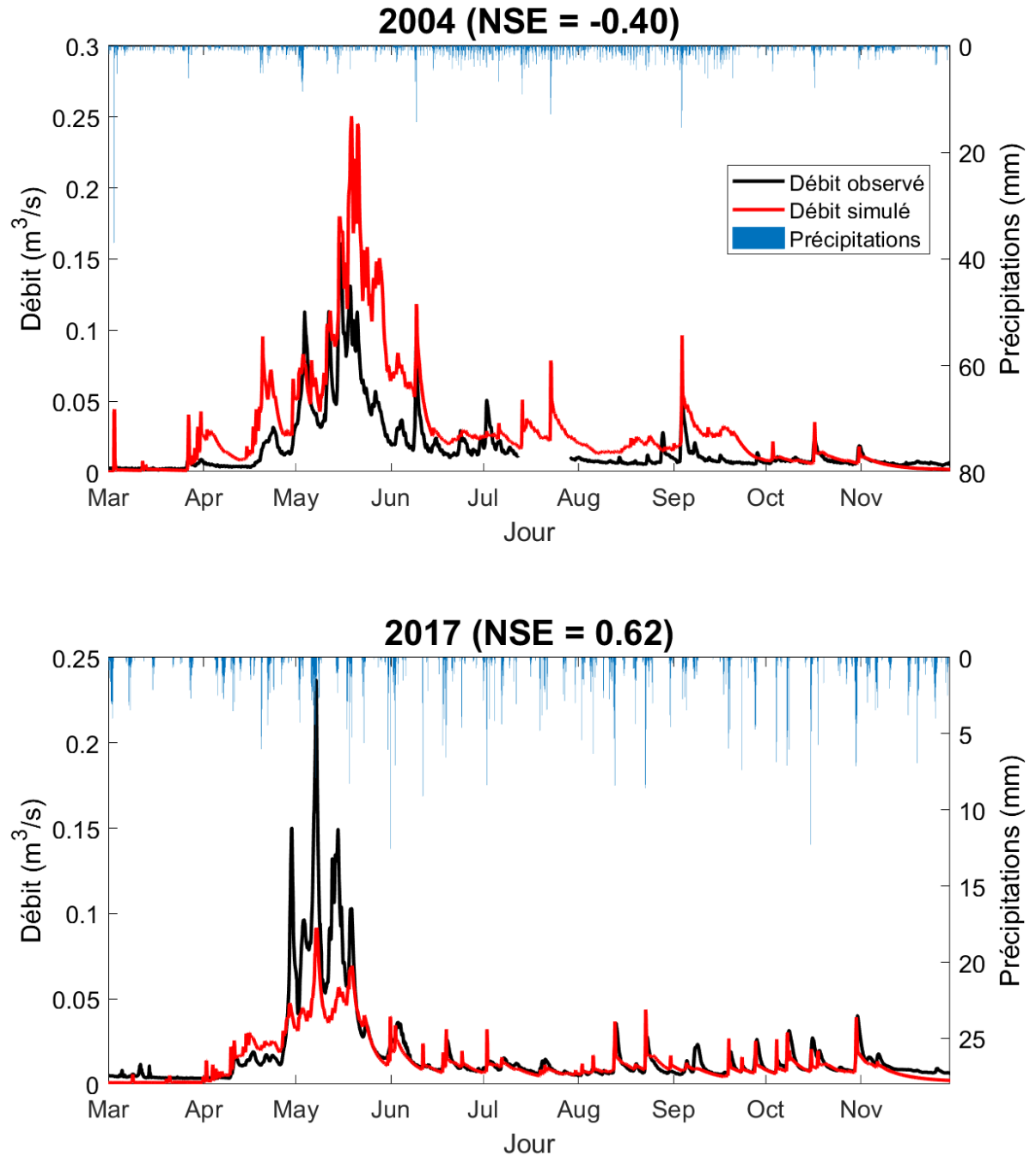


Figure 6.3 - Débits observés et simulés à la station Tirasse lors des années 2004 (graphique du haut) et 2017 (graphique du bas). Les précipitations totales (en mm) au pas de temps 3 heures sont présentées dans le haut du graphique et réfèrent à l'axe des ordonnées à droite.

Une fois les paramètres du modèle estimés, une série de débits en continu entre 1990 et 2018 (29 ans) a été simulée pour chaque station, à partir des données météo GC3H et du modèle GR5H calibré. Les DMA pour la période juin-novembre ont ensuite été extraits de ces séries.

Les séries des DMA ont ensuite été ajustées à la distribution GEV (voir Section 4.5) et les quantiles de PdR 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100 et 350 ans ont ensuite été estimés. La méthode des L-moments a été utilisée pour ajuster les paramètres de la distribution. Les quantiles obtenus à partir de GR5H pourront ainsi être comparés à leurs équivalents calculés à partir des débits historiques. Les résultats de la comparaison de ces quantiles aux quantiles observés et aux quantiles MÉRA sont présentés à la Section 7.4.

CHAPITRE 7. DMA EN CLIMAT DE RÉFÉRENCE

Ce chapitre présente l'ensemble des comparaisons entre les quantiles estimés selon les différentes approches retenues : 1) méthode rationnelle (MÉRA); 2) modèle hydrologique parcimonieux (MHP) et 3) simulations INFO-Crue. Les comparaisons sont de trois types : 1) quantiles MÉRA vs quantiles estimés à partir des séries observées (désigné dans ce qui suit par quantiles observés) aux 111 BV des Groupes A, B, D, E, F et G (Section 7.2); 2) quantiles MÉRA et quantiles INFO-Crue aux 42 BV prioritaire du Groupe C (Section 7.3); 3) quantiles MÉRA vs quantiles du MHP vs quantiles INFO-Crue aux 14 BV des Groupes A et B (Section 7.4). Le chapitre débute par une présentation de la métrique utilisée pour comparer les quantiles des différentes approches et aborde également la question des incertitudes d'estimation des quantiles, leurs origines et la façon, le cas échéant, dont elles ont été estimées dans le cadre de cette étude.

7.1 Considérations générales

La performance des différentes méthodes a été évaluée en utilisant la métrique suivante :

$$F_T^{(X)} = Q_T^{(X)} / Q_T^{(Obs)} \quad (7.1)$$

où $F_T^{(X)}$ est le rapport de $Q_T^{(X)}$, les quantiles de DMA estimés à partir de la méthode X et $Q_T^{(Obs)}$ les quantiles correspondant estimés à partir des données observées pour une PdR T. Une valeur de $F_T^{(X)}$ supérieure à un indique que les quantiles estimés surestiment les quantiles observés. Les valeurs de $Q_T^{(X)}$ et de $Q_T^{(Obs)}$ étant toutes deux sujets à des incertitudes, il est dès lors important, autant que possible, d'en tenir compte lors de l'évaluation des performances des différentes approches.

Les incertitudes associées aux quantiles DMA estimés à partir des séries observées ($Q_T^{(Obs)}$) dépendent essentiellement de la longueur de la série DMA disponible et de la PdR considérée. Plus la série DMA est courte ou plus la PdR considérée est grande, plus ces incertitudes seront importantes (à noter que le choix de la distribution utilisée pour déterminer les quantiles DMA a également une incidence sur les incertitudes mais ne sera pas pris en compte dans ce qui suit; autrement dit, les incertitudes associées à ce choix sont négligées et on suppose que la distribution sélectionnée est la 'meilleure'). Les incertitudes sur les DMA (intervalle de confiance 95%) estimées à partir des séries

observées ont été calculées et prises en compte dans les analyses qui suivent. Ainsi on distinguera les cas où la valeur de $Q_T^{(X)}$ se trouve à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95% de la valeur $Q_T^{(Obs)}$.

Le quantile DMA estimé par l'approche X ($Q_T^{(X)}$) est lui aussi entaché d'une incertitude qui dépendra de la méthode X considérée. Dans le cas de la MÉRA, ces incertitudes sont une combinaison des incertitudes sur l'estimation de la superficie, des intensités de pluies et du CR. Dans le cas des débits INFO-Crue, ce sont les incertitudes généralement rencontrées dans toute modélisation hydrologique (paramètres du modèle, incertitudes sur la structure et les processus représentés dans le modèle, etc.). Enfin dans le cas de la modélisation des conditions hydrologiques futures, aux incertitudes sur la modélisation hydrologique s'ajoutent les incertitudes sur les projections climatiques (modèle climatique, variabilité interne, forçage climatique, etc.). Les sources d'incertitudes sur les valeurs de $Q_T^{(X)}$ sont donc nombreuses et très variables selon le modèle ou l'approche considérée. Leur quantification demeure très difficile et très incertaine. On peut toutefois présumer qu'elles sont importantes. Elles ne seront toutefois pas considérées dans ce qui suit.

Ainsi, seules les incertitudes sur les quantiles DMA estimés à partir des séries observées seront considérées dans ce qui suit. Les incertitudes d'estimation des DMA des différentes approches ne seront pas prises en compte. Il faut toutefois garder à l'esprit que ces incertitudes peuvent être très importantes mais demeurent difficiles à quantifier.

7.2 MÉRA vs séries observées

La MÉRA a été appliquée à un total de 111 BV dont 14 situés au Québec (Groupes A et B), 10 au Nouveau-Brunswick (Groupe D), 39 aux États-Unis (Groupes E et G) et 48 en Ontario (Groupes F et G). À noter que cinq BV des États-Unis et 18 de l'Ontario se trouvent dans le Groupe G en raison de leur caractère plus urbanisé et sont analysés séparément (voir Section 7.2.2). L'ensemble de ces BV ont été décrits au Chapitre 3.

7.2.1 Performance de la MÉRA aux BV sous étude

Dans un premier temps, dans le but de vérifier la pertinence de la MÉRA pour les 111 BV à l'étude, les coefficients de détermination (R^2) des régressions linéaires entre les caractéristiques considérées par la MÉRA (voir Chapitre 5) et les quantiles de débits observés de PdR 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100 et 350 ans (voir Chapitre 4) ont été estimés. Le

Tableau 7.1 présente chacune des caractéristiques considérées. L'intensité de la précipitation (I_P), le CR et la superficie du BV (A) ressortent comme les facteurs les mieux corrélés aux quantiles de débits (Figure 7.1). Il s'agit d'un résultat important puisque que ces caractéristiques sont précisément les trois principales variables de la MÉRA (Équation 2.1). On observe toutefois que pour la superficie, les R^2 diminuent rapidement avec la PdR alors qu'ils augmentent de manière marquée pour l'intensité et le CR. Bien que ces R^2 sont en apparence faibles, tous inférieurs à 0.30, il est important de rappeler que de nombreux autres facteurs conditionnent les débits de crues d'un BV comme le montreront les analyses à venir. Le lecteur peut par ailleurs consulter les Chapitres 5 et 6 de Mailhot *et al.* (2021) où ce point est discuté. L'Annexe L de ce même document présente par ailleurs plusieurs exemples où des facteurs spécifiques, non pris en compte par la version de la MÉRA utilisée, conditionnent de manière marquée la réponse hydrologique d'un BV donné.

Tableau 7.1 – Caractéristiques considérées par la MÉRA et retenues pour l'estimation des coefficients de détermination (R^2) des régressions linéaires entre caractéristiques et quantiles de débits.

Caractéristique	Unité
Superficie du bassin versant	km ²
Pente moyenne du bassin versant	%
Pente moyenne du cours d'eau (S_c)	%
Longueur du cours d'eau principal (L_c)	km
Occupation forestière	%
Occupation agricole	%
Occupation en lacs et milieux humides	%
Occupation urbaine	%
Coefficient de ruissellement	Sans dimension
Temps de concentration	heure
Intensité de la précipitation	mm/h
$L_c/\sqrt{S_c}$	m

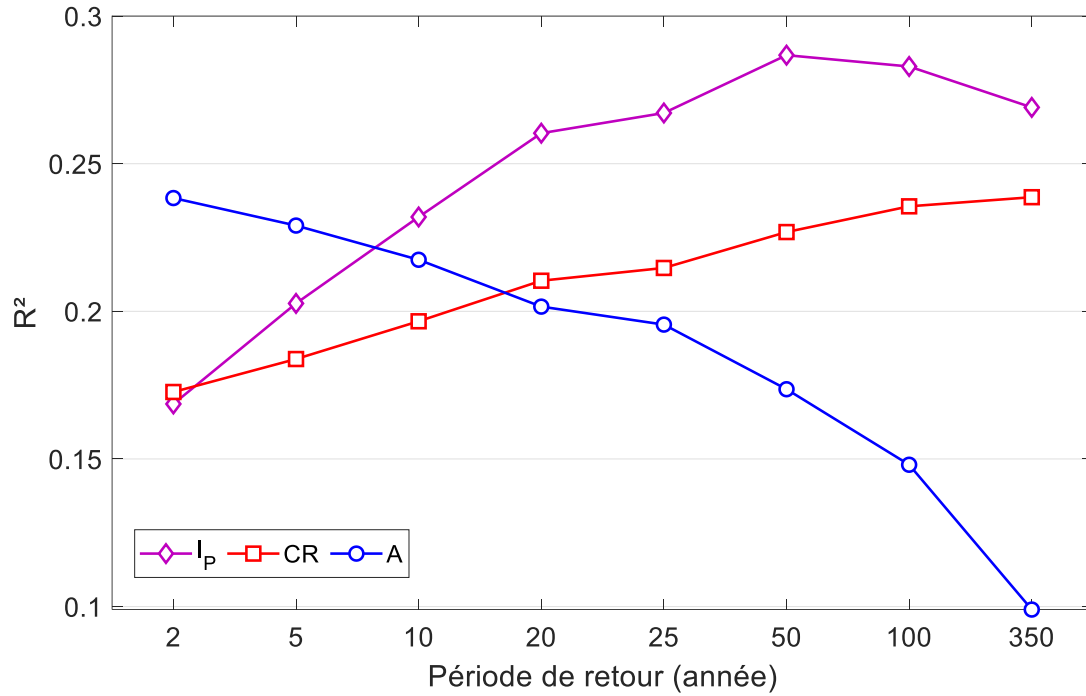


Figure 7.1 – Coefficient de détermination (R^2) des régressions linéaires entre l'intensité de la précipitation (I_P), le coefficient de ruissellement (CR) et la superficie (A) et les quantiles DMA observés de périodes de retour 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100 et 350 ans.

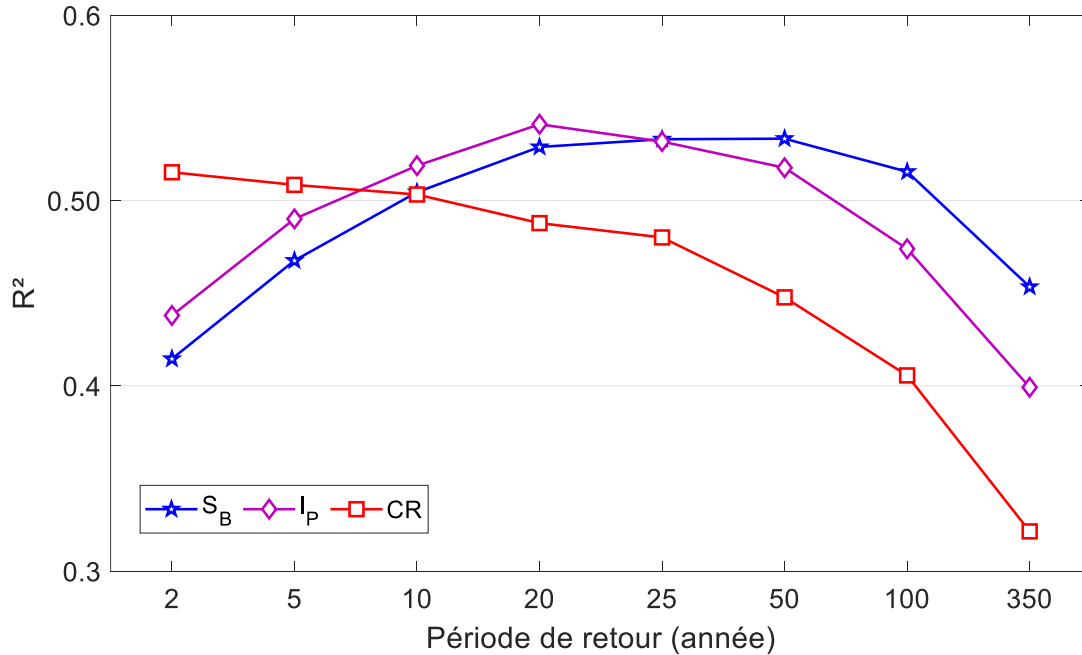


Figure 7.2 – Coefficient de détermination (R^2) des régressions linéaires entre la pente moyenne du BV (S_B), l'intensité de la précipitation (I_P) et le coefficient de ruissellement (CR) et les quantiles DMA observés spécifiques de périodes de retour 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100 et 350 ans.

Afin de déterminer l'influence des autres facteurs, une analyse similaire a été réalisée en considérant les débits spécifiques (Q_s) définis par :

$$Q_s = Q/A \quad (7.2)$$

où Q est le débit (m^3/s) et A la superficie (km^2). Les résultats de cette analyse apparaissent à la Figure 7.2 où les trois facteurs affichant dans l'ensemble les R^2 les plus élevés ont été retenus. Cette figure, combinée aux résultats de la Figure 7.1 montrent la pertinence des facteurs pris en compte dans la version de la MÉRA considérée dans le cadre de la présente étude (voir Chapitre 5). Ainsi, de ces facteurs explicatifs, l'intensité de pluie ($0.39 < R^2 < 0.54$) et le coefficient de ruissellement ($0.32 < R^2 < 0.52$) ressortent comme des facteurs explicatifs importants et sont de fait les deux principaux paramètres de la MÉRA. La pente moyenne du BV ($0.41 < R^2 < 0.53$, voir Section 5.1 et Mailhot *et al.* 2021) s'avère également un facteur important. Il convient de rappeler que la pente moyenne du BV est l'une des caractéristiques utilisées pour l'estimation du CR. En ce qui concerne les autres caractéristiques, les R^2 étaient négligeables comme par exemple pour la longueur du cours d'eau principale et l'occupation urbaine (< 0.06 pour toutes les PdR). Pour toutes les autres caractéristiques, les R^2 variaient entre 0.08 et 0.27. En résumé, cette analyse préliminaire montre que les variables importantes à considérer pour l'estimation des DMA sont ceux précisément pris en compte par la MÉRA.

La métrique définie par l'équation 7.1 a ensuite été utilisée pour comparer les quantiles DMA estimés par le MÉRA aux DMA estimés à partir des séries observées :

$$F_T^{(MÉRA)} = Q_T^{(MÉRA)} / Q_T^{(Obs)} \quad (7.3)$$

où $F_T^{(MÉRA)}$ est le rapport de $Q_T^{(MÉRA)}$, les quantiles DMA estimés à partir de la MÉRA et $Q_T^{(Obs)}$ les quantiles correspondants estimés à partir des séries observées pour une PdR T . Les fonctions de répartition des rapports $F_T^{(MÉRA)}$ sont présentées à la Figure 7.3 pour les PdR 2, 20 et 350 ans (les distributions sont très similaires pour les autres PdR). Cette figure montre que ces distributions varient peu en fonction de la PdR si ce n'est que des valeurs plus élevées sont généralement observées pour les plus grandes PdR notamment pour la PdR 350 ans où des valeurs $F_T^{(MÉRA)}$ de plus de 5 sont observées. À noter également que la valeur $F_T^{(MÉRA)} = 1$ correspond environ à la valeur de 0.4 de la fonction

de répartition, indiquant donc que la MÉRA sous-estime les DMA observés pour 40% des BV et que la probabilité de surestimer les DMA observés est plus grande que celle de les sous-estimer.

Ce résultat suggère qu'une 'correction' peut être apportée aux quantiles DMA estimés par la MÉRA qui permettrait d'améliorer les résultats. En fait, on peut montrer que les distributions des valeurs de $F_T^{(MÉRA)}$ s'ajustent très bien à une distribution log-normale et ce pour toutes les PdR. Dès lors si l'on veut maximiser les probabilités de se trouver autour de la valeur $F_T^{(MÉRA)} = 1$ on doit imposer que la médiane de la distribution coïncide avec cette valeur ($CDF(0.5) = 1$) ce qui n'est évidemment pas le cas actuellement. Cette condition revient à imposer que le paramètre de position de la log-normale soit nul ce qui peut être obtenue en multipliant les valeurs de la MERA par un facteur (appelé facteur de correction dans ce qui suit).

Le Tableau 7.4 présente ces facteurs de corrections pour les différentes PdR et les valeurs des 10^e et 90^e percentiles de la distribution des $F_T^{(MÉRA)}$ avant et après correction. On voit que l'intervalle entre le 10^e et le 90^e percentiles de la distribution couvre la gamme de valeurs $0.5 < F_T^{(MÉRA)} < 2$ ou encore que le quantile DMA observé a une probabilité de 80% de se trouver dans l'intervalle $[0.5 \text{ DMA MERA}, 2 \text{ DMA MERA}]$. La Figure 7.4 montre les fonctions de répartition des valeurs de $F_T^{(MÉRA)}$ avant et après les corrections correspondantes pour la PdR 20 ans.

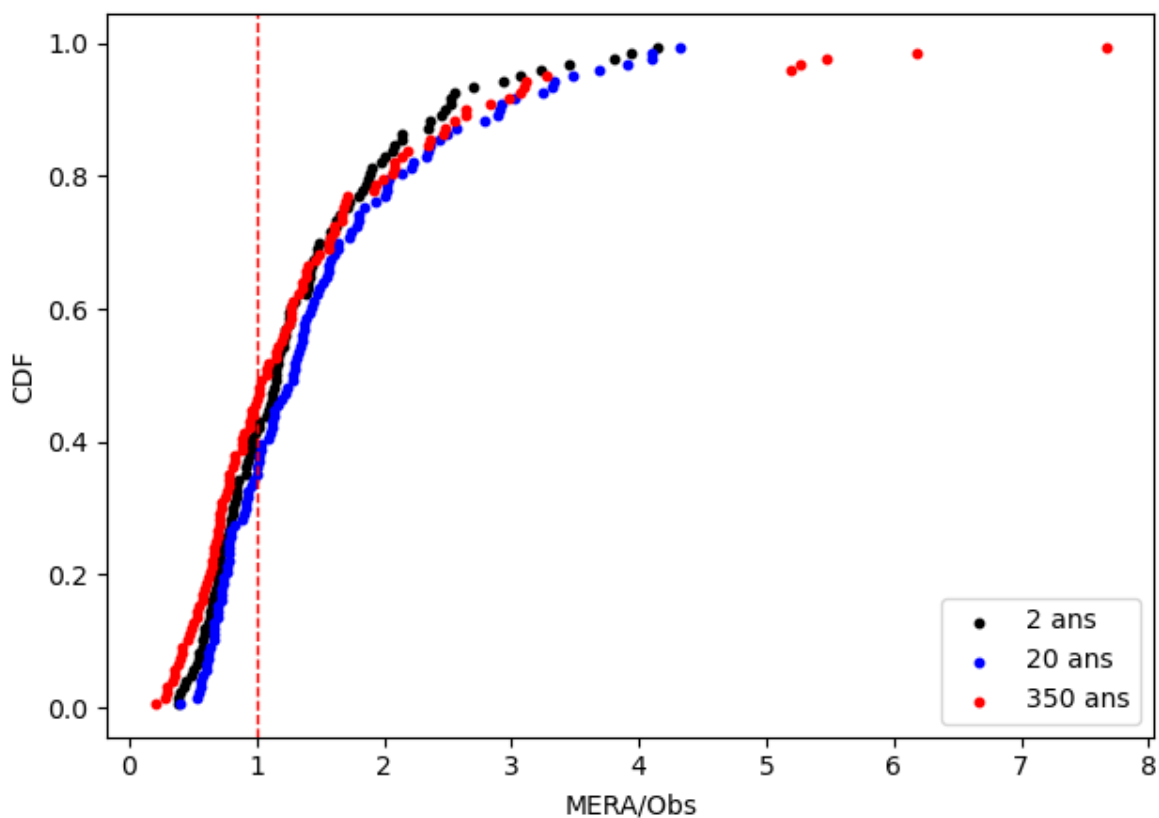


Figure 7.3 – Fonction de répartition des rapports entre quantiles DMA estimés par la MÉRA et quantiles DMA estimés à partir des séries de débits observés $F_T^{(MÉRA)}$ (MÉRA/Obs.) pour les PdR 2, 20 et 350 ans aux 111 BV sous étude.

Tableau 7.2 - Facteurs de correction appliqués aux valeurs MÉRA et intervalles 10^e-90^e percentiles de la distribution des rapports $F_T^{(MÉRA)}$ avant et après correction.

Période de retour (ans)	Facteur de correction	Intervalles 10-90 avant correction	Intervalles 10-90 après correction
2	0.871	[0.56, 2.33]	[0.49, 2.03]
5	0.728	[0.69, 2.74]	[0.50, 1.99]
10	0.746	[0.67, 2.67]	[0.50, 1.99]
20	0.778	[0.63, 2.61]	[0.49, 2.03]
25	0.786	[0.63, 2.59]	[0.49, 2.03]
50	0.799	[0.59, 2.63]	[0.48, 2.10]
100	0.815	[0.56, 2.71]	[0.45, 2.21]
350	0.906	[0.44, 2.75]	[0.40, 2.49]

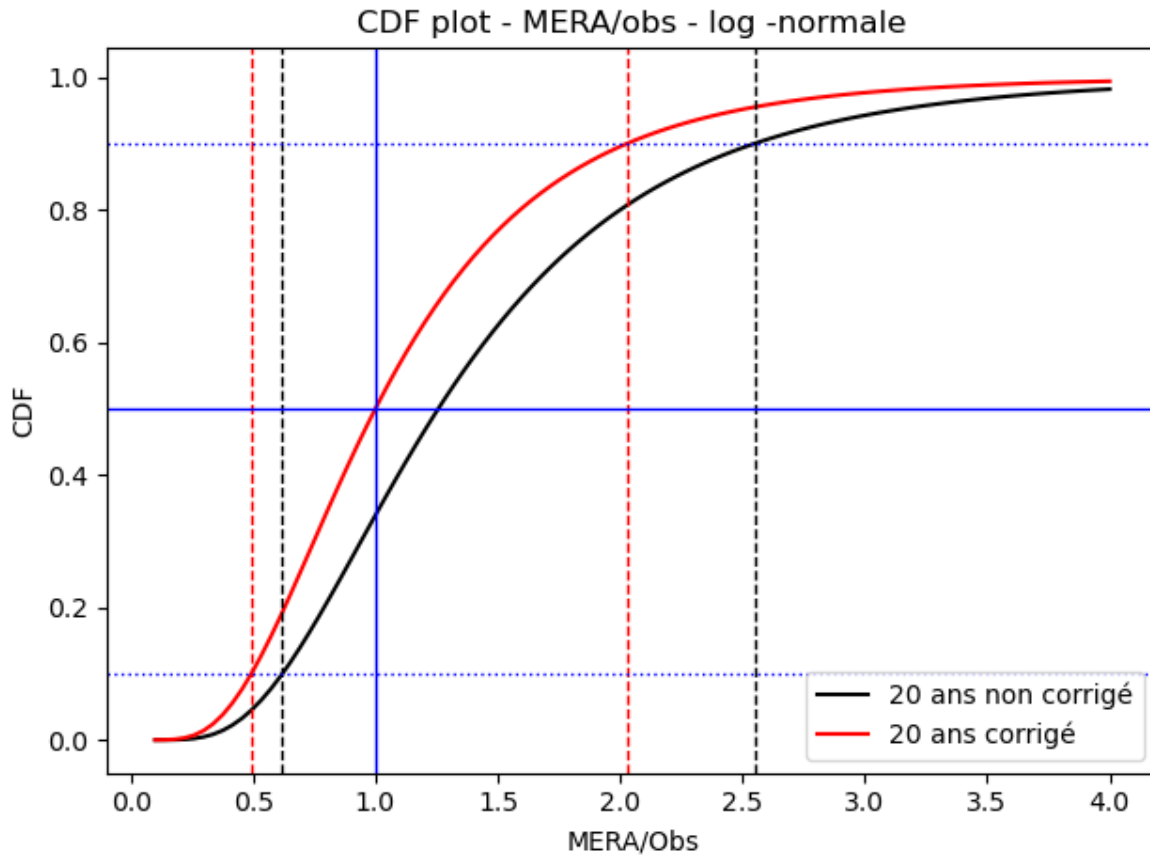
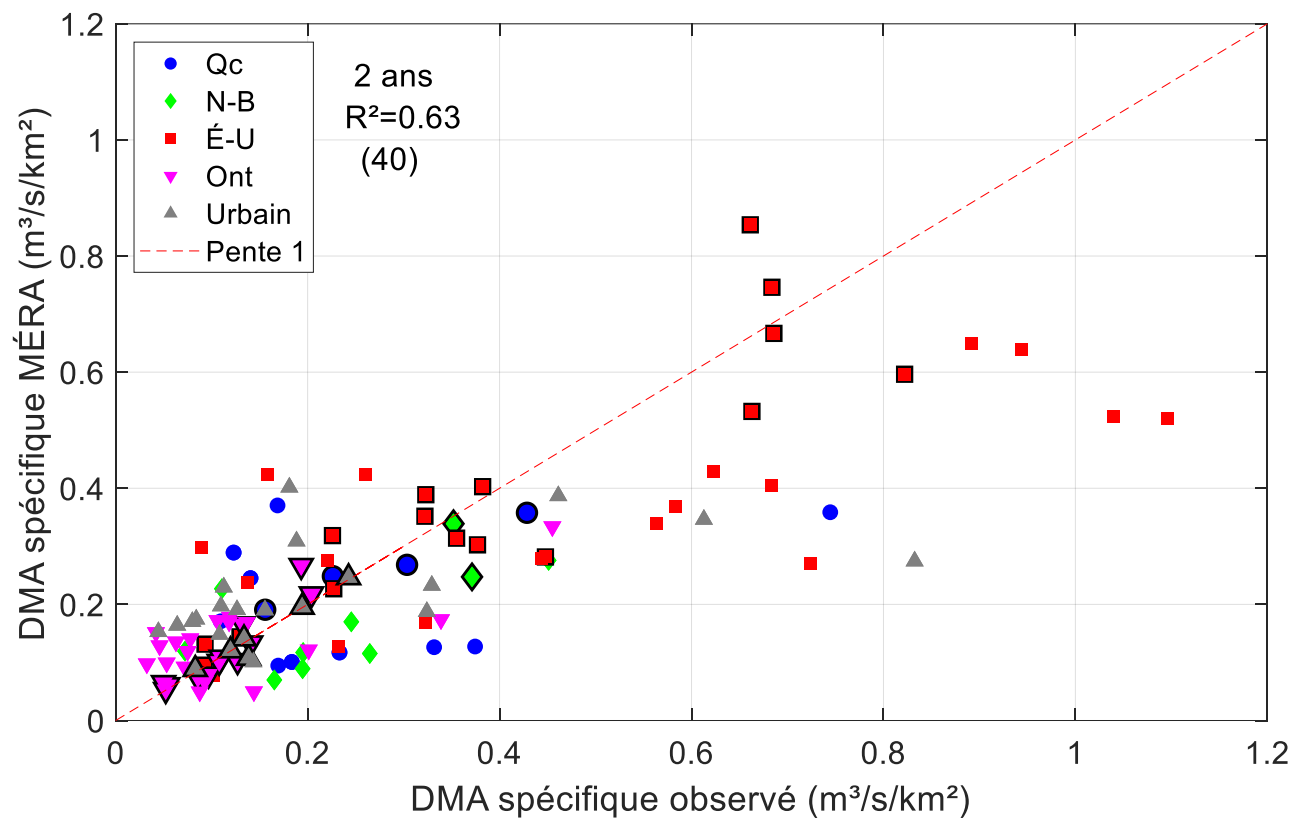
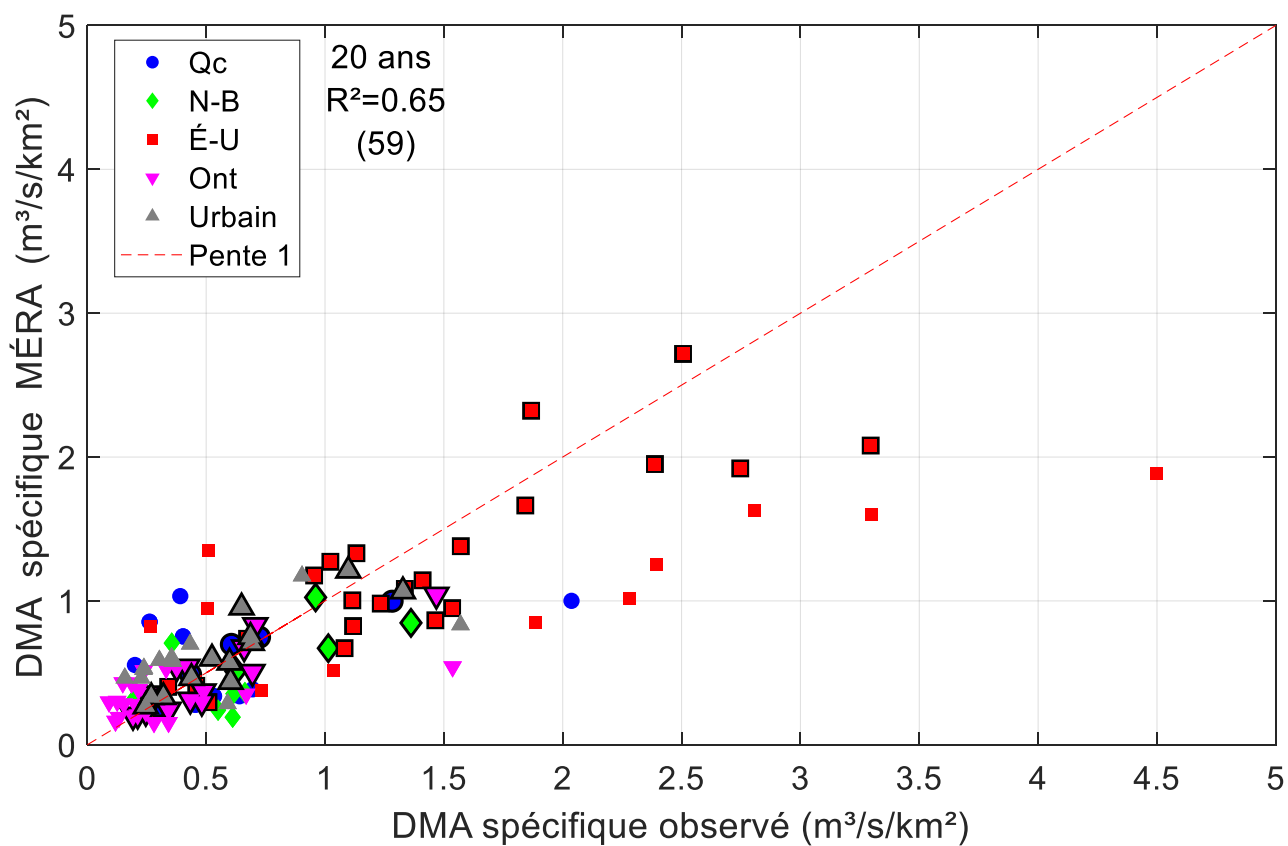


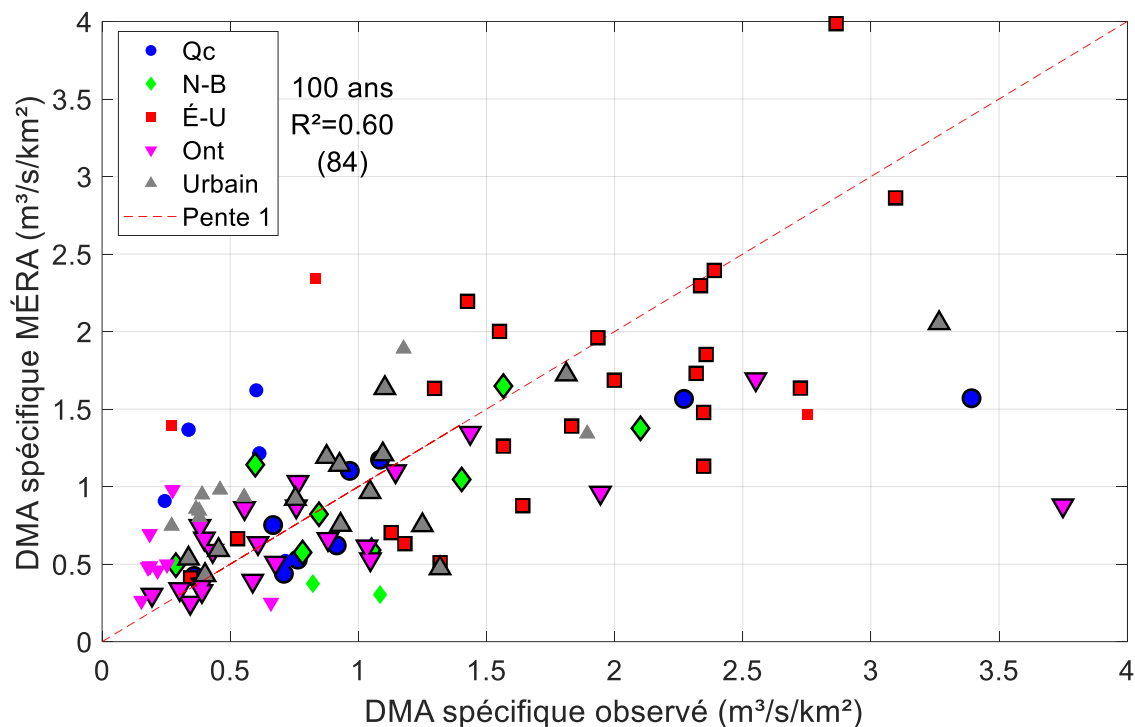
Figure 7.4 – Fonction de répartition des rapports entre quantiles DMA estimés par la MÉRA et quantiles DMA estimés à partir des séries de débits observés $F_T^{(MÉRA)}$ (MÉRA/Obs.) pour la PdR 20 aux 111 BV sous étude avant (courbe noire) et après application du facteur de correction (Tableau 7.1). Les lignes en tirets verticales délimitent les intervalles entre le 10^e et le 90^e percentiles avant (noirs) et après correction (rouges).



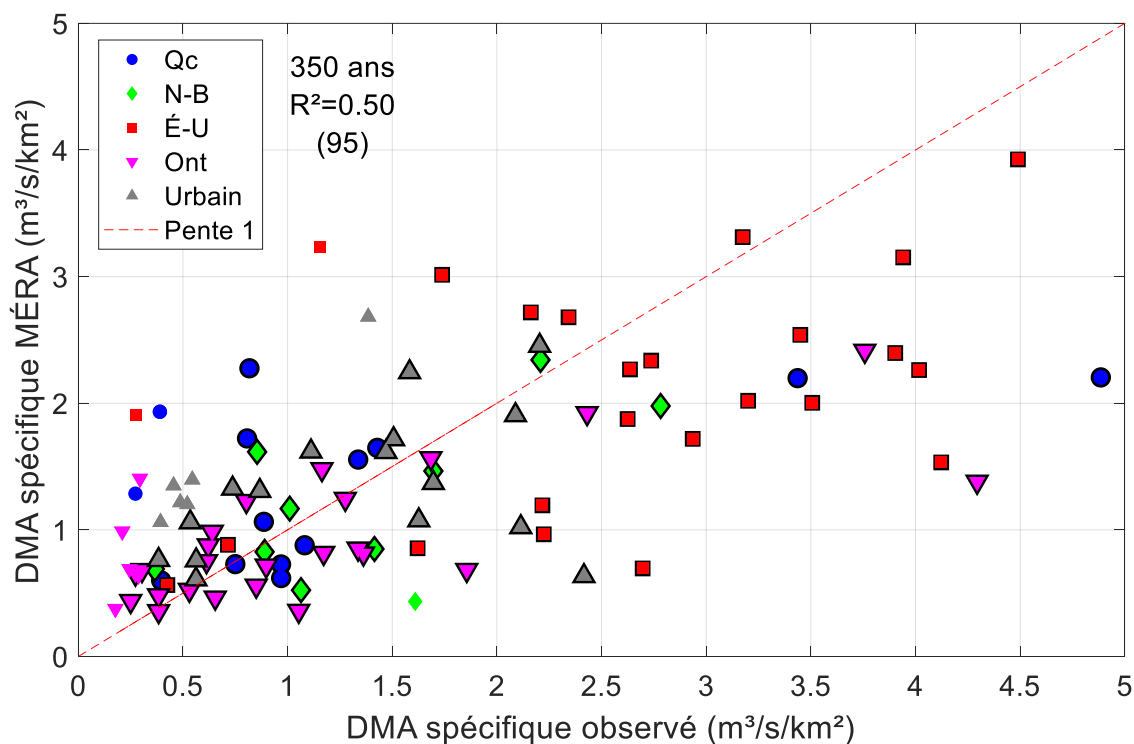
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 7.5 - Comparaison des DMA spécifiques observés et estimés avec la MÉRA après application des facteurs de corrections (Tableau 7.1) pour les BV du Québec (Qc, Groupes A et B), du Nouveau-Brunswick (N-B, Groupe D), des États-Unis (É-U, Groupe E), de l'Ontario (Ont, Groupe F) et les BV urbains (Groupe G) pour les PdR : a) 2 ans; b) 20 ans; c) 100 ans; d) 350 ans. Les marqueurs entourés d'un trait noir indiquent que le débit MÉRA est à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95 % du quantile de débit observé.

La Figure 7.5 présente les diagrammes de dispersion (*scatter plots*) des DMA spécifiques estimés par la MÉRA et des DMA spécifiques observés aux 111 BV sous étude pour les PdR 2, 20, 100 et 350 ans après application des facteurs de correction du Tableau 7.1. Il est très important de noter que pour la Figure 7.5c les valeurs supérieures à $4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ n'apparaissent pas alors que pour la Figure 7.5d ce seuil est de $5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$. Toutes ces valeurs, sauf une pour la PdR 350 ans, correspondent à des cas de sous-estimation de la MÉRA des DMA observés. Les figures complètes peuvent être consultées à l'Annexe H (Figures H.1). À noter aussi qu'une figure similaire à la Figure 7.5 comprenant les PdR 5, 10, 25 et 50 ans a été ajoutée à l'Annexe H (Figure H.2).

Malgré une dispersion parfois importante des points autour de la droite 1 :1, l'accord globale reste raisonnable avec des R^2 de l'ordre de 0.60 à 0.65 pour les PdR 2 à 100 ans et de 0.50 pour la PdR 350 ans. Lorsque les incertitudes sur les DMA observés sont prises en compte entre 40 et 95 des DMA de la MÉRA selon la PdR, sur une possibilité de 111 se trouvent à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95% des DMA observés. Ce chiffre augmente de manière marquée avec la PdR (ce point sera discuté plus en détail dans les paragraphes à venir).

Un examen de la Figure 7.5 montre que si les valeurs des rapports sont généralement bien dispersées autour de la droite de pente 1, il en va différemment pour la PdR 100 ans et particulièrement la PdR 350 ans. En effet, dans ce dernier cas, on observe des sous-estimations systématiques par la MÉRA des DMA spécifiques observés aux onze BV avec des valeurs de plus de $5 \text{ m}^2/\text{s}/\text{km}^2$ dont dix sont situés aux États-Unis (voir Annexe H, Figure H.1). Un examen des séries des DMA disponibles à ces BV révèle que plusieurs se caractérisent par des séries DMA avec une année exceptionnelle où le DMA enregistré dépasse très largement les DMA des autres années. La Figure 7.6 présente un exemple de telles séries. Dans ce cas, le DMA enregistré en 2011 est approximativement cinq fois plus élevé que les DMA des autres années. Ce DMA exceptionnel correspond au passage de l'ouragan Irène qui a durement frappé le nord-est des États-Unis à la fin du mois d'août 2011. Il s'avère que plusieurs stations avec des séries similaires à celles de la Figure 7.6 ont enregistré des débits exceptionnels en 2011 que l'on peut aussi associer au passage d'Irène.

L'existence d'une valeur hors-norme, mais vraisemblable, comme celle apparaissant sur la série de la station NY 01349811, résulte en une queue de distribution plus 'lourde' et

donc en des valeurs de quantiles plus élevées pour les grandes PdR. Dit autrement, puisqu'un événement exceptionnel est survenu, on lui accorde une vraisemblance relative plus grande et on aura tendance à surestimer sa probabilité d'occurrence. Dès lors les intensités des événements très rares seront plus élevés. Cette analyse montre donc l'impact très important que des DMA extrêmes 'hors-normes' peuvent avoir sur les valeurs des quantiles de grande PdR.

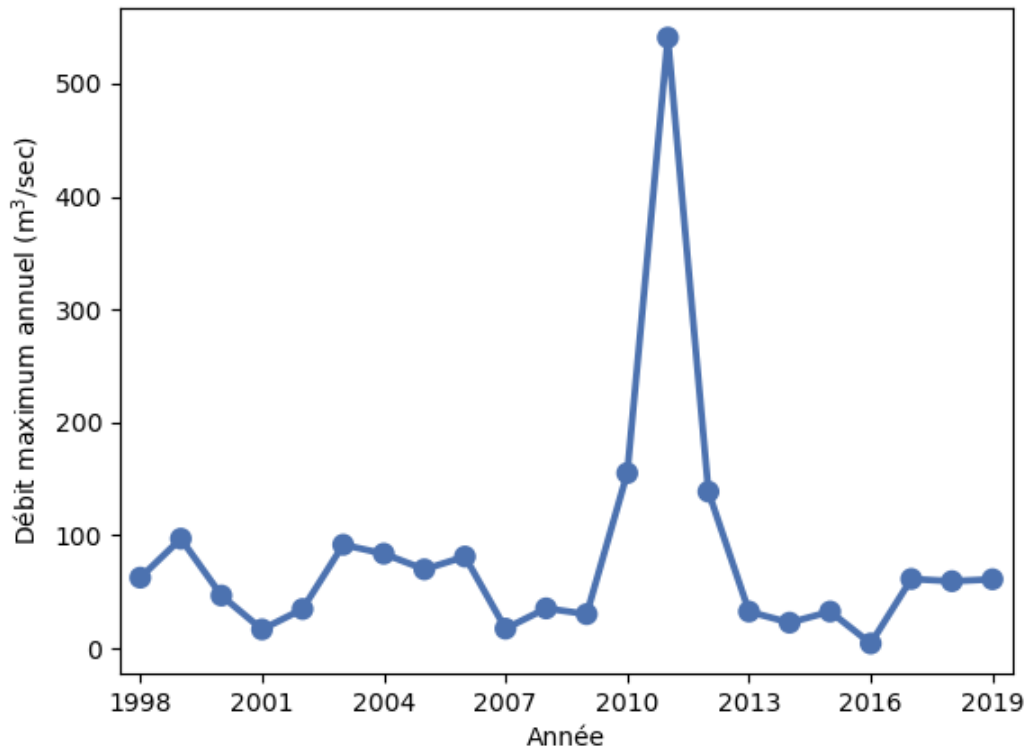
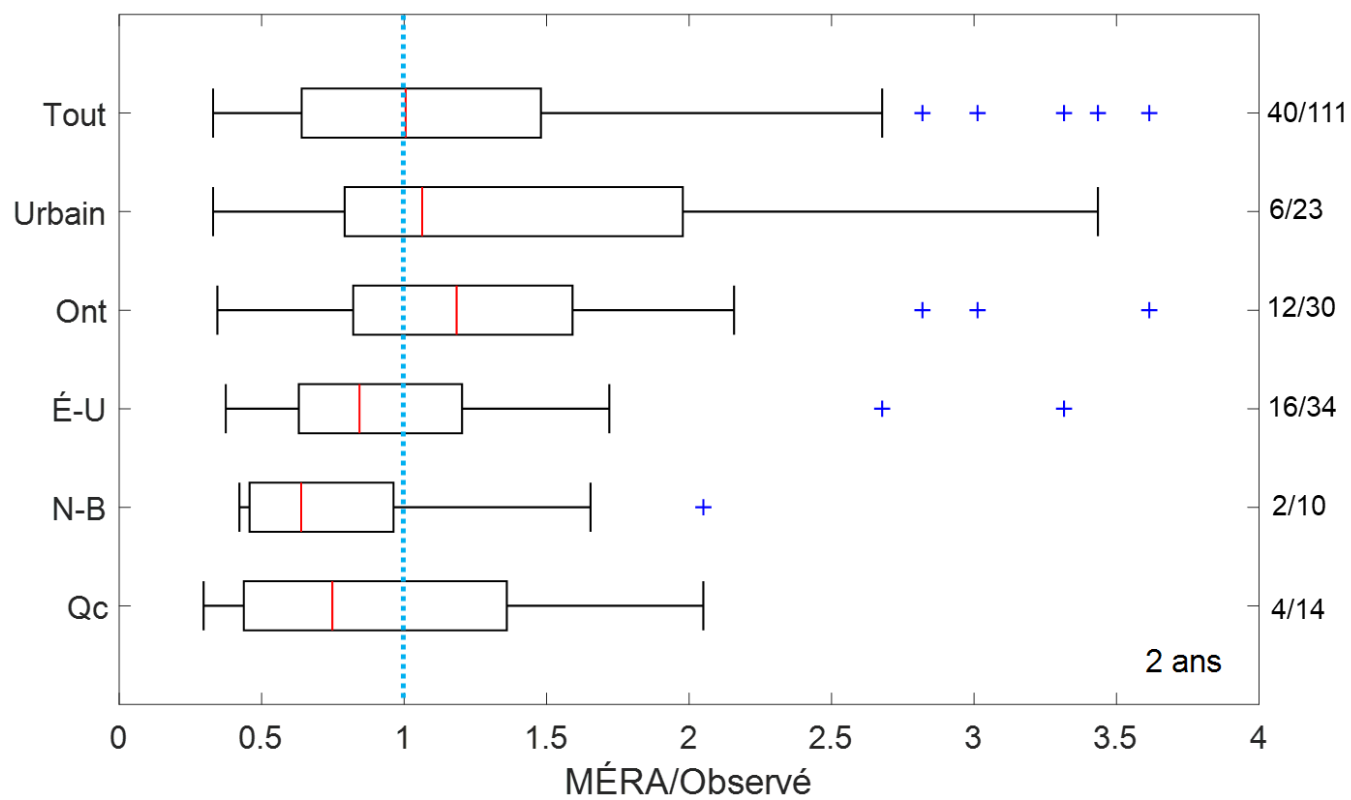
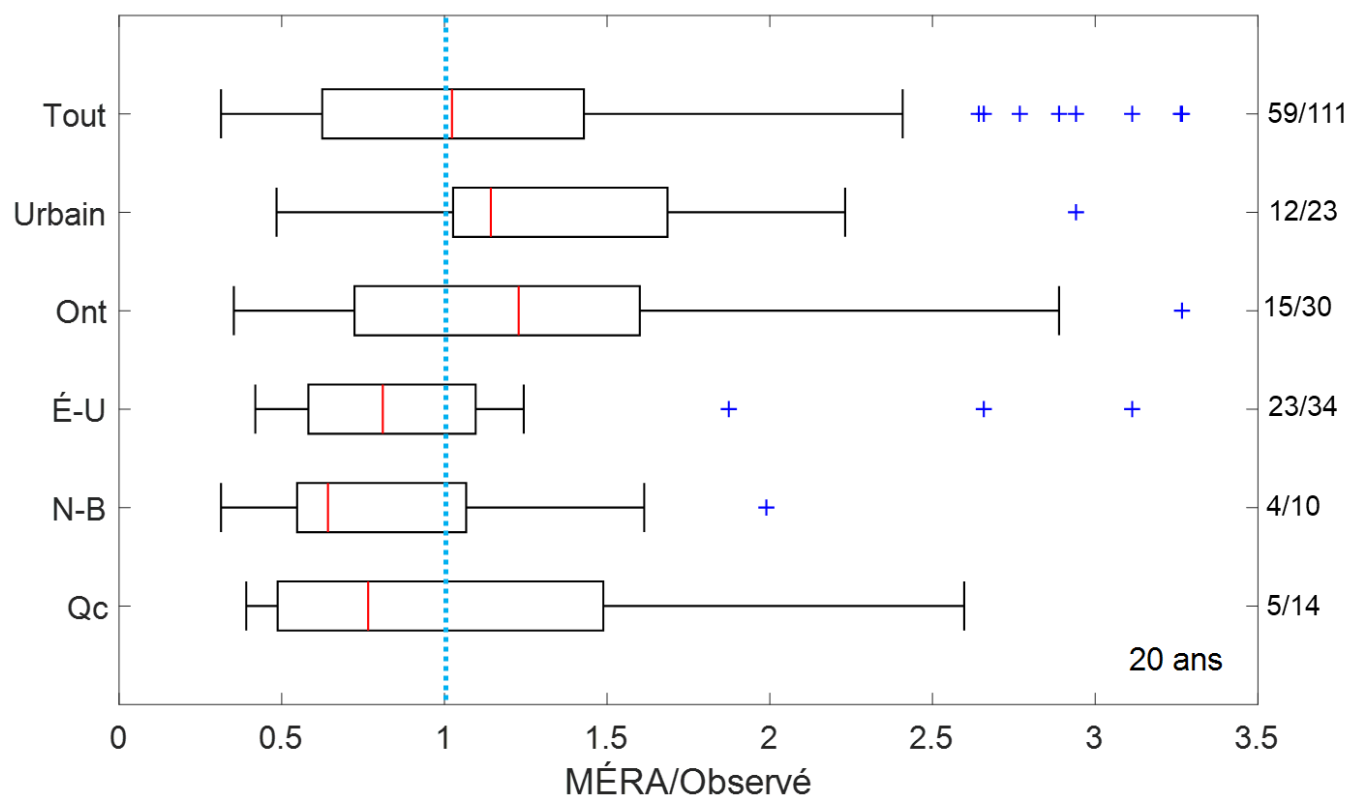


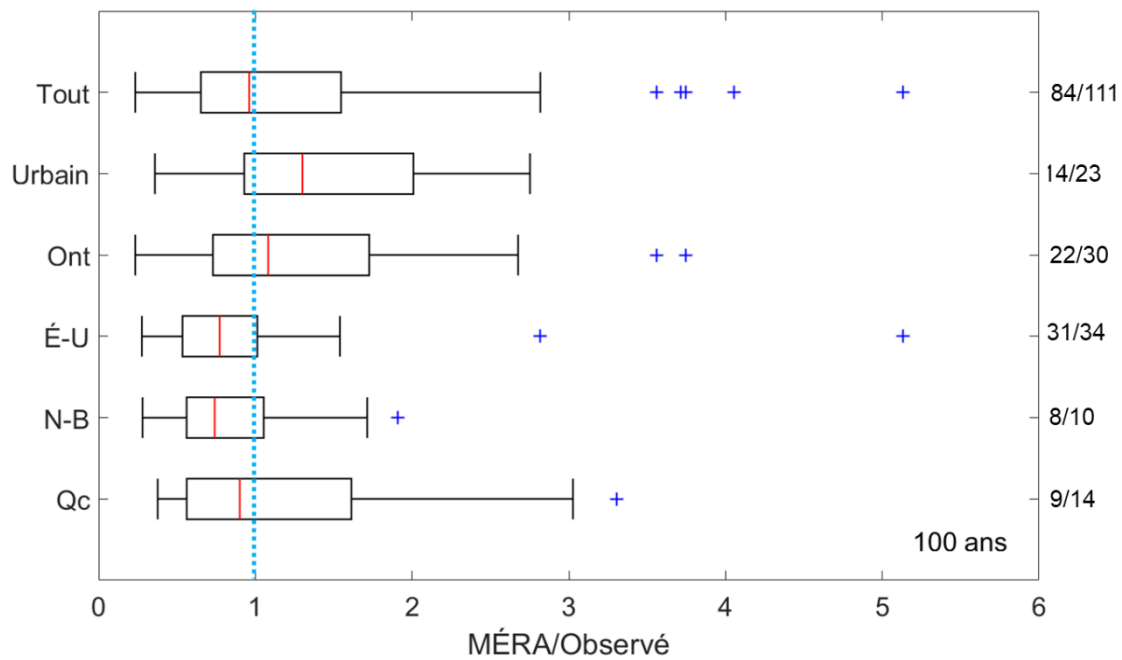
Figure 7.6 – Séries des DMA (juin à novembre) à la station NY 01349811 (état de New York aux États-Unis).



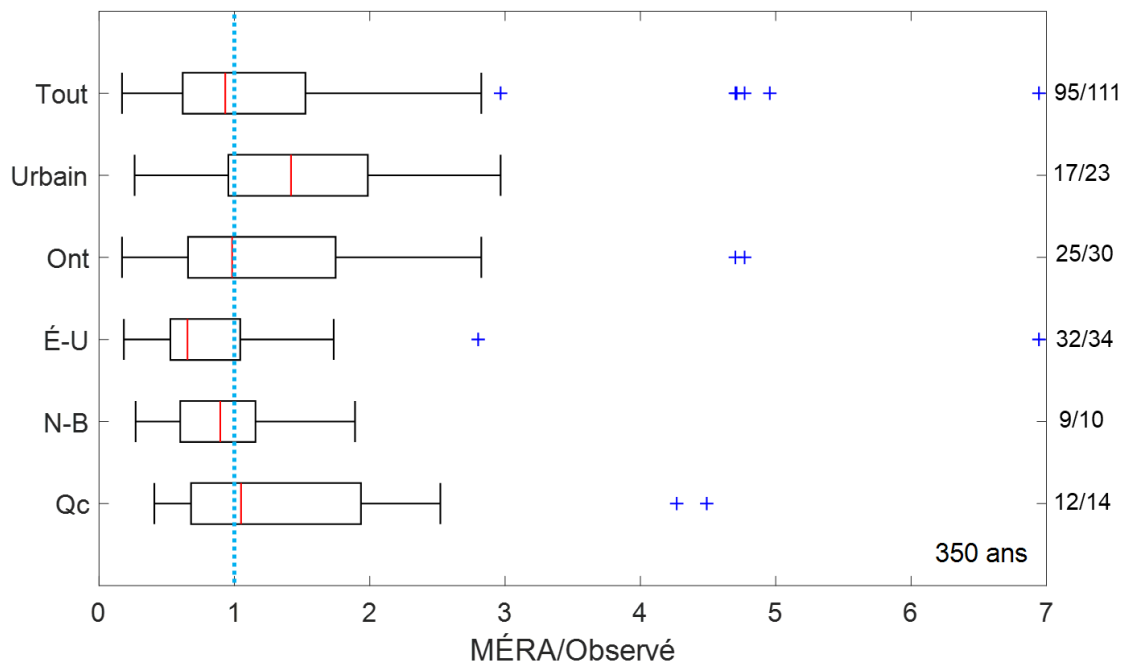
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 7.7 - Distribution des rapports entre quantiles DMA estimés à partir de la MÉRA et des quantiles correspondant estimés à partir des séries observées $F_T^{(MÉRA)}$ (MÉRA/observé) pour l'ensemble des BV (Tout) et les BV du Québec (Qc, Groupes A et B), du Nouveau-Brunswick (N.-B., Groupe D), des États-Unis (É-U, Groupe E), de l'Ontario (Ont, Groupe F) et les BV urbains (Urbain, Groupe G) pour les PdR : a) 2 ans, b) 20 ans, (c) 100 ans, (d) 350 ans. Les chiffres sur l'axe des ordonnées à droite correspondent aux nombres de BV pour lesquels les DMA de la MÉRA se trouve à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95 % des quantiles observés (numérateur) et au nombre total de BV considéré (dénominateur). La ligne bleue pointillée verticale correspond à la valeur MÉRA/observé = 1. Le trait rouge à l'intérieur des boxplots représente la médiane (2^e quartile), les limites des boîtes représentent les 1^{er} et 3^e quartiles, la moustache supérieure correspond à [3^e quartile + 1.5 (3^e quartile - 1^{er} quartile)] et la moustache inférieure au 1^{er} quartile - 1.5 (3^e quartile - 1^{er} quartile), les croix bleues présentent les valeurs supérieures à [3^e quartile + 1.5 (3^e quartile - 1^{er} quartile)].

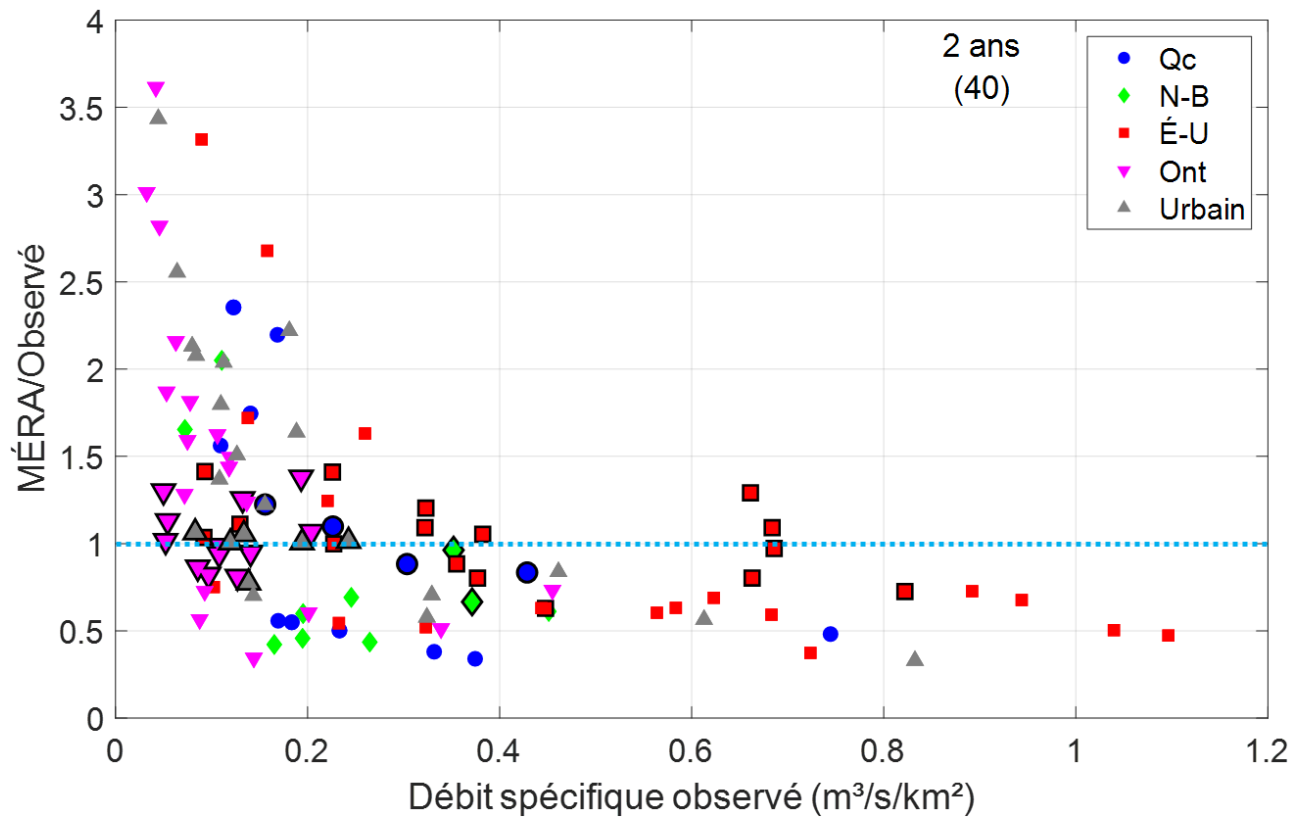
Le premier constat qui émane de l'examen de la Figure 7.7 des distributions des valeurs de $F_T^{(MÉRA)}$ pour divers groupes de BV est que la dispersion de ces valeurs augmente avec la PdR, de même que la probabilité d'écarts très importants dans certains cas extrêmes. Ainsi si le rapport MÉRA/Observé le plus important pour la PdR 20 ans est de l'ordre de 3.5, un rapport de près de 7 a été obtenu à un BV pour la PdR 350 ans. Ceci suggère que les écarts possibles entre quantiles MÉRA et quantiles observés seront plus grands pour les plus grandes PdR. Ce résultat ne saurait surprendre puisque les incertitudes sur les quantiles observés de PdR 350 ans sont très importants et que, comme la discussion présentée plus haut l'a montré, la présence dans certains cas de débits exceptionnels dans des séries de DMA relativement courtes résulte en des quantiles observés très élevés pour les grandes PdR. À noter enfin que le rapport MÉRA/Observé = 1 se trouve à l'intérieur de l'intervalle interquartile pour tous les groupes de BV sauf le groupe des BV urbains où pour la PdR 20 ans, il est légèrement en deçà (Groupe G) et le groupe des BV du N-B où pour la PdR 2 ans il est au-dessus.

La Figure 7.7 présente également le nombre de BV où la valeur MÉRA est à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95% des quantiles observés pour chaque groupe. Ce résultat montre deux choses. D'abord, qu'il est plus fréquent pour les BV des É-U d'estimer des débits MÉRA à l'intérieur de l'intervalle de confiance. Cette proportion est de 47, 68, 91 et 94 % pour les PdR 2, 20, 100 et 350 ans. Ensuite, que l'augmentation de la PdR se traduit par une augmentation de cette proportion et ce pour tous les groupes de BV. Ce résultat peut s'expliquer par les intervalles de confiance plus importants au fur et à mesure que la PdR augmente. Il serait incorrect de conclure que ce résultat indique une meilleure performance de la MÉRA pour les plus grandes PdR et ce malgré le fait que les conditions hydrologiques justifiant l'utilisation de la MÉRA (infiltration et rétention minimale et ruissellement direct de la pluie) s'apparentent aux conditions réelles pour les pluies les plus extrêmes.

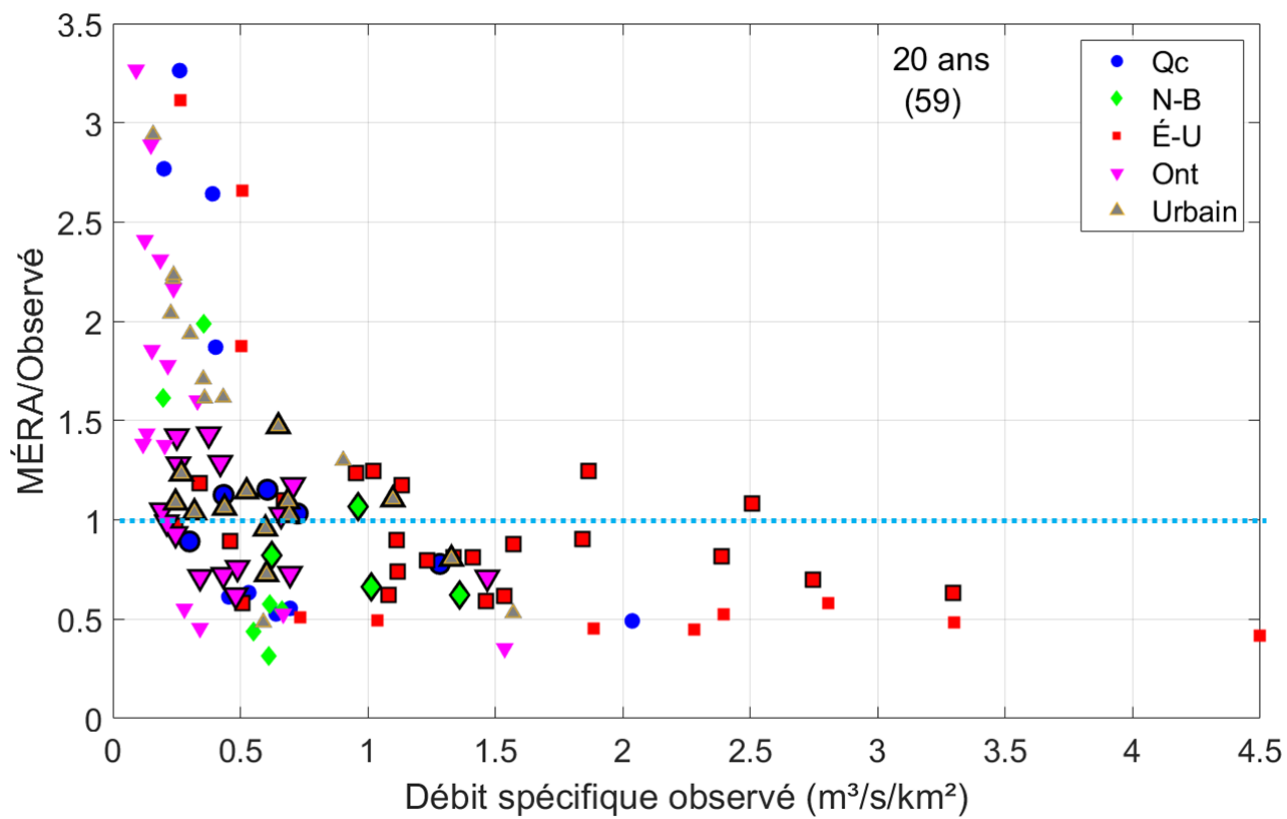
À une échelle plus régionale, la Figure 7.7 suggère que la MÉRA est plus performante pour certaines régions, notamment les États-Unis où la dispersion des valeurs est moins élevée et plus centrée vers un rapport MÉRA/Observé = 1. La Figure 7.8 permet de mieux comprendre pourquoi la MÉRA est plus performante pour les É-U où les débits spécifiques observés sont dans l'ensemble plus élevés. Cette figure montre que pour les BV avec de plus petits débits spécifiques (inférieurs à environ 0.2, 0.5, 0.8 et 1.0 m³/s/km² pour les PdR 2, 20, 100 et 350 ans respectivement), les valeurs des F_T sont plus dispersées et

plus élevées. Or, les BV de l'Ontario et du Québec affichent des débits spécifiques dans l'ensemble inférieurs aux débits spécifiques des BV du Nouveau-Brunswick, des États-Unis et des BV urbains. À noter qu'une figure similaire à la Figure 7.7 pour les PdR 5, 10, 25 et 50 ans a été ajoutée à l'Annexe H (Figure H.3).

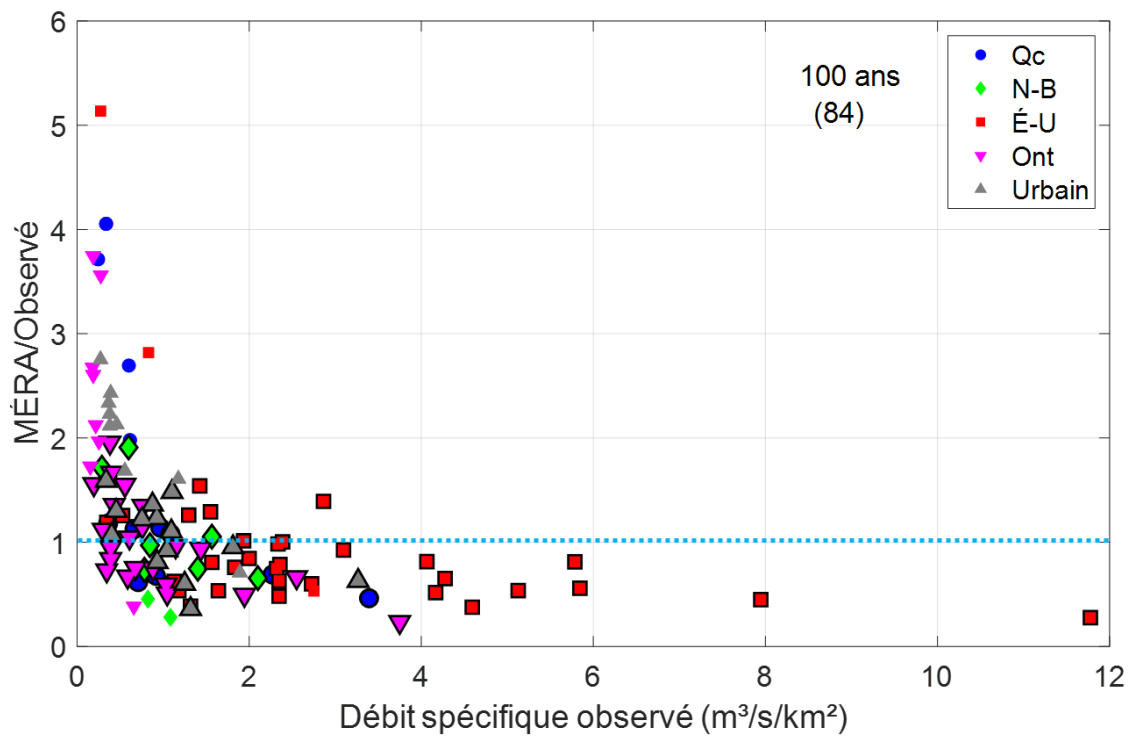
Il est difficile d'identifier des facteurs uniques qui expliqueraient sans équivoque pourquoi les BV de certaines régions ont des débits spécifiques moins ou plus élevés. Plusieurs facteurs sont sans doute en cause. Par exemple, les BV des États-Unis sont souvent caractérisés par de fortes pentes moyennes (12.2 % en moyenne) et des sols de classes hydrologiques C et D (sols favorisant le ruissellement; voir Chapitre 7 de Mailhot *et al.* 2021) qui représentent en moyenne 71.7 % de la surface des BV. À titre comparatif, la pente moyenne des BV de l'Ontario est de 4.9 % et les sols de types C et D couvrent en moyenne 51.9 % des BV. Pour le Québec, bien que la pente moyenne des BV soit également élevée (9.0 % en moyenne), les sols de types C et D sont très peu présents couvrant en moyenne seulement 18.6 % des BV. À noter qu'aucune source d'information n'a été trouvée concernant la classification hydrologique des sols du Nouveau-Brunswick.



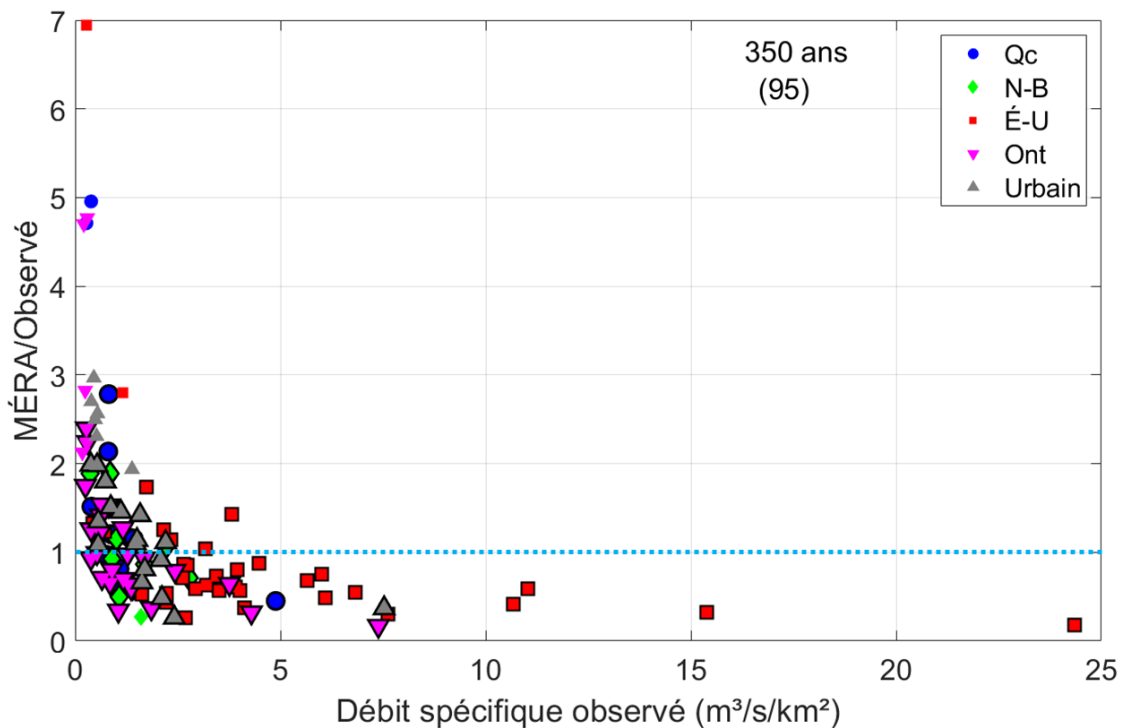
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 7.8 – Rapports des DMA estimés à partir de la MÉRA et des quantiles correspondant estimés à partir des données observées (MÉRA/observé) en fonction du débit spécifique observé pour les BV du Québec (Qc, Groupes A et B), du Nouveau-Brunswick (N-B, Groupe D), des États-Unis (É-U, Groupe E), de l'Ontario (Ont, Groupe F) et BV urbains (Groupe G) pour les PdR : a) 2 ans; b) 20 ans; c) 100 ans; d) 350 ans. Les marqueurs entourés d'un trait noir indiquent que le débit MÉRA est à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95 % du quantile de débit observé. Le nombre de BV pour lesquels cette situation survient est indiqué entre parenthèses dans le haut des graphiques.

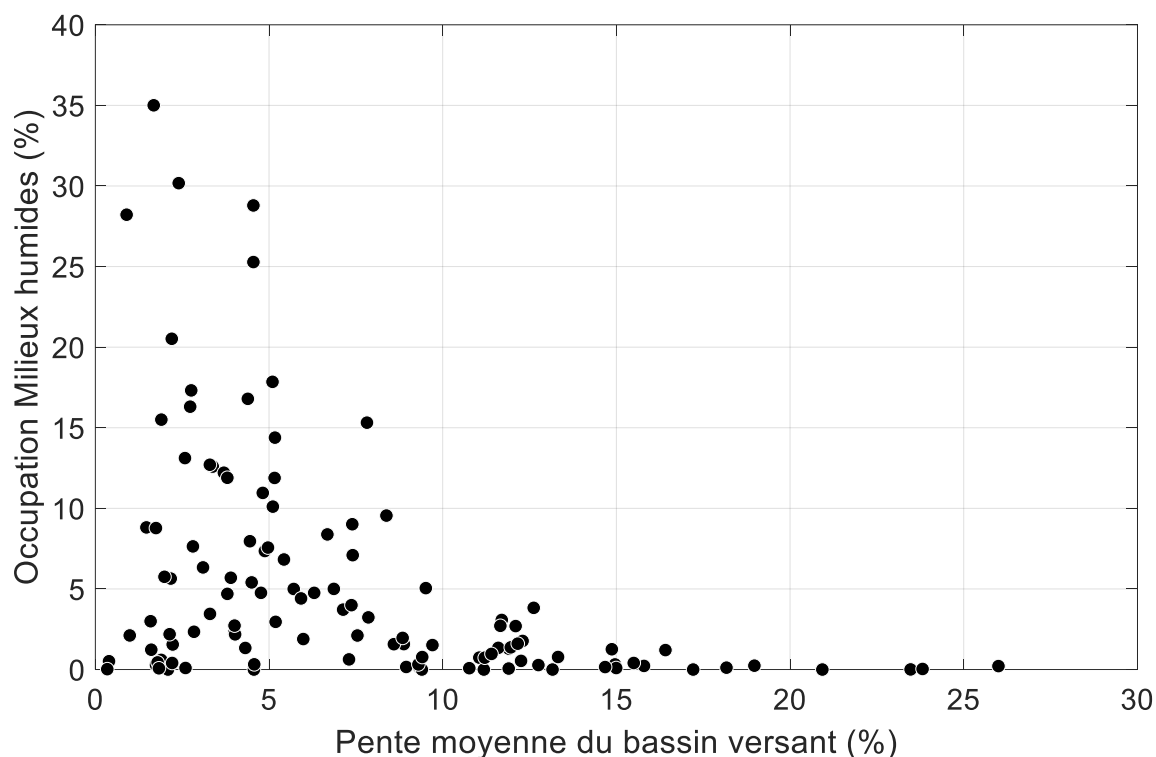


Figure 7.9 - Relation entre la pente moyenne des BV et la présence de milieux humides.

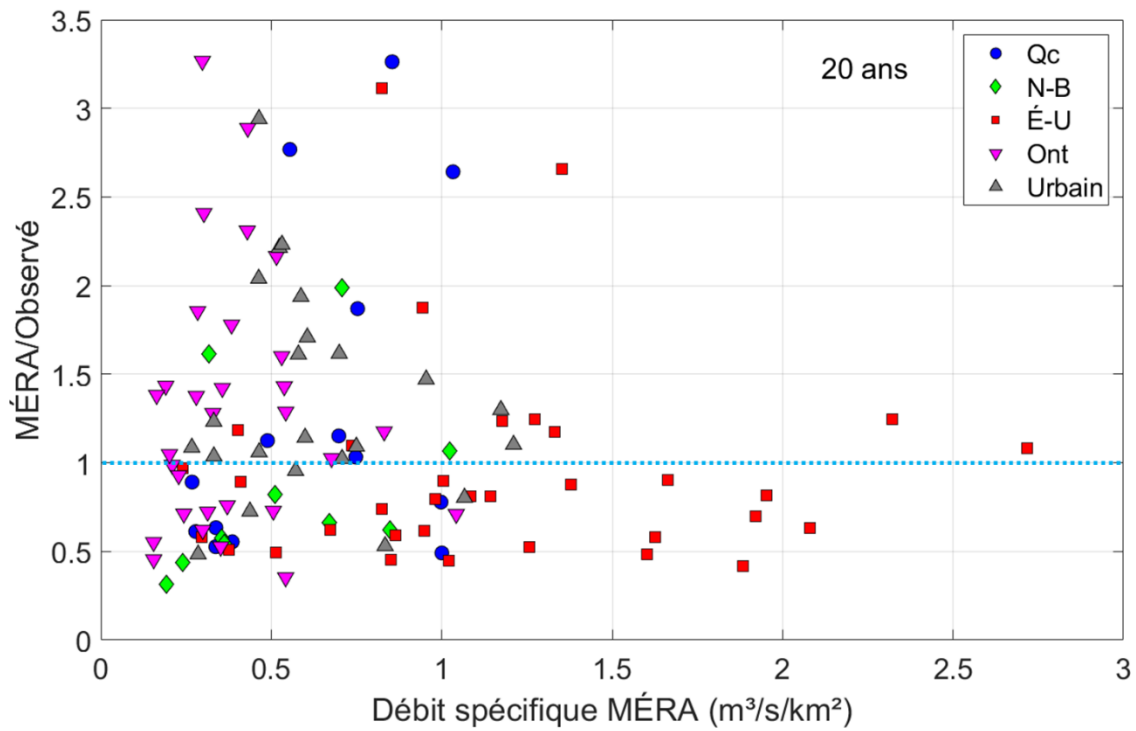
La Figure 7.2 montrant l'importance de la pente moyenne du BV comme facteur explicatif du débit spécifique supporte cette hypothèse. Il est fort possible qu'en présence de conditions de fortes pentes et de sols imperméables, ces caractéristiques l'emportent sur toutes les autres caractéristiques physiographiques qui pourraient réduire ou retarder le ruissellement, par exemple la présence de milieux humides. Ainsi, et comme le montre la Figure 7.9 la présence de milieux humides décroît rapidement avec l'augmentation de la pente moyenne du BV. Dès lors, les fortes pentes à certains BV concourent à créer des conditions hydrologiques globales favorables au ruissellement ce qui expliquerait les plus forts débits spécifiques à ces BV.

À l'inverse, pour le Québec et l'Ontario, les pentes plus faibles et la présence de sols plus perméables favorisent l'infiltration et la rétention des eaux de ruissellement. Dès lors on observe de nombreux BV avec des débits spécifiques plus faibles pour ces deux provinces. Toutefois, il est possible qu'un BV ait une ou plusieurs caractéristiques spécifiques uniques ayant une influence majeure sur les débits spécifiques. Plusieurs scénarios sont dès lors possibles où des caractéristiques, prises en compte ou non par la MÉRA, pourraient expliquer les gammes de valeurs plus étendues des distributions pour

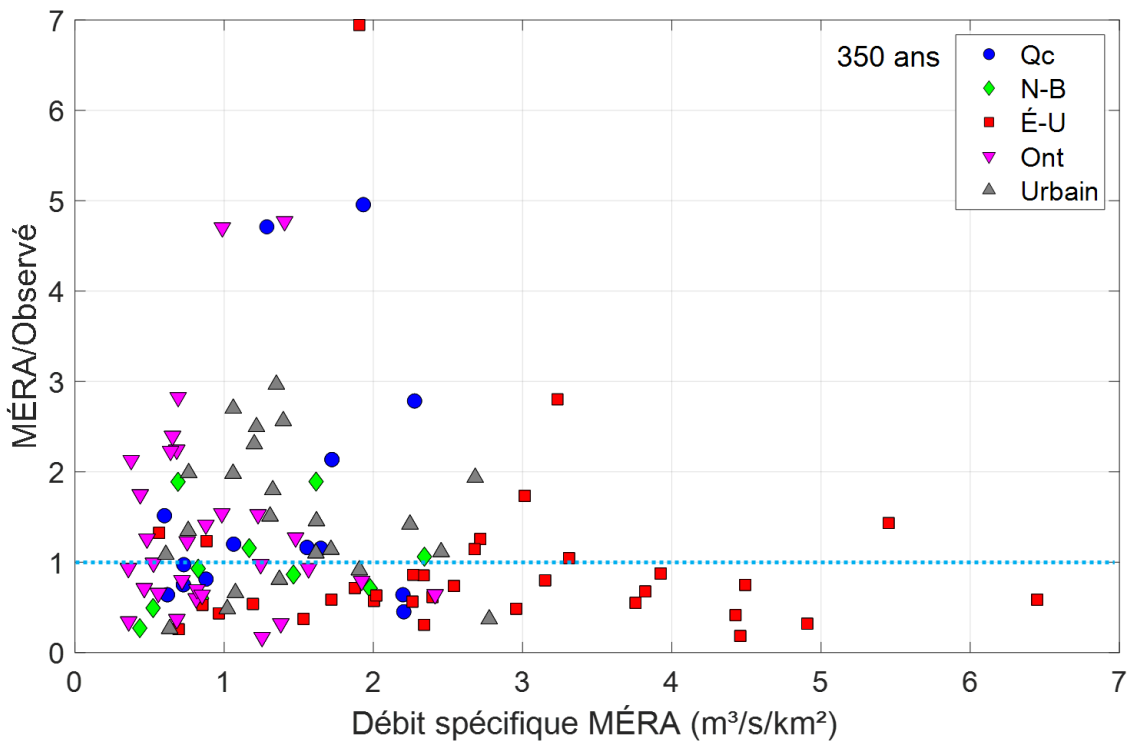
le Québec et l'Ontario comparativement aux États-Unis. À titre d'exemple, Mailhot *et al.* (2021) ont montré que pour certains BV, la structure du réseau hydrographique et plus spécifiquement une division du BV près de l'aval en deux BV de caractéristiques très différentes, peut conduire à une réponse hydrologique complexe conditionnée en partie par les caractéristiques de l'un des sous-bassins. De même, la distribution spatiale des milieux humides (concentré en amont, en aval, directement ou indirectement connectés au réseau hydrographique) peut avoir une incidence sur la réponse hydrologique et les débits spécifiques d'un BV. Ce type de considérations s'explique et se comprend très bien sur la base de considérations hydrologiques qualitatives mais il n'a pas été possible à partir de l'échantillon de BV sous étude de tirer des relations quantitatives entre ces caractéristiques et les valeurs des débits spécifiques estimés aux différents BV.

Ainsi, pour les BV de plus faibles pentes, plusieurs facteurs différents et spécifiques à chaque BV conditionnent le ruissellement et les écoulements ce qui explique la moins bonne performance de la MÉRA pour les BV avec de petits débits spécifiques. L'identification de ces facteurs et leur intégration à la MÉRA (ou à toute autre approche) exigerait de disposer d'un échantillon plus important de BV couvrant une plus large gamme de conditions physiographiques.

Les graphiques de la Figure 7.8 suggère la possibilité de 'corriger' les valeurs des quantiles MÉRA en fonction de la valeur estimée puisque les petits débits spécifiques sont globalement surestimés par la MÉRA. À noter qu'une figure similaire à la Figure 7.8 pour les PdR 5, 10, 25 et 50 ans a été ajoutée à l'Annexe H (Figure H.4). Ainsi on pourrait penser à appliquer un facteur de correction exclusivement aux BV avec de petits débits spécifiques afin de corriger ce biais. Rappelons toutefois que les valeurs en abscisse des graphiques de la Figure 7.8 correspondent aux débits spécifiques observés et non aux débits spécifiques estimés par la MÉRA. Ce faisant, afin de voir si cette distribution des résidus persiste lorsque les débits spécifiques MÉRA sont considérés, des graphiques similaires à ceux de la Figure 7.8 ont été créés avec en abscisses les débits spécifiques MÉRA. La Figure 7.10 présente ces graphiques pour les PdR 20 et 350 ans et montre que dans ce cas les distributions des résidus sont beaucoup plus symétriques et moins 'biaisées'. L'application d'un facteur de correction dépendant de la valeur du quantile MÉRA ne permettrait donc pas d'améliorer la qualité des quantiles issus de la MÉRA.



(a)



(b)

Figure 7.10 – Rapports des DMA estimés à partir de la MÉRA et des quantiles correspondant estimés à partir des données observées (MÉRA/Observé) en fonction du débit spécifique MÉRA pour les BV du Québec (Qc, Groupes A et B), du Nouveau-Brunswick (N-B, Groupe D), des États-Unis (É-U, Groupe E), de l'Ontario (Ont, Groupe F) et BV urbains (Groupe G) pour les PdR : a) 20 ans; b) 350 ans.

7.2.2 Performance de la MÉRA pour les bassins versants urbanisés

D'entrée de jeu, il convient de mentionner que plusieurs des BV avec des occupations urbaines importantes présentent de faibles débits spécifiques. Ceci peut s'expliquer notamment par le fait que les pentes moyennes de ces BV sont relativement faibles (3.3 % en moyenne), mais également par l'occupation urbaine qui bien qu'élevée (> 10 %) ne représente pas l'occupation majoritaire pour l'ensemble des BV (< 25 % pour 10 des 23 BV de ce groupe). Par ailleurs, si l'on examine la Figure 7.7, on voit que les débits spécifiques à ces BV ne se démarquent pas particulièrement des autres BV.

En fait la réponse hydrologique des BV urbains est complexe et ne peut s'expliquer que par les pourcentages d'occupation urbaine. En effet, la densité des zones urbaines (zones résidentielles, commerciales ou industrielles), leur localisation dans le BV (uniformément distribuée, en amont ou en aval), les autres occupations à l'intérieur du BV (forestier, agricole, etc.) et la connectivité des surfaces imperméables au réseau de drainage sont autant de facteurs qui conditionneront les débits spécifiques. Des combinaisons différentes de ces éléments conduiront à des réponses hydrologiques multiples, parfois complexes et très variées. Cette question est abordée à l'Annexe L de Mailhot *et al.* (2021).

La Figure 7.12 permet de comparer le rapport quantile MÉRA/quantile de débit observé selon les débits spécifiques des 23 BV dont l'occupation urbaine est supérieure à 10 % pour les PdR 2, 20, 100 et 350 ans. Des figures similaires pour les PdR 5, 10, 25 et 50 ans ont été ajoutées à l'Annexe H (Figure H.5).

On constate, tel que mentionné plus haut, que certains BV présentent de faibles débits spécifiques même si l'occupation urbaine est importante. À l'inverse, d'autres BV beaucoup moins urbanisés affichent des débits spécifiques comparables à des BV présentant une occupation urbaine bien supérieure. Toutefois, les BV plus urbanisés semblent être généralement associés à des débits spécifiques plus grands pour les PdR 2 et 20 ans.

Il convient d'examiner plus attentivement le BV 01374598 situé dans l'état de New-York aux États-Unis puisque ce BV se distingue par une augmentation majeure des débits spécifiques lorsque la PdR augmente au point tel qu'il surpasse de manière marquée tous les autres BV pour les PdR 100 et 350 ans. On doit d'abord noter qu'un événement extrême a été enregistré en 1999 sur ce BV (Figure 7.11). Tel que discuté précédemment,

une valeur de DMA hors-norme conduit à une queue de distribution plus 'lourde' et donc en des valeurs de quantiles plus élevées pour les grandes PdR. Ainsi, les débits spécifiques pour ce BV sont très élevés sans toutefois être exceptionnels. L'examen des Figures 7.5 et 7.8, montre que d'autres BV, notamment aux États-Unis ont des débits spécifiques similaires ou supérieurs pour toutes les PdR.

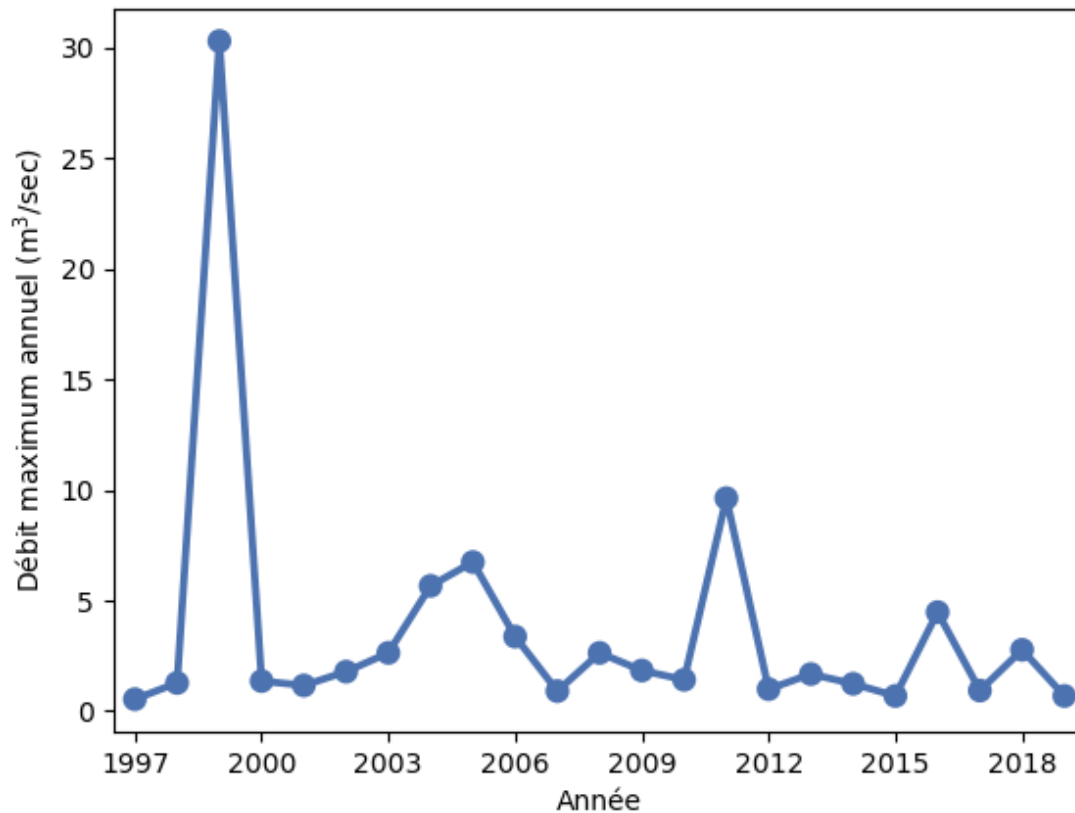


Figure 7.11 - Séries des DMA (juin à novembre) à la station NY 01374598 (état de New York aux États-Unis).

Malgré une grande complexité associée à l'occupation urbaine et aux débits spécifiques, une analyse plus globale de la Figure 7.12 conduit à des conclusions similaires à celles obtenues pour l'ensemble des BV à l'étude (Figure 7.8) :

1. Les débits MÉRA sont dans l'ensemble plus élevés que les débits observés (fraction > 1). Sur 23 BV, la MÉRA surestime les valeurs observées à 16, 18, 16 et 17 BV considérant les PdR 2, 20, 100 et 350 ans respectivement;
2. Les surestimations sont plus grandes lorsque les débits spécifiques sont plus petits;

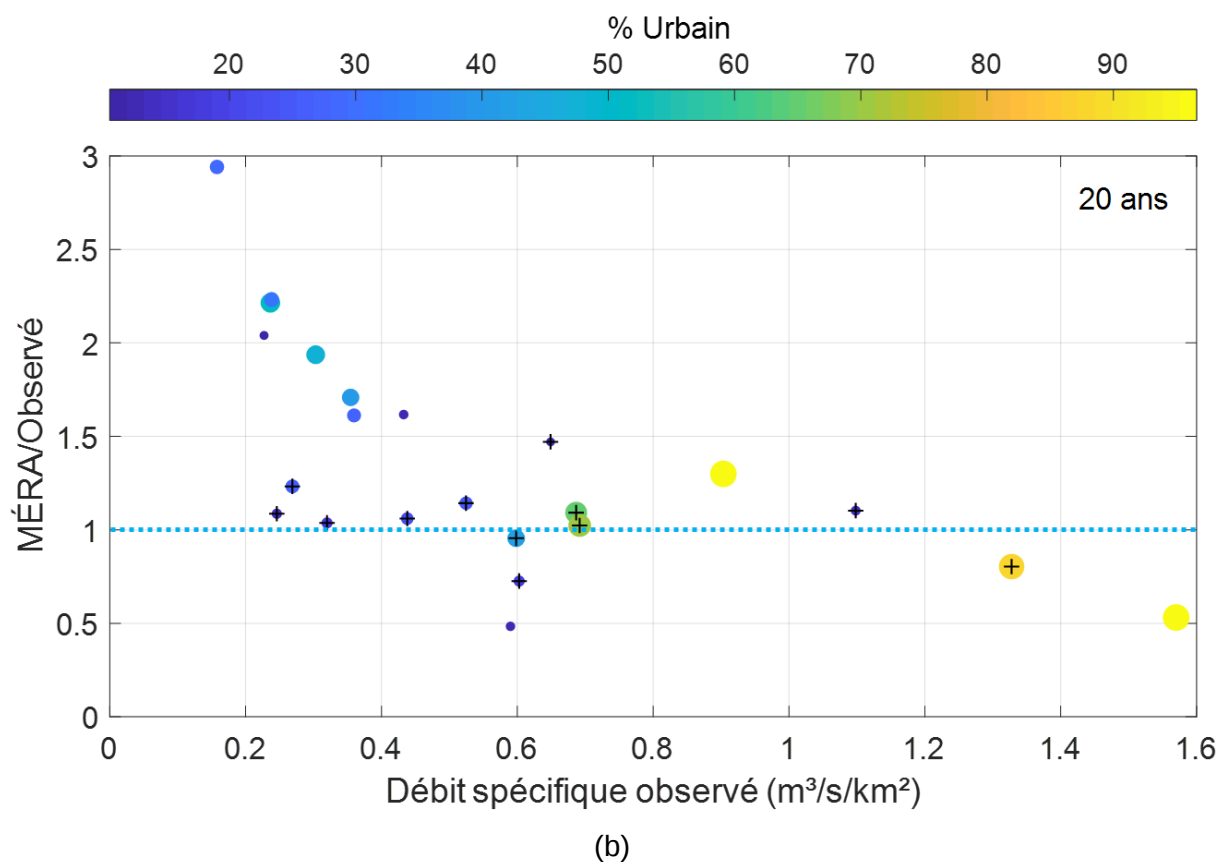
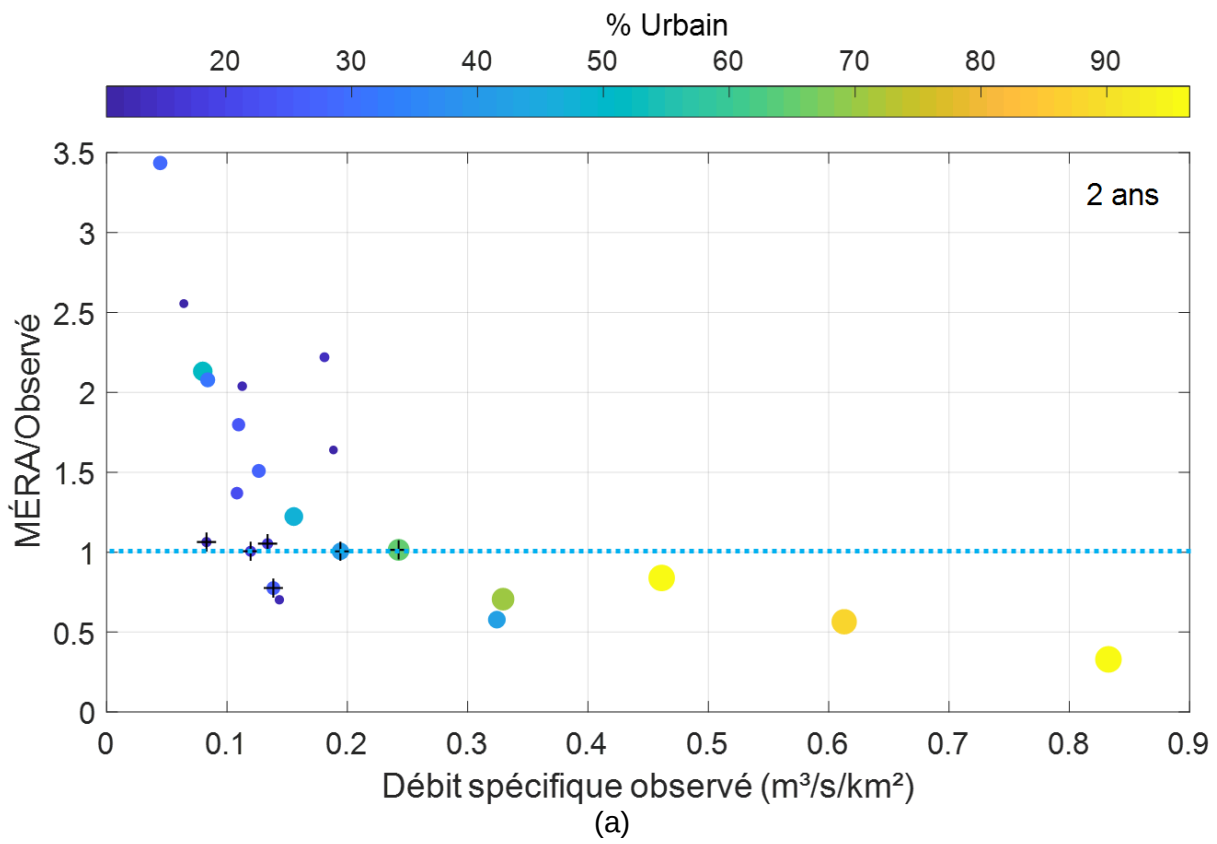
3. Malgré une tendance à la surestimation on remarque dans certains cas des sous-estimations importantes (fraction < 1);
4. L'augmentation de la PdR se traduit par une augmentation du nombre de BV à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95 % du quantile de débits observés (6, 13, 14 et 17 sur 23 BV pour les PdR 2, 20, 100 et 350 ans respectivement).

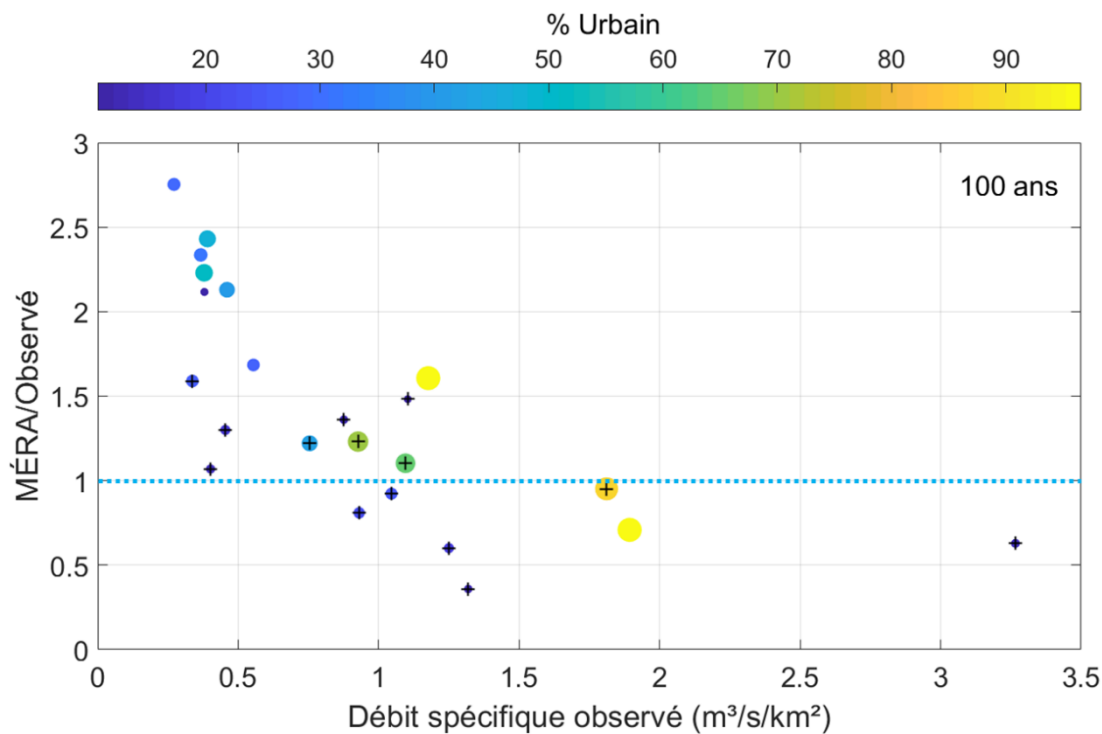
Sur la base de ces résultats, rien ne permet de conclure que l'utilisation de la MÉRA est inadéquate pour des BV plus urbanisés. Il est important de rappeler que l'occupation urbaine est prise en compte dans la MÉRA à travers le CR (voir Section 5.1). Toutefois, certaines mises en garde s'imposent :

1. Pour la PdR 2 ans, des sous-estimations importantes s'observent pour les BV plus urbanisés;
2. Pour les PdR 20, 100 et 350 ans, des sous-estimations importantes sont possibles pour des BV beaucoup moins urbains. Cependant, pour tous ces cas sauf un, les débits MÉRA se situent à l'intérieur de l'intervalle de confiance des quantiles de débits observés;

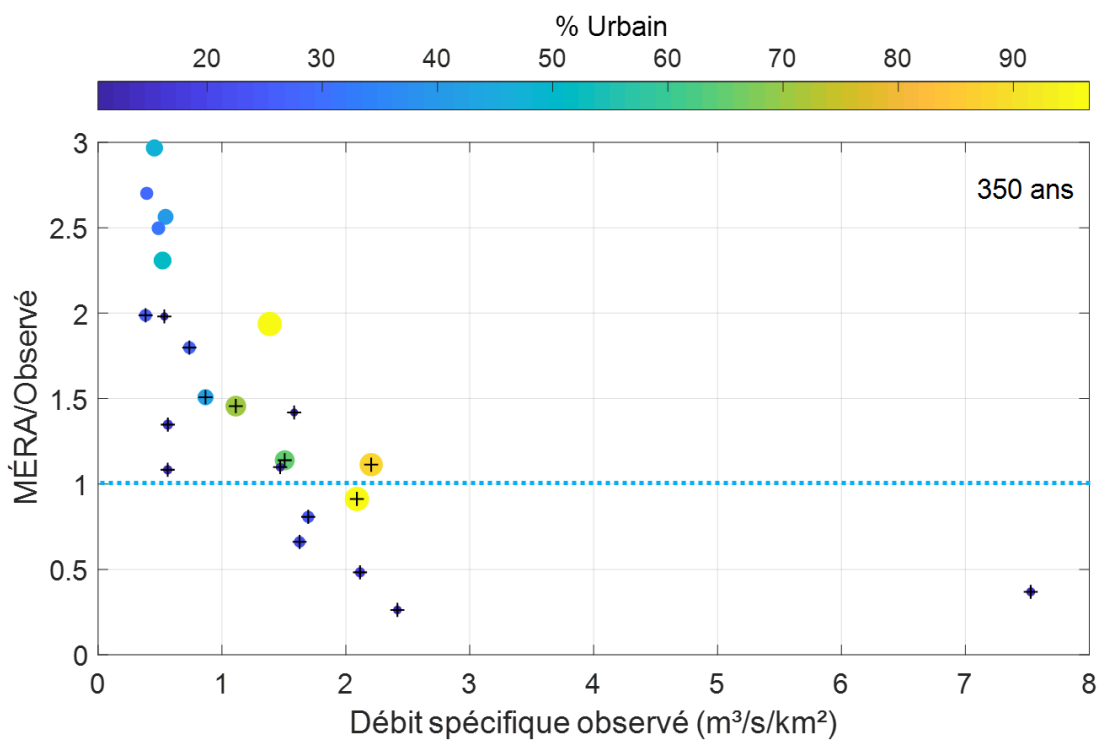
Pour les PdR 100 et 350 ans, toutes les sous-estimations, à l'exception d'une, sont caractérisées par des débits MÉRA se trouvant à l'intérieur de l'intervalle de confiance des quantiles de débits observés.

Finalement, il faut noter que la MÉRA dans sa version actuelle ne prend pas en compte la fraction d'occupation urbaine dans l'estimation du TC. Une fraction urbaine importante pourrait résulter en des TC plus courts et des intensités de pluies plus importantes et donc en une sous-estimation des quantiles DMA par la MÉRA.





(c)



(d)

Figure 7.12 – Rapport entre quantiles DMA estimés à partir de la MÉRA et quantiles DMA estimés à partir des séries observées (MÉRA/Obs.) pour les BV dont l'occupation urbaine est supérieure à 10 % pour les PdR : a) 2 ans; b) 20 ans; c) 100 ans; d) 350 ans. Le code de couleur indique le % d'occupation urbaine et les croix signifie que le quantile MÉRA est à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95 % du quantile observé.

7.2.3 Performance générale de la MÉRA

Les analyses précédentes ont permis de développer une version de la MÉRA où les probabilités de surestimations et de sous-estimations des quantiles observés sont égales. Les surestimations sont cependant plus probables pour les BV caractérisés par de plus petits débits spécifiques. Ces travaux ont également permis d'estimer les intervalles de confiance des valeurs estimées par la MÉRA. Ainsi les quantiles DMA observés ont une probabilité de 80% de se trouver entre 0.5 fois la valeur MÉRA et 2 fois la valeur MÉRA. Peu d'études se sont attardées à la validation de la MÉRA. La présente étude est l'une des premières (étonnamment) à procéder à une validation à grande échelle de la MÉRA sur des BV de petites tailles et présentant des caractéristiques physiographiques très diverses (moins de 250 km²).

7.3 Comparaison de la MÉRA à INFO-Crue

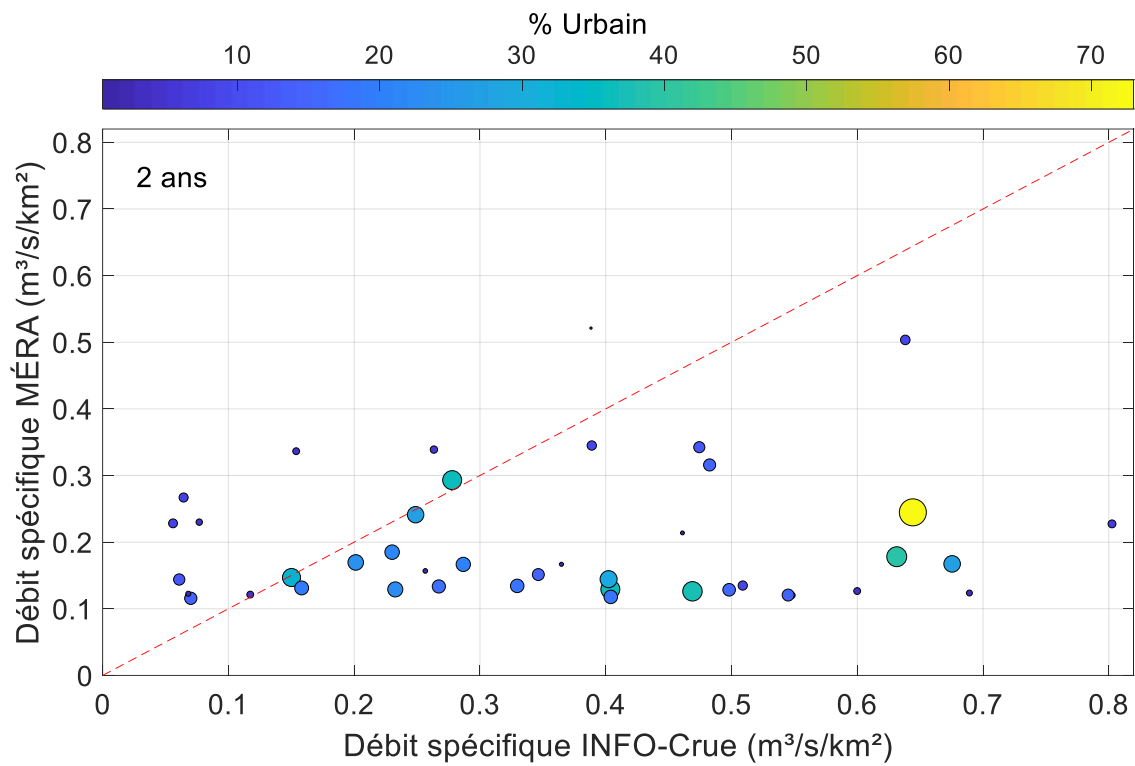
La présente section montre les résultats de la comparaison des quantiles MÉRA aux quantiles simulés par INFO-Crue pour les 42 BV prioritaires INFO-Crue (Groupe C; voir Section 3.3). Tous ces BV sont situés au Québec et aucune donnée mesurée n'est disponible. L'objectif de la comparaison de ces quantiles estimés (MÉRA) et simulés (INFO-Crue) est de voir dans quelle mesure ces deux ensembles de valeurs sont cohérents. Tous ces BV ont des superficies de moins de 50 km².

La Figure 7.13 présente les quantiles DMA estimés à partir des débits simulés dans INFO-Crue en fonction des quantiles estimés par la MÉRA. Cette figure montre une très faible corrélation entre ces deux ensembles de valeurs pour les PdR 2, 20, 100 et 350 ans, les R^2 étant tous inférieurs à 0.1. Les résultats pour les PdR 5, 10, 25 et 50 ans sont similaires et présentés à la Figure H.6 de l'Annexe H.

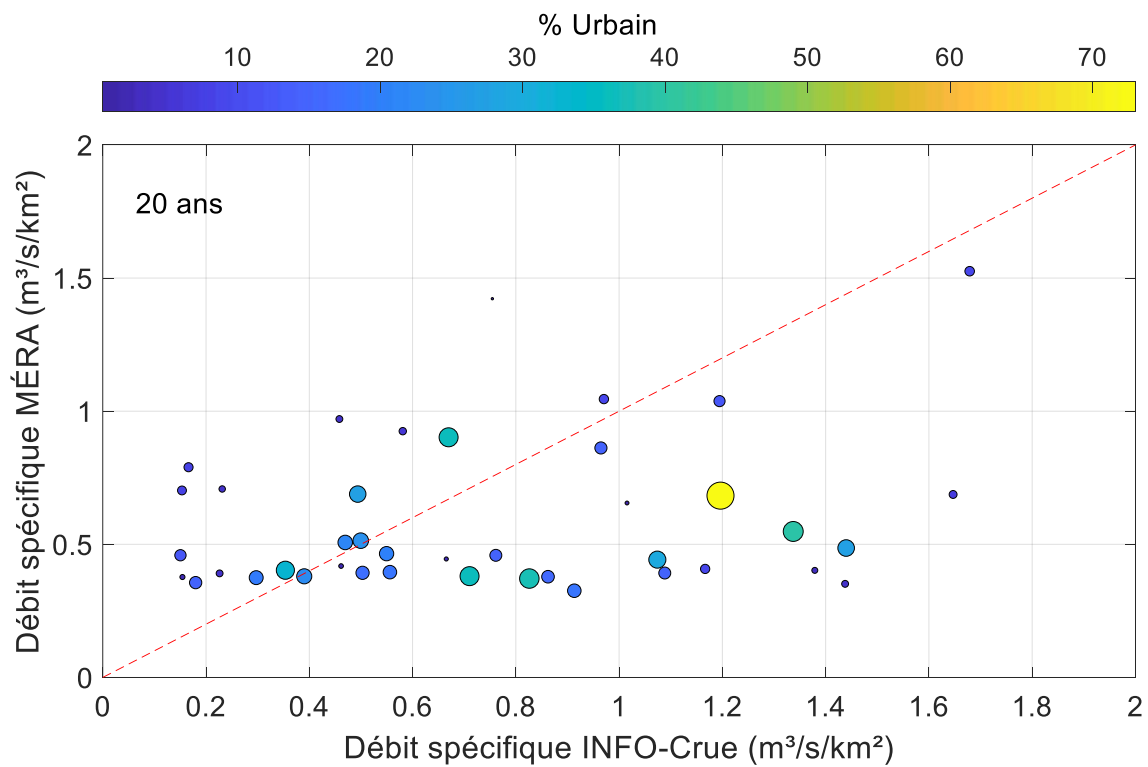
Comment expliquer un tel résultat ? D'abord concernant les simulations INFO-Crue, la modélisation hydrologique utilisée est mal adaptée à la simulation des petits BV. En effet la représentation des processus à fines échelles que ce soit à cause de la résolution spatiale et temporelle du modèle, des données d'entrée, de sa paramétrisation et du calage font en sorte qu'il est raisonnable de penser que les débits simulés sont peu représentatifs des débits réels. Par ailleurs, les estimations de la MÉRA, comme la Section 7.2 l'a montré, sont relativement incertaines et doivent être vus comme une première approximation des quantiles observés. Ainsi comparer deux groupes de valeurs possiblement très incertains, le premier à cause des hypothèses entourant la modélisation

hydrologique, le second à cause des incertitudes liées à la nature empirique des estimés MÉRA, ne permet pas de tirer de conclusion claire sur la qualité respective de ces deux ensembles et surtout sur la qualité réelle des quantiles INFO-Crue.

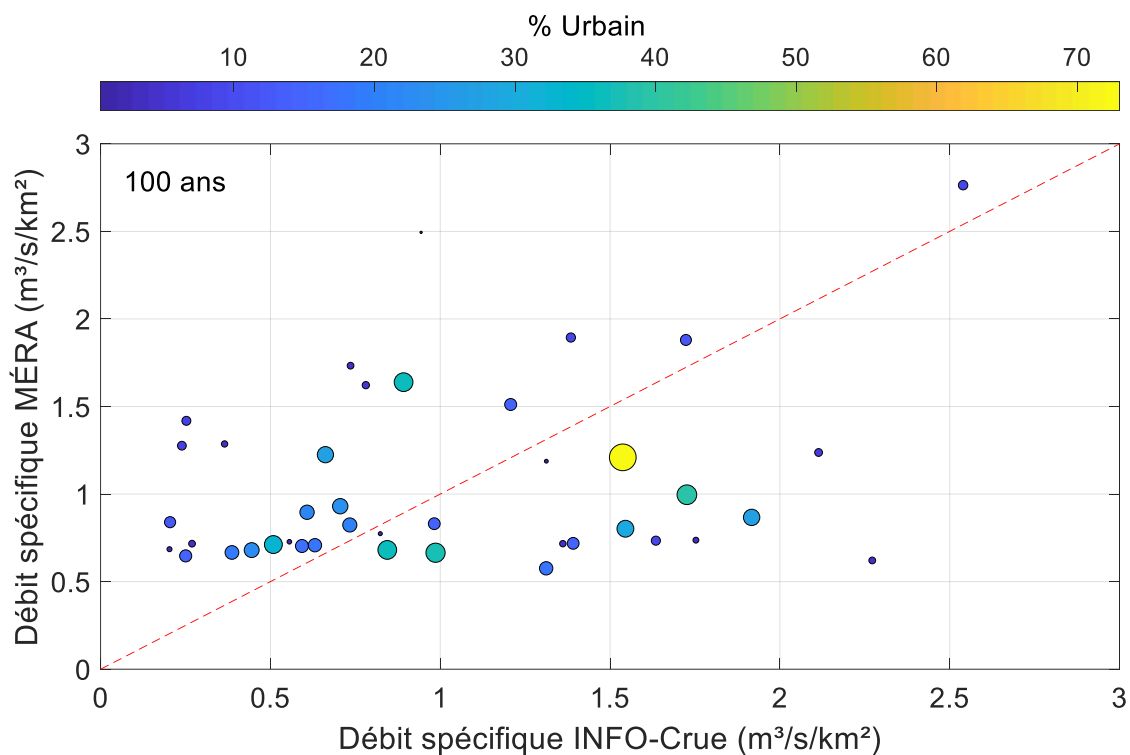
Concernant l'aspect urbain des BV, il est difficile de tirer quelque conclusion que ce soit. L'accord entre les valeurs MÉRA et INFO-Crue n'est pas fonction de l'occupation urbaine.



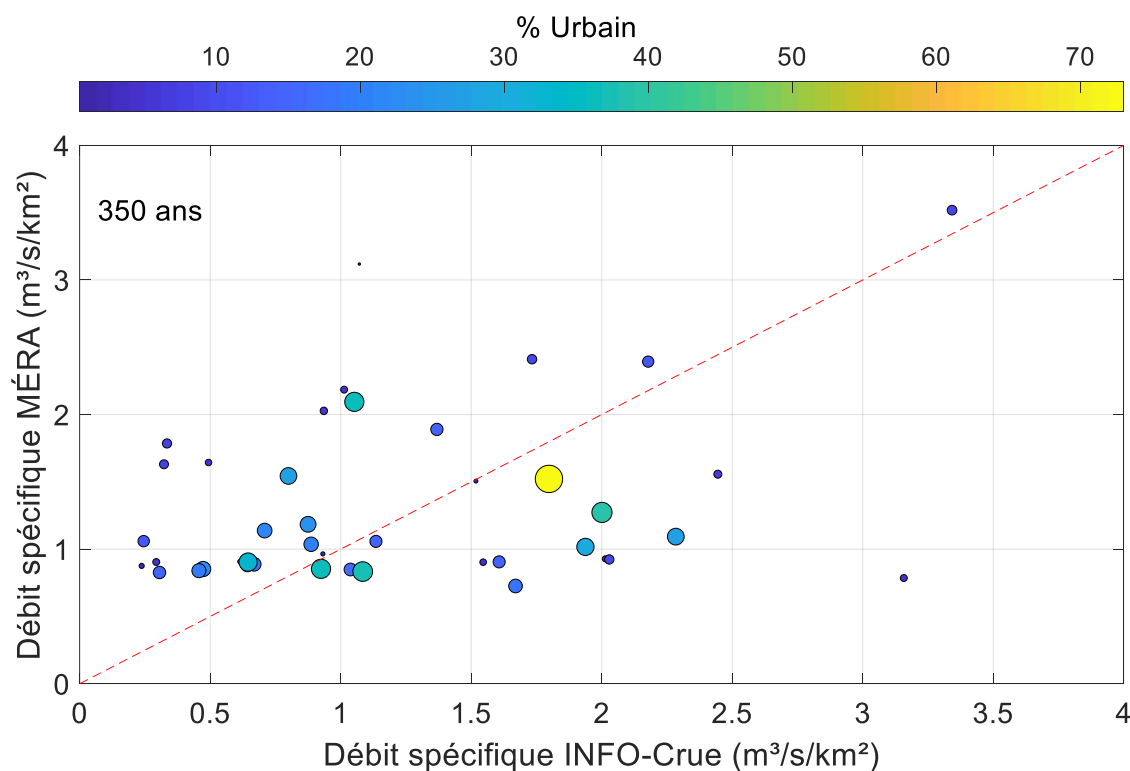
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 7.13 - Comparaison des quantiles de débits spécifiques estimés par la MÉRA en fonction des quantiles correspondants estimés à partir des débits simulés INFO-Crue pour les 42 BV prioritaires (Groupe C) pour les PdR a) 2 ans, b) 20 ans, c) 100 ans et d) 350 ans. Le code de couleur indique le % d'occupation urbaine.

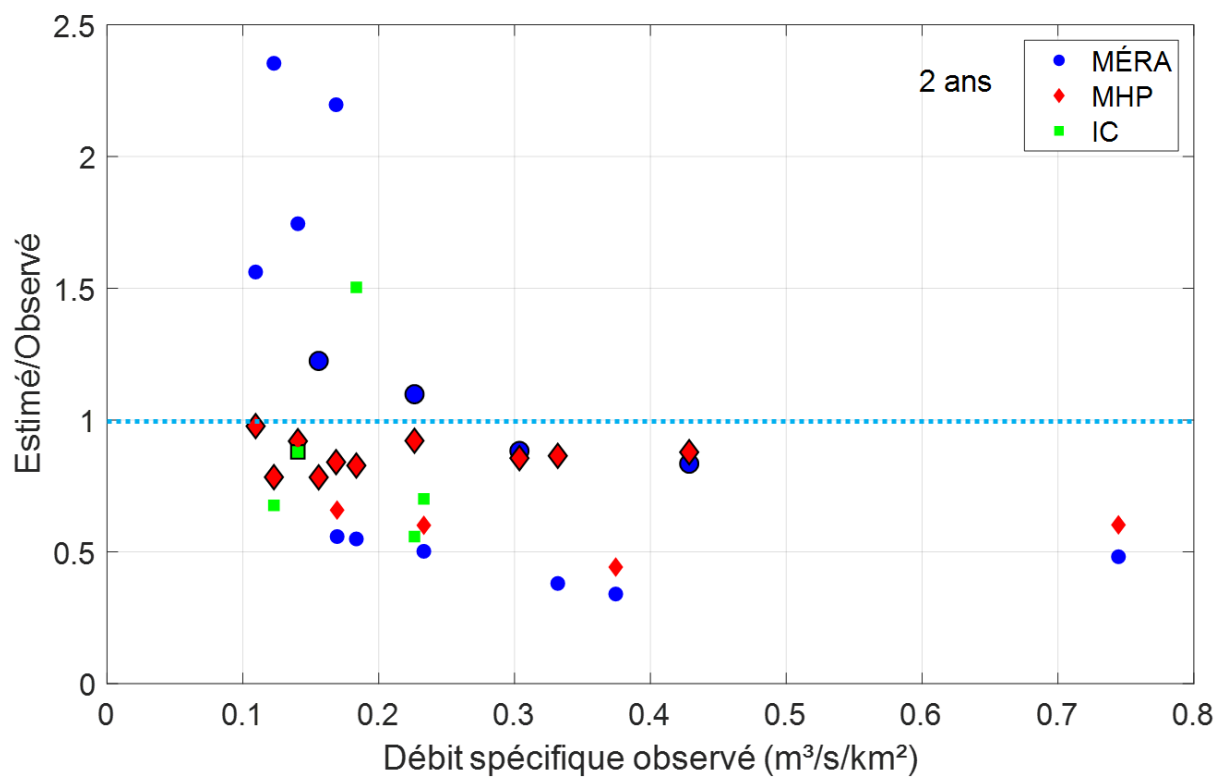
7.4 Comparaison de la MÉRA, du modèle hydrologique parcimonieux et d'INFO-Crue aux valeurs observées

Les quantiles DMA estimés avec la MÉRA et le MHP ont été comparés aux quantiles observés pour tous les BV des Groupes A et B (14 BV) et aux quantiles INFO-Crue pour les BV du Groupe A (5 BV).

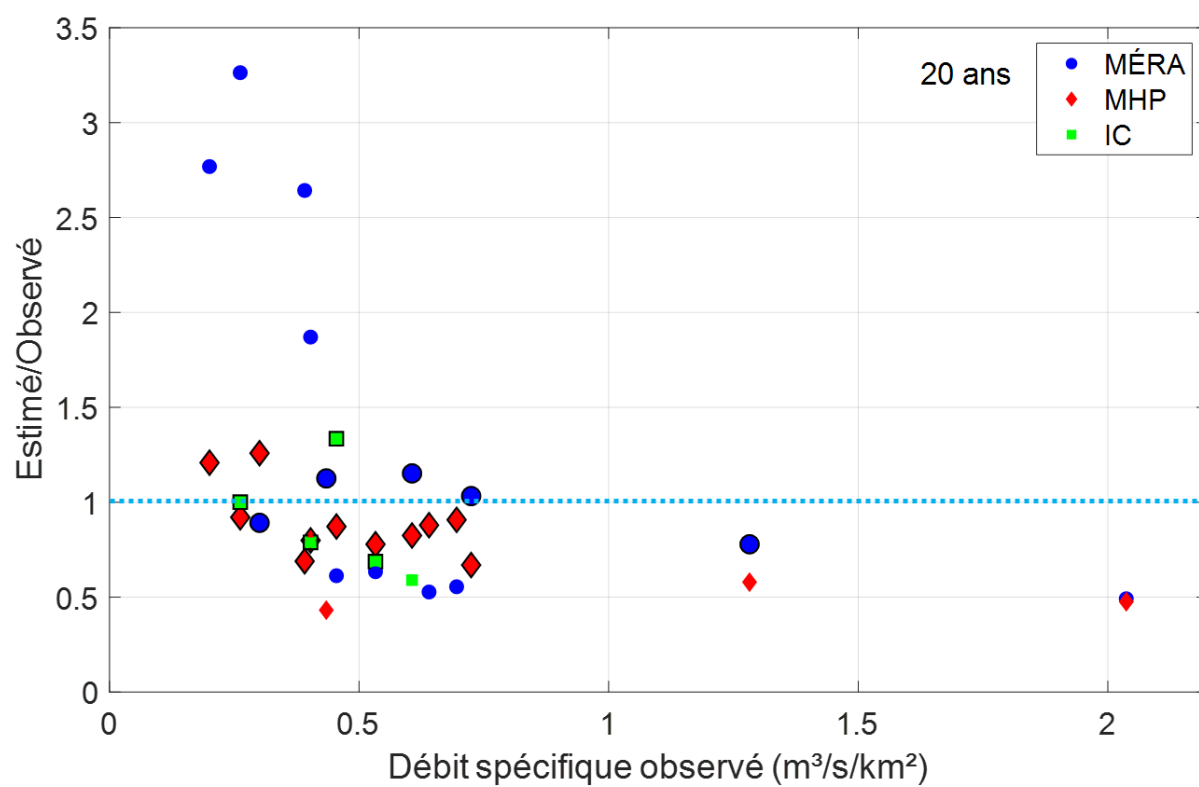
La Figure 7.14 présente les rapports débits estimés/quantiles de débits observés pour les PdR 2, 20, 100 et 350 ans en fonction des quantiles DMA observés pour les trois approches. La Figure H.7 de l'Annexe H présente les résultats correspondants pour les PdR 5, 10, 25 et 50 ans.

D'emblée, il est important de dire que l'échantillon de BV permettant de comparer les différentes approches est trop petit pour évaluer leur performance relative. Certains constats se dégagent de l'examen de la Figure 7.14 :

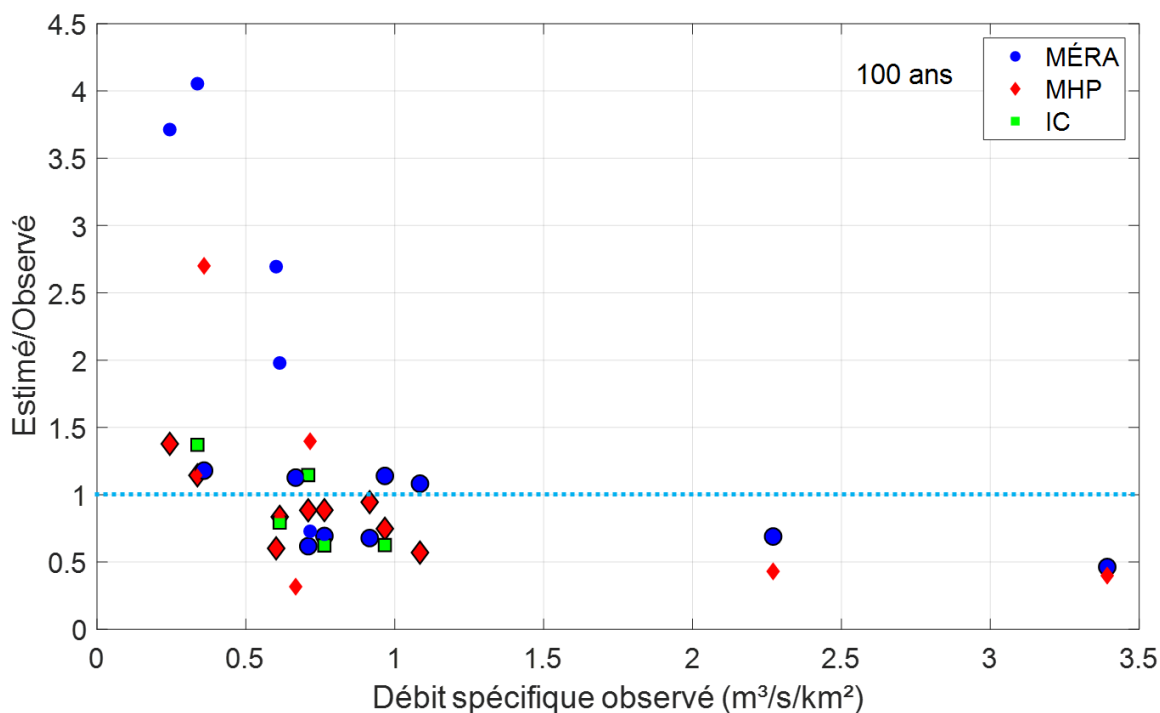
1. Pour les PdR 2, 20 et 100 ans, les débits provenant du MHP et d'INFO-Crue sous-estiment presque systématiquement les valeurs observées (Estimé/Observé < 1). Cependant, dans la plupart des cas, notamment pour les PdR 20 et 100 ans, les valeurs estimées se situent à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95 % des quantiles de débits observés.
2. Pour les plus petits débits spécifiques, la MÉRA a tendance à surestimer les quantiles observés ce qui n'est pas le cas pour le MHP ou INFO-Crue. Ce constat est valable notamment pour les PdR 2, 20 et 100 ans.
3. Pour les plus grands débits spécifiques, la dispersion des valeurs Estimé/Observé est moins importante et ce pour toutes les PdR.
4. Les valeurs des rapports des quantiles INFO-Crue/Observé se situent globalement entre 0.5 et 1.5. Il est toutefois difficile de conclure quoi que ce soit sur la performance réelle des simulations INFO-Crue à partir d'un échantillon si petit de BV.
5. Pour la PdR 350 ans, il est très difficile de dresser un portrait global de la situation. Les quantiles associés à cette PdR ont été considérés mais comme l'on montré les analyses précédentes, les incertitudes d'estimation de ces quantiles, quelles que soient les séries considérées (observées, estimées ou simulées), sont tellement importantes qu'on peut présumer qu'elles sont comparables voire supérieures aux erreurs d'estimation des différentes approches.



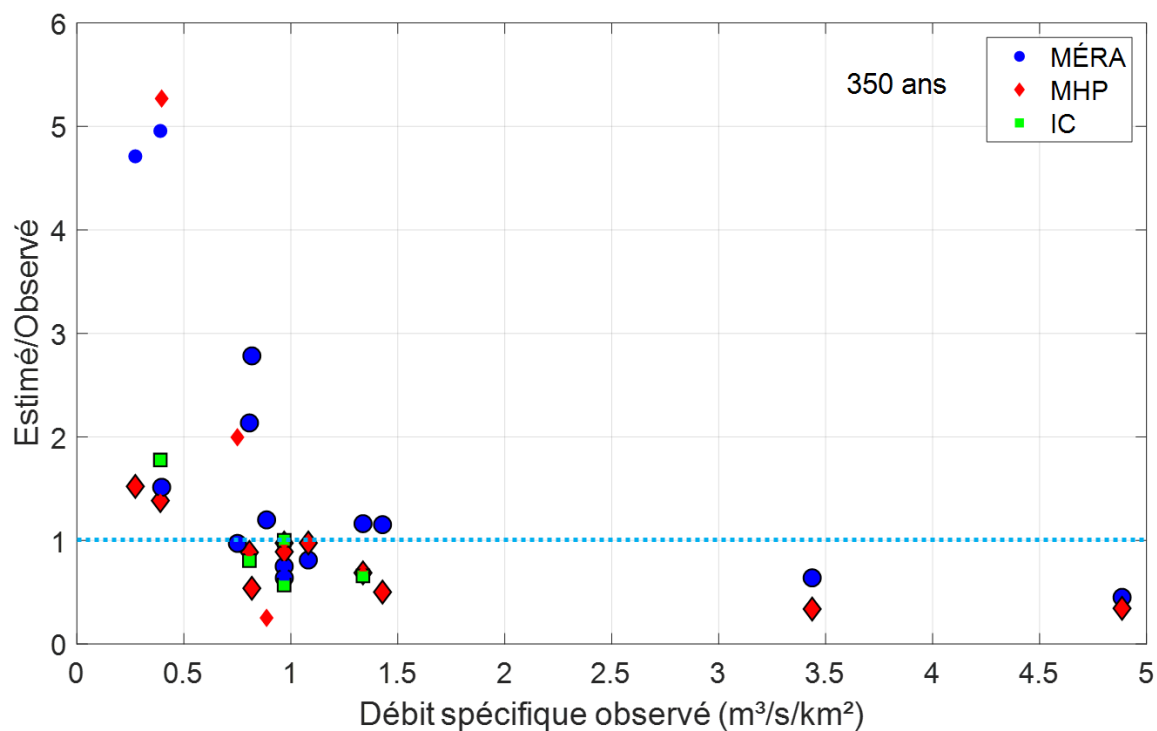
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 7.14 - – Rapport des quantiles estimés selon les différentes approches aux quantiles estimés à partir des données observées pour les BV du Québec (Qc, Groupes A et B) et pour les périodes de retour : a) 2 ans; b) 20 ans; c) 100 ans; d) 350 ans. Les symboles entourés d'un trait noir indiquent que les débits estimés sont à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95 % du quantile de débit observé. MÉRA : méthode rationnelle, MHP : modèle hydrologique parcimonieux, IC : INFO-Crue.

7.5 Synthèse et conclusion

En résumé, les résultats précédents montrent que :

MÉRA : La MÉRA permet une première estimation des quantiles DMA (juin-novembre) aux BV sous étude. Les analyses ont permis par ailleurs de quantifier le niveau d'incertitude des valeurs estimées selon cette approche. Son principal avantage réside dans sa simplicité conceptuelle et de mise en place. En effet, elle peut facilement et rapidement être appliquée à l'ensemble des BV du Québec méridional à partir des données physiographiques généralement disponibles. Les quantiles MÉRA peuvent cependant surestimer les quantiles observés pour les BV avec de petits débits spécifiques.

MHP : La performance du MHP, en l'occurrence du modèle GR5H, est intéressante. Celui-ci tend à sous-estimer les quantiles observés ce qui pourrait s'expliquer par la résolution temporelle du modèle et des données d'entrée utilisées. Un facteur de correction pourrait être appliqué pour corriger ce biais. L'application à un plus grand ensemble de BV est nécessaire cependant pour évaluer la valeur réelle de ce type d'approche dans un contexte d'application à grande échelle. Ceci exige cependant de disposer de données de débits mais aussi de données météorologiques (précipitations, températures) locales fiables en plusieurs sites. L'application de ce type d'approche à des BV non jaugés nécessite de préciser les valeurs de paramètres du modèle. Deux approches sont dès lors possibles. Une première où des paramètres globaux ou régionaux sont définis et l'autre où des relations fonctionnelles entre les paramètres du modèle et certaines caractéristiques physiographiques sont établies. Dans un cas comme dans l'autre, le développement et la validation de ce type d'approche reposent sur un échantillon suffisant de BV où débits et données météorologiques de bonne qualité sont disponibles.

INFO-Crue : La performance des quantiles INFO-Crue n'a pu être établie de façon convaincante puisque seuls cinq BV de petites superficies avaient à la fois des débits observés et étaient simulés dans INFO-Crue. Par ailleurs, la comparaison des quantiles MÉRA et INFO-Crue aux 42 BV prioritaires d'INFO-Crue (Groupe C) ne permet pas de tirer de conclusions claires quant à la performance des simulations d'INFO-Crue. En effet l'accord entre ces deux quantiles MÉRA et INFO-Crue reste très faible. On peut présumer cependant, compte tenu des hypothèses et de la configuration de la modélisation hydrologique que cette modélisation n'est pas adéquate et représentative des conditions

hydrologiques prévalant à l'échelle de ces petits BV. Une analyse plus exhaustive serait nécessaire mais là encore tributaire des données disponibles.

BV urbains : Une attention particulière a été portée aux BV urbains. Un groupe spécifique de BV (Groupe G) a été créé regroupant les BV avec plus de 10% d'occupation urbaine (23 BV situés en Ontario et aux États-Unis). Les analyses préliminaires ont montré que les séries des DMA (juin-novembre) à plusieurs de ces BV présentent des tendances significatives à la hausse que l'on peut associer à des augmentations progressives de la fraction urbaine de ces BV (voir Section 4.3). Les analyses réalisées n'ont pas permis de conclure en une contre-performance de l'une ou l'autre des approches pour ce type de BV. Toutefois, et les raisons en sont simples, la réponse hydrologique de ce type de BV est complexe et se caractérise souvent par un hydrogramme avec plusieurs débits de pointe successifs associés aux contributions provenant des zones urbanisées et rurales du BV. Ainsi, une première pointe de débits rapide et brève est souvent observée que l'on associe aux zones urbaines, suivie d'une ou plusieurs autres pointes plus tardives et plus laminées, provenant cette fois des zones non-urbanisées. L'approche MÉRA tient compte de la fraction urbaine à travers le coefficient de ruissellement. Cependant, la fraction urbaine n'intervient pas dans l'estimation du temps de concentration ce qui pourrait résulter en une surestimation de ce dernier et donc à une sous-estimation des quantiles DMA par la MÉRA lorsque la fraction urbaine est importante. Enfin il faut noter que les BV utilisés pour le développement de la version de la MÉRA utilisée dans le cadre du présent projet ne comptaient aucun BV avec plus de 17% de milieu urbain (Mailhot *et al.*, 2021).

Incertitudes versus complexité : L'estimation des quantiles de DMA à partir de différentes approches peut être vu comme un équilibre entre deux positions opposées. À un bout du spectre, on peut recourir à une représentation plus fine et détaillée de l'hydrologie d'un BV (p. ex. suite à la mise en place d'un modèle hydrologique) qui, en général, permettra de tenir compte de plusieurs processus à fine échelle et, possiblement, d'estimer plus justement les quantiles DMA. La contrepartie est que la mise en place de ce type d'approche exige du temps et des données mesurées (débits, précipitations, températures) fiables sur un grand nombre de sites. À l'autre extrême on retrouve les approches plus 'simples', 'empiriques' qui nécessitent peu de données ou des données facilement accessibles mais qui fournissent des valeurs plus incertaines voire des 'ordres de grandeur' (p. ex. la MÉRA). On voit donc intuitivement qu'il existe un certain lien entre la complexité des approches, le volume de données nécessaire à leur mise en place et la

qualité escomptée des estimations (une méthode pourra cependant être ‘inutilement’ complexe ou sur-paramétrée). Dans le cadre de la présente étude, dont le principal objectif est l’estimation à grande échelle des quantiles DMA à des BV non jaugés de moins de 250 km², les données constituent sans conteste l’enjeu clef. La seule approche retenue qui, malgré ses limites et ses défauts, peut être appliquée à grande échelle est la MÉRA. Certes la version proposée pourrait sans doute être améliorée (bien que les auteurs pensent que ces améliorations resteraient relativement marginales) mais c’est la seule approche, et la plus simple, qui réponde à cet objectif et dont la performance a pu être évaluée sur un nombre important de BV de moins de 250 km² de caractéristiques physiographiques diverses et représentatives du Québec méridional.

Quantiles DMA de grandes périodes de retour : Les quantiles DMA de PdR 100 et 350 ans ont été considérés dans le cadre de cette étude à la demande du MELCC. Les séries de débits disponibles, qu’elles soient simulées ou observées, comportent 15 ans ou plus et en moyenne de l’ordre de 25 ans. La distribution retenue pour l’ajustement de ces séries est la distribution GEV comportant trois paramètres désignés respectivement par paramètre de position, d’échelle et de forme. Le paramètre de forme demeure le paramètre le plus ‘difficile’ à estimer et donc le plus incertain. Or, ce paramètre conditionne la forme de la queue de la distribution et donc les quantiles associés aux grandes PdR dans le cas présent les PdR 100 ans et particulièrement 350 ans. Ces quantiles sont donc très incertains, ce qui ne saurait surprendre puisqu’ils correspondent à des événements beaucoup plus intenses que ceux susceptibles d’avoir été observés pendant une période de 15 à 30 ans. Ces comparaisons entre quantiles estimés et observés de PdR 350 ans ont été présentées mais elles sont difficilement exploitables pour tirer quelque conclusion que ce soit puisque les incertitudes d’estimation des quantiles observés sont trop importantes. Enfin, plusieurs séries DMA aux États-Unis ont permis également de montrer la relative sensibilité des quantiles de grandes PdR à la présence d’événements ‘hors-normes’ (souvent l’ouragan Irène). En effet, la présence d’un événement très extrême dans une série relativement courte conduit à accorder une probabilité d’occurrence importante à ce type d’événements et donc à ‘gonfler’ les valeurs des quantiles extrêmes estimés après ajustement de la GEV aux séries DMA. Ceci doit également être pris en compte quand les quantiles de PdR 100 ou 350 ans sont utilisés et montre l’importance de demeurer prudent.

CHAPITRE 8. ÉVOLUTION DES DMA EN CLIMAT FUTUR

Ce chapitre présente l'ensemble des comparaisons entre les projections futures des quantiles DMA. Deux approches sont ainsi comparées à savoir celles proposées par Mailhot *et al.* (2021) reposant sur la MÉRA et où l'évolution future des quantiles DMA est dictée par les changements des intensités des courbes IDF (Section 8.2) et l'autre utilisant les résultats des simulations de l'Atlas hydroclimatique (Section 8.3). Après une présentation de ces deux approches et des projections des DMA résultantes, une comparaison des projections selon ces deux approches est présentée et discutée à la Section 8.4.

Trois périodes futures de 30 ans sont considérées dans les analyses qui suivent : 2011-2040, 2041-2070 et 2071-2100.

8.1 Considérations générales sur les crues au Québec

L'hydrologie des crues au Québec est relativement complexe puisque plusieurs processus hydrologiques différents entrent en jeu et peuvent conduire à des crues de nature et d'ampleur très différentes. Ainsi si en climat passé les crues annuelles les plus importantes sont très souvent associées aux crues printanières, qui peuvent perdurer sur de longues périodes, les crues estivales, plus courtes et soudaines, sont également possibles (voir la Section 4.3). D'autres crues surviennent également en période hivernale généralement associées à des épisodes de redoux ou à des pluies hivernales en présence ou non de couvert de neige.

Cette diversité de processus générateurs de crues complexifie l'analyse quant à l'évolution future de la fréquence et de l'intensité de ces différents types de crues. Dans une optique de réchauffement global des températures, on peut escompter des crues printanières plus hâtives. Ces crues pourraient également être de moindres importances considérant le réchauffement important des températures hivernales, l'occurrence plus fréquente de précipitations liquides et donc la réduction des stocks de neige disponibles pour la fonte. Cependant, considérant que les projections suggèrent aussi une augmentation des précipitations hivernales, une augmentation des crues printanières n'est pas à exclure. Par ailleurs, les hausses relativement importantes des pluies extrêmes en périodes estivales et automnales devraient se traduire par une hausse de la fréquence et de l'intensité des crues durant ces périodes. Enfin, un réchauffement des

températures devrait conduire à des conditions de pluies hivernales plus fréquentes et à des couverts de glace plus minces et plus prompts à se rompre en période de redoux.

Ces analyses suggèrent que l'on assistera à une redistribution de la saisonnalité des crues. Si les crues printanières dominent le paysage des crues annuelles du passé récent au Québec, on peut penser que ces crues seront moins dominantes à l'échelle annuelle et que les crues en périodes hivernales et durant les saisons estivales et automnales dépasseront plus fréquemment les crues printanières. Cette redistribution aura des conséquences très importantes en matière de délimitation des zones inondables. L'analyse des simulations de l'Atlas hydroclimatique (Section 8.3) permettra d'examiner plus attentivement cette question.

8.2 Projections futures des DMA basées sur l'approche MÉRA

Les chapitres précédents ont montré que la seule information à caractère climatique introduite dans le calcul des quantiles MÉRA provient des courbes IDF. Dans ce contexte, une intensification des intensités de pluies extrêmes en périodes estivales et automnales se traduira directement par une augmentation des quantiles DMA correspondants. Une telle hypothèse ne tient pas compte cependant de possibles changements aux conditions antérieures d'humidité qui pourraient favoriser, dans l'optique d'un climat plus humide, une intensification encore plus importante des DMA par rapport aux pluies extrêmes.

Les projections actuelles suggèrent des hausses très marquées des précipitations extrêmes dans les décennies à venir. Les événements les plus extrêmes et les plus courts seraient plus affectés par les changements climatiques (CC). Une synthèse des résultats les plus récents est présentée dans Mailhot *et al.* (2021). Ces auteurs, combinant plusieurs sources d'informations et plusieurs projections, ont proposé des majorations à appliquer aux courbes IDF actuelles selon différents horizons futurs et deux RCP (4.5 et 8.5). Ces majorations ont été utilisées pour estimer celles à considérer pour les différents TC et les différentes périodes futures considérées dans le cadre de la présente étude. Ces valeurs sont présentées au Tableau 8.1.

Le Tableau 8.2 présente une autre version de ces résultats où cette fois les durées 1, 2, 6, 12, 24, 48 et 72 h sont considérées. La période de référence pour ce tableau est celle couverte par les plus récentes courbes IDF disponibles, c.-à-d. la période 1980-2020. Ces valeurs peuvent être utilisées dans le cadre d'analyse hydrologique utilisant les courbes IDF comme donnée climatique.

Tableau 8.1 Majorations (%) à appliquer aux courbes IDF en climat de référence (1991-2020) selon différentes périodes futures pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5.

RCP	Horizon	Durée (heure)			
		9	13	17	28
4.5	2011-2040	9.0	8.0	7.5	7.0
	2041-2070	18.0	16.0	15.5	14.0
	2071-2100	25.5	22.5	22.0	20.0
8.5	2011-2040	11.0	10.0	9.5	8.5
	2041-2070	30.0	26.5	25.5	23.0
	2071-2100	56.0	50.0	48.0	43.0

Tableau 8.2 Majorations recommandées (%) selon les périodes futures pour les pluies maximales annuelles de durées 1 à 72 h selon les scénarios RCP 4.5 et 8.5. La période de référence est 1980-2020. Les valeurs ont été arrondies à $\pm 0.5\%$.

RCP 4.5							
Période future	Durée						
	1h	2h	6h	12h	24h	48h	72h
2011-2040	9.5	9.0	8.0	6.0	5.5	5.0	4.5
2041-2070	24.0	23.5	19.5	16.0	14.0	12.5	11.5
2071-2100	34.5	33.0	27.5	23.0	20.0	18.0	16.5
RCP 8.5							
Période future	Durée						
	1h	2h	6h	12h	24h	48h	72h
2011-2040	11.0	10.0	8.5	7.0	6.0	6.0	5.5
2041-2070	39.0	37.5	31.5	26.0	22.5	20.5	19.5
2071-2100	76.5	73.5	61.5	51.5	44.5	40.0	37.5

Il est à noter que ces majorations ne dépendent pas de la PdR considérée et sont applicables à l'ensemble du Québec méridional. On peut penser que les hausses des DMA estivaux et automnaux seront plus proches de ceux des pluies extrêmes pour les PdR plus élevées, les capacités d'infiltration et de rétention étant atteintes et les eaux de pluie alimentant directement le ruissellement de surface.

8.3 Projections futures des DMA selon l'Atlas hydroclimatique

Les séries simulées dans l'Atlas hydroclimatique correspondant aux tronçons à l'exutoire des BV des Groupes A et C ont été analysées, ce dernier groupe correspondant aux BV prioritaires d'INFO-Crue. La Figure 8.1 montre une carte localisant ces différents tronçons et le Tableau A.2 de l'Annexe A en dresse la liste avec certaines de leurs caractéristiques. Les quatre premières lettres de chaque identifiant de tronçon identifient la région où se trouve celui-ci. Rappelons qu'une description de l'Atlas hydroclimatique et des principaux

paramètres des simulations climatiques et de la modélisation hydrologique utilisés sont présentés à la section 2.4.

La Section 8.3.1 explique la procédure utilisée pour l'analyse des séries de DMA issues de différents modèles climatiques. L'analyse des projections des DMA a été ensuite réalisée en deux temps. Dans un premier temps, l'évolution future des probabilités d'occurrence des DMA au cours des trois périodes mars-avril-mai (MAM), juin à novembre (JJASON) et décembre-janvier-février (DJF) a été analysée. La Section 8.3.2 présente les résultats de cette analyse. L'évolution des quantiles DMA annuels et des DMA des périodes MAM, JJASON et DJF a été examinée dans un deuxième temps, les résultats et conclusions de ces analyses étant présentés à la Section 8.3.3.

8.3.1 Méthode utilisée pour l'analyse des séries de l'Atlas hydroclimatique

Les simulations réalisées dans le cadre de l'Atlas hydroclimatique utilisent les séries climatiques de l'ensemble CMIP5 (Taylor *et al.* 2012). Au total 29 modèles globaux du climat (MGC), ou versions de modèles globaux, sont utilisées pour un total de 99 simulations, 52 utilisant le scénario RCP 4.5 et 47 le scénario RCP 8.5. Dès lors le nombre de simulations disponibles varie d'un modèle à l'autre, plusieurs simulations étant disponibles pour certains modèles. Ces simulations sont appelées membres où pour chacun d'eux les conditions initiales ont été modifiées. Ces membres sont utilisés pour analyser la variabilité naturelle du climat et voir, notamment, dans quelle mesure le signal climatique peut être détecté en présence du bruit associé à la variabilité naturelle du climat (voir sur ce sujet Martel *et al.* 2018).

Dans un tel contexte, il est important de définir une procédure pour combiner les résultats de ces différentes simulations. L'approche suivante a été retenue. D'abord les simulations projetant des valeurs à la hausse ou à la baisse sont traitées séparément. Supposons donc que pour un MGC donné on dispose de n simulations et que n_+ simulations projettent une hausse de la variable d'intérêt et n_- une baisse. Les valeurs moyennes pour les simulations projetant une hausse, x_+ , et projetant une baisse sont ensuite calculées. Dans ce cas, on aura pour le MGC en question qu'une fraction n_+/n des membres projette une hausse moyenne de x_+ et une fraction n_-/n projette une diminution moyenne égale à x_- . Lorsque les résultats pour les différents modèles sont combinés, par exemple pour le calcul des hausses moyennes et des diminutions moyennes, la même procédure est appliquée et les projections à la hausse et à la baisse sont traitées séparément et un poids

égal est accordé à chaque modèle. Ainsi pour le cas décrit précédemment, les valeurs à considérer pour un MCG avec plusieurs membres seront n_+/n et x_+ pour le calcul des hausses et n_-/n et x_- pour les diminutions. Évidemment n_+/n ou n_-/n sera égal à 1 si l'on ne dispose que d'un seul membre pour un MCG donné. Cette procédure accorde donc un poids égal à tous les MCG peu importe le nombre de simulations disponibles pour chaque modèle. À noter que les deux scénarios RCP sont traités distinctement dans ce qui suit.

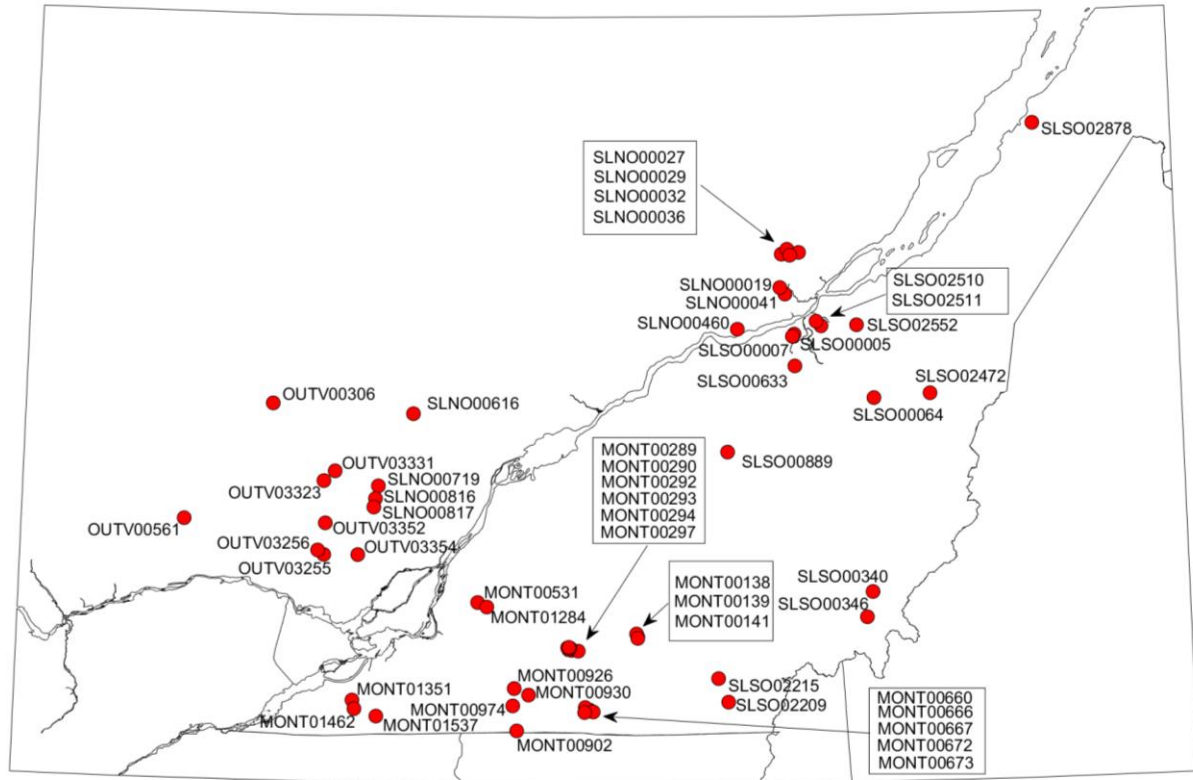
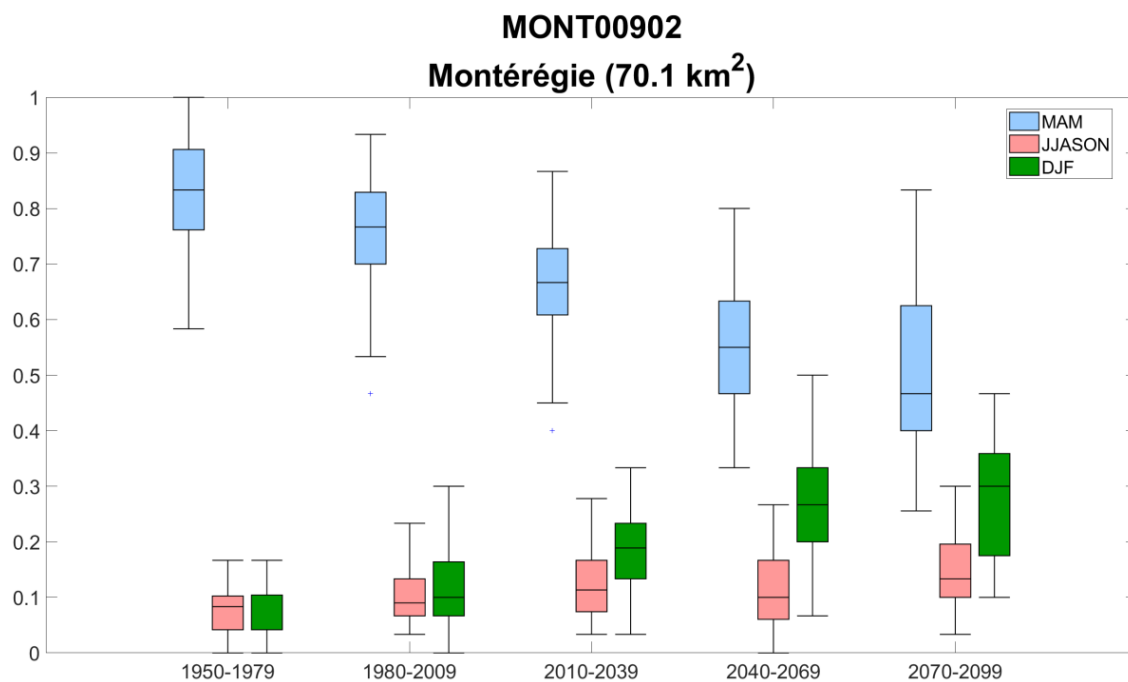


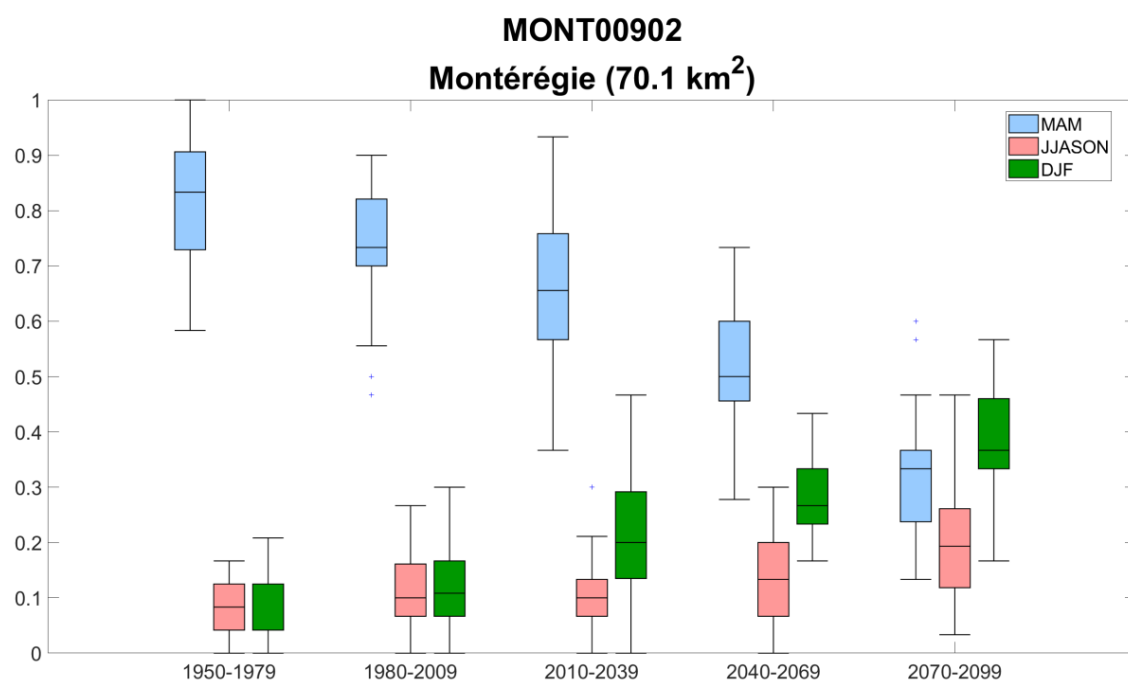
Figure 8.1 – Carte localisant les différents tronçons de l'Atlas hydroclimatique considérés pour l'analyse des projections futures des DMA.

8.3.2 Évolution future de saisonnalité des DMA

Les probabilités d'occurrence des DMA annuels pendant les trois périodes ont été estimées selon la procédure suivante. Les DMA annuels en chaque tronçon et pour chaque simulation ont été extraits ainsi que la date d'occurrence de ces DMA. Les fractions de ces DMA survenant pendant les périodes MAM, JJASON et DJF ont ensuite été calculées pour chacune des périodes futures. Lorsqu'un modèle possède plusieurs membres, tous les DMA de tous les membres sont mis en commun avant de calculer la fraction saisonnière de chaque période.

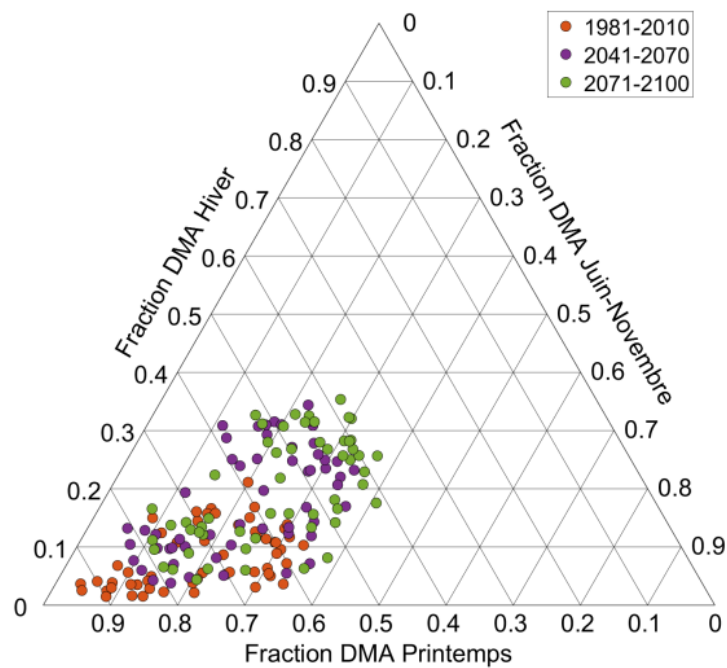


(a)

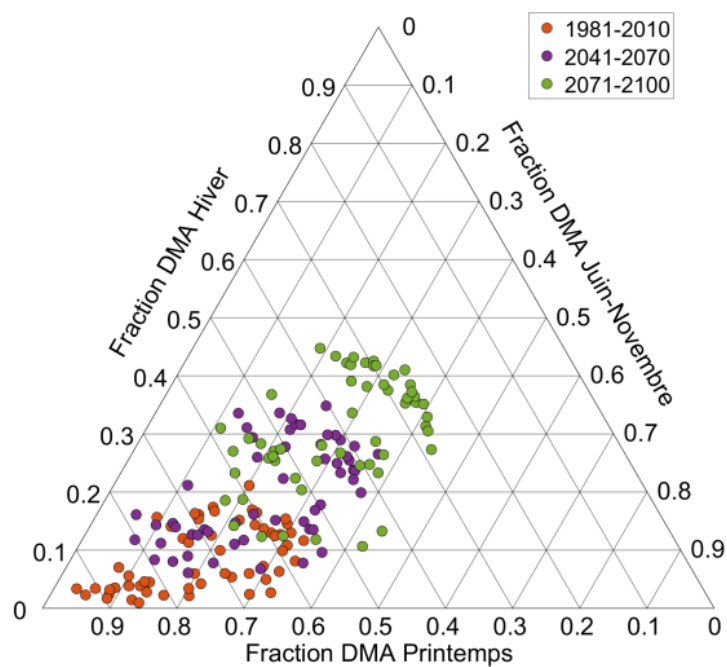


(b)

Figure 8.2 – Distributions des probabilités d'occurrence des DMA annuels au cours des périodes mars-avril-mai (MAM), juin à novembre (JJASON) ou décembre-janvier-février (DJF) en fonction de la période future considérée pour le tronçon MONT00902 selon le scénario : a) RCP 4.5; b) RCP 8.5.



(a)



(b)

Figure 8.3 – Diagramme ternaire des valeurs moyennes aux tronçons sous étude des fractions des DMA survenant pendant les périodes du printemps (mars-avril-mai), de juin à novembre (JJASON) ou la période hivernale (décembre-janvier-février) pour les différentes périodes futures pour le scénario : a) RCP 4.5; b) RCP 8.5.

La Figure 8.2 présente un exemple de résultats pour le tronçon MONT00902 situé en Montérégie à la frontière du Québec. Cette figure :

- confirme la prédominance des crues printanières et la diminution progressive de la prépondérance de ces crues à l'échelle annuelle;
- montre que les probabilités d'observer des crues annuelles en période été/automne, et particulièrement en période hivernale, augmentera en climat futur;
- indique que ces tendances seront plus marquées pour le RCP 8.5 que le RCP 4.5;
- montre que ces tendances sont importantes et simulées par une majorité de modèles.

Un examen des résultats aux autres tronçons montre des tendances similaires pour l'ensemble des tronçons sous étude.

La Figure 8.3 reprend les moyennes des fractions pour les trois périodes pour l'ensemble des tronçons sous étude et montre globalement l'évolution future de celles-ci sous la forme de diagrammes ternaires. Trois périodes sont présentées : 1981-2010, 2041-2070, 2071-2100. Tel que le suggérait la Figure 8.2, on constate une diminution de la prépondérance historique des crues printanières au profit des crues estivales/automnales et surtout hivernales. Ce patron de changement, apparent pour le RCP 4.5, se confirme pour le RCP 8.5. Selon ce scénario, à l'horizon 2071-2100, dans les cas les plus extrêmes, les crues de MAM ne représenteraient que 30% des crues les plus importantes à l'échelle annuelle pour certains tronçons alors que 70% des crues annuelles surviendraient à parts égales pendant JJASON et DJF. Dans tous les cas, la part des DMA annuels associés aux crues printanières diminue de façon très marquée pour la grande majorité des tronçons. On assiste en quelque sorte à une redistribution des crues annuelles entre les trois périodes qui fera en sorte que les crues les plus importantes de l'année ne seront plus presque exclusivement au printemps mais plus fréquentes en été/automne et en hiver.

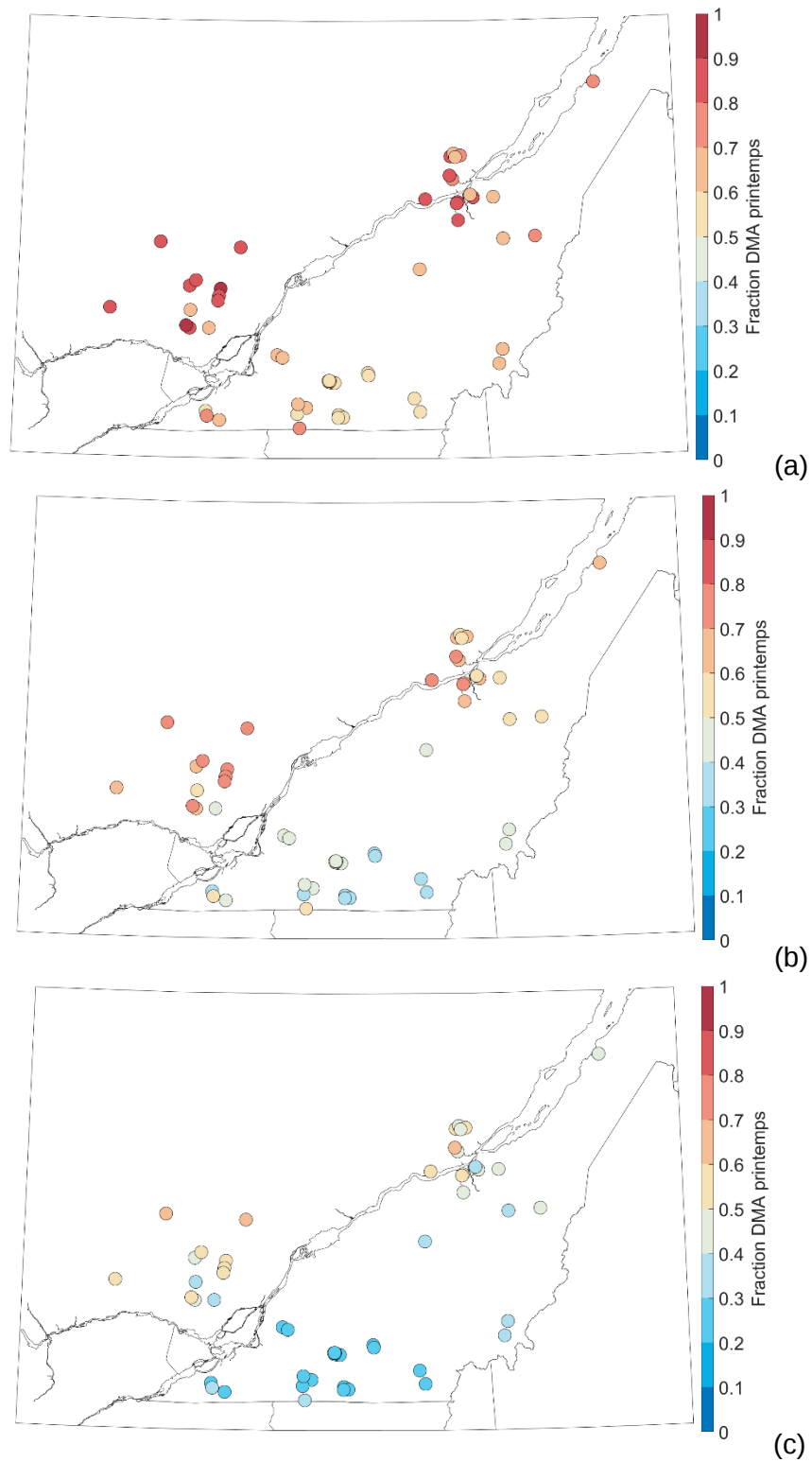


Figure 8.4 – Cartes des fractions de DMA annuels survenant au printemps (MAM) pour les périodes : a) 1991-2020; b) 2041-2070 (RCP 8.5); c) 2071-2100 (RCP 8.5).

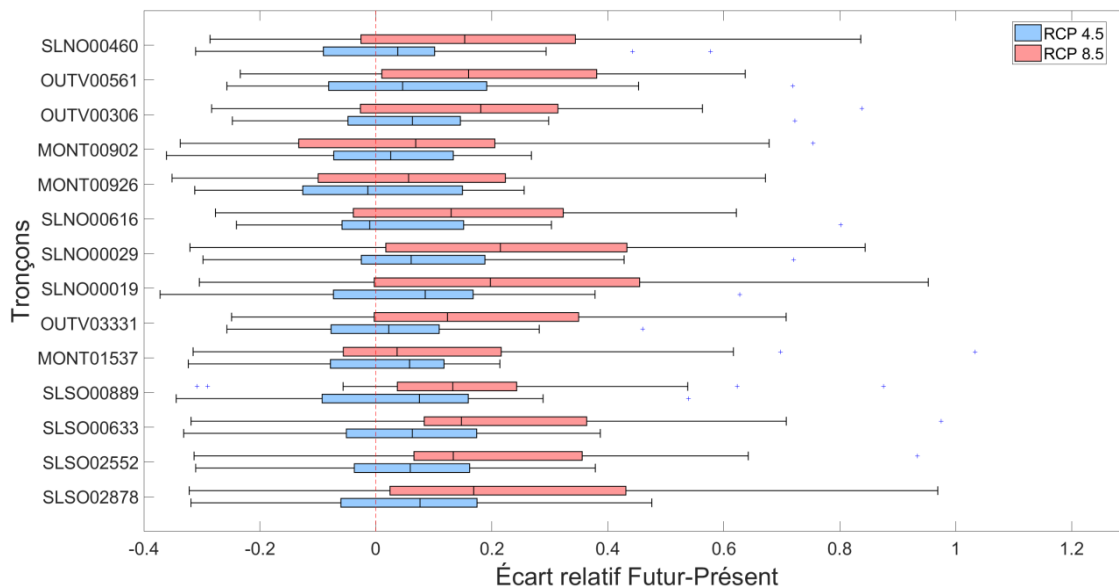
Afin de vérifier l'existence de possibles patrons spatiaux les cartes de la Figure 8.4 ont été produites. Ces cartes montrent les fractions de DMA annuels survenant au printemps (MAM) pour trois périodes. La Figure 8.4a confirme l'existence d'un patron spatial en climat de référence où les crues printanières sont plus dominantes pour les BV plus au nord et moins dominantes pour les BV situés au sud. Cette structure persiste pour les deux périodes futures malgré des diminutions généralisées des probabilités d'occurrence des DMA annuels au printemps (Figure 8.4b et c).

8.3.3 Évolution future des débits de crue

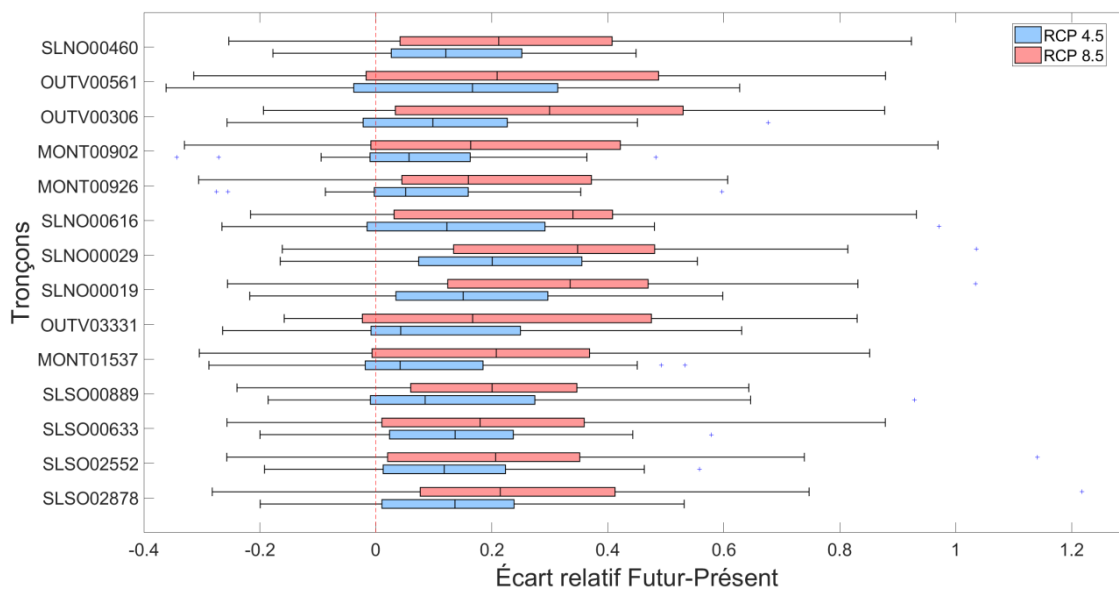
Les analyses précédentes ont permis de voir comment les crues annuelles les plus importantes seront redistribuées selon les saisons mais ne nous dit rien de l'évolution future de ces débits de crues. Afin de dresser un portrait plus complet de la situation, les DMA pour chacune des trois périodes de l'année (MAM, JJASON et DJF), de même que les DMA annuels ont été analysés. Ainsi les débits maximums de chaque simulation sur chaque période de l'année pour chaque année simulée ont été extraits et les séries correspondantes des DMA construites. Ces séries ont ensuite été analysées selon la méthodologie décrite au Chapitre 4 et les quantiles extrêmes de diverses PdR calculés pour chacune des périodes futures considérées. Finalement, les écarts relatifs entre quantiles en période future (2011-2040, 2041-2070 ou 2071-2100) et en période de référence (1991-2020) ont été estimés ($\text{futur} - \text{référence} / \text{référence}$) pour chacune des PdR. Au terme de cet exercice, les écarts relatifs pour chaque simulation en chaque tronçon sont disponibles.

La cohérence des projections simulées par les différents modèles a d'abord été examinée. La Figure 8.5 montre un exemple des projections estimées pour les DMA de la période juin à novembre aux tronçons du Groupe A selon les différents modèles pour la PdR 20 ans. À noter que pour ces figures les écarts positifs et négatifs ne sont pas traités séparément mais qu'un poids égal est attribué à chaque modèle. On observe que :

- La variabilité inter-modèle est très importante et qu'à tous les tronçons certains modèles projettent des hausses et d'autres des baisses des quantiles DMA;
- Les écarts relatifs sont plus importants pour le RCP 8.5 pour une période future donnée ou pour la période future 2071-2100 pour un RCP donné;
- Bien qu'il n'y ait pas de consensus sur le sens des projections (hausse ou baisse), la tendance globale semble être vers une hausse plus importante pour le RCP 8.5 et d'autant plus importante que la période future est lointaine.



(a)



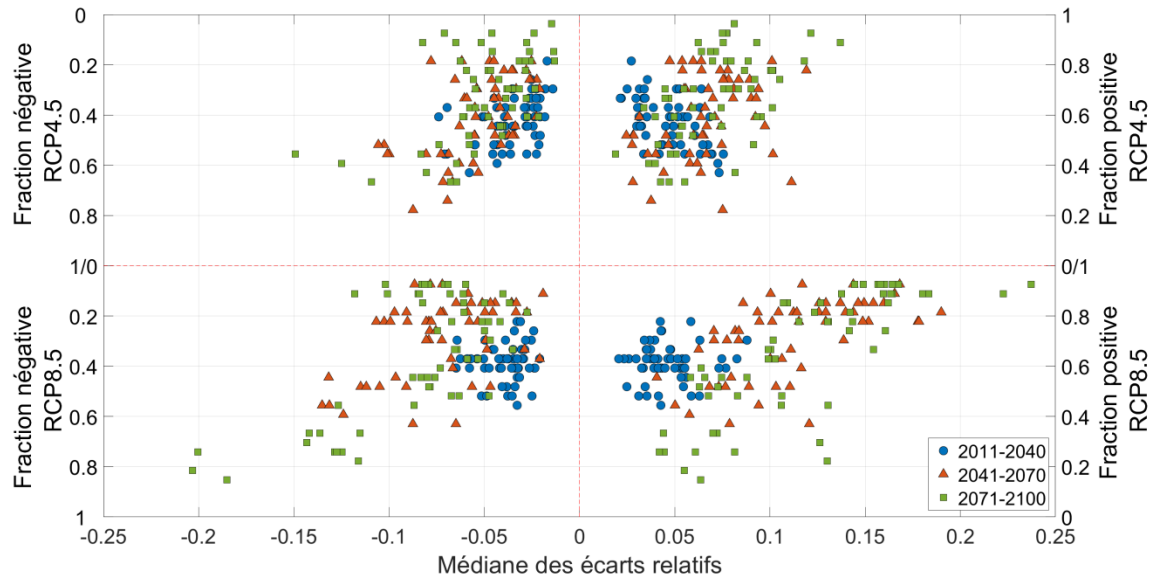
(b)

Figure 8.5 – Distribution des écarts relatifs entre quantiles DMA (juin à novembre) de période de retour 20 ans en climat futur et en climat de référence selon les différents modèles climatiques utilisés dans l'Atlas hydroclimatique pour les tronçons du Groupe A selon les RCP 4.5 (en bleu) et 8.5 (en rose) pour les périodes futures : a) 2041-2070; b) 2071-2100.

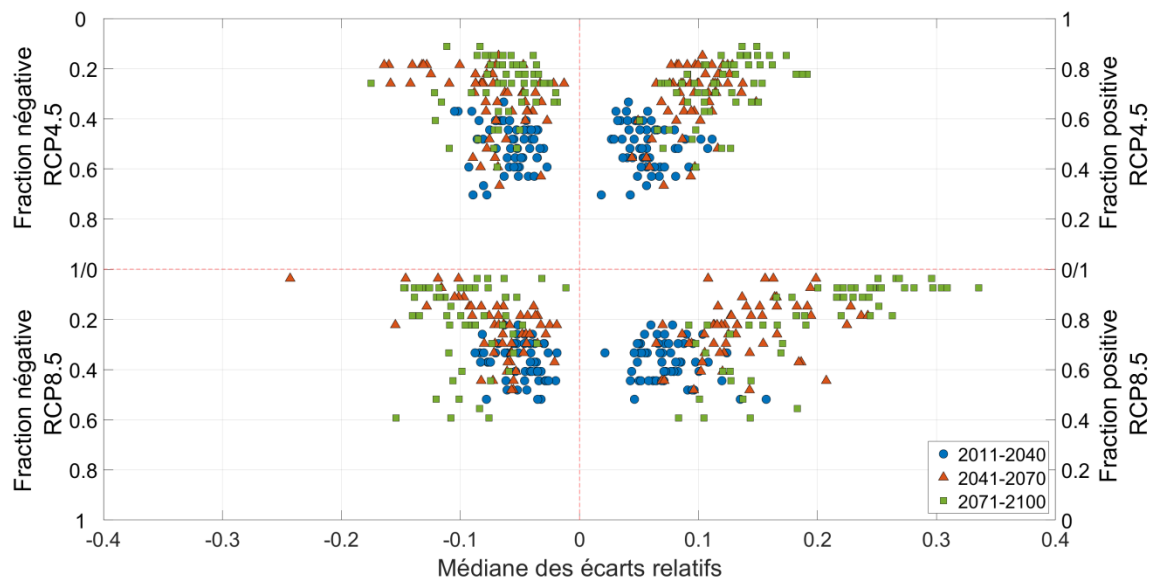
L'examen des autres tronçons et des autres périodes de l'année conduit à des conclusions similaires conforme avec l'idée que le signal de changement climatique sera d'autant plus clair que le forçage climatique est important (RCP 8.5 vs RCP 4.5) et que l'horizon futur est plus lointain (2071-2100 vs 2041-2070).

Les projections à la hausse et à la baisse ont été traitées séparément dans un deuxième temps tel qu'expliqué à la Section 8.3.1. Ce faisant, pour chaque tronçon sous étude, on calcule la fraction de modèle projetant des hausses et les écarts relatifs médians simulés par ces modèles/simulations, de même pour les modèles/simulations projetant des diminutions. Ces valeurs sont dès lors disponibles pour chaque période future (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100) et chaque période de l'année (annuel, MAM, JJASON, DJF).

Des graphiques tels que celui présenté à la Figure 8.6 (DMA annuel de PdR 2 ans et 20 ans) ont été construits pour synthétiser les informations sur l'évolution future des DMA aux différents tronçons sous étude. Ces graphiques permettent à la fois de visualiser le niveau d'accord sur le signe des projections (en ordonnée) et l'ampleur des variations projetées (en abscisses) pour les deux RCP et les différentes périodes futures. Les Figures 8.7 à 8.9 correspondent aux DMA en hiver (DJF), au printemps (MAM) et en été-automne (JJASON) respectivement. À noter que seules les PdR 2 ans et 20 ans sont présentées puisque les incertitudes statistiques sur les quantiles de plus grandes PdR s'ajoutent aux incertitudes sur les projections climatiques et ne permettent pas de tirer de conclusion claire sur le devenir des quantiles de plus grandes PdR.

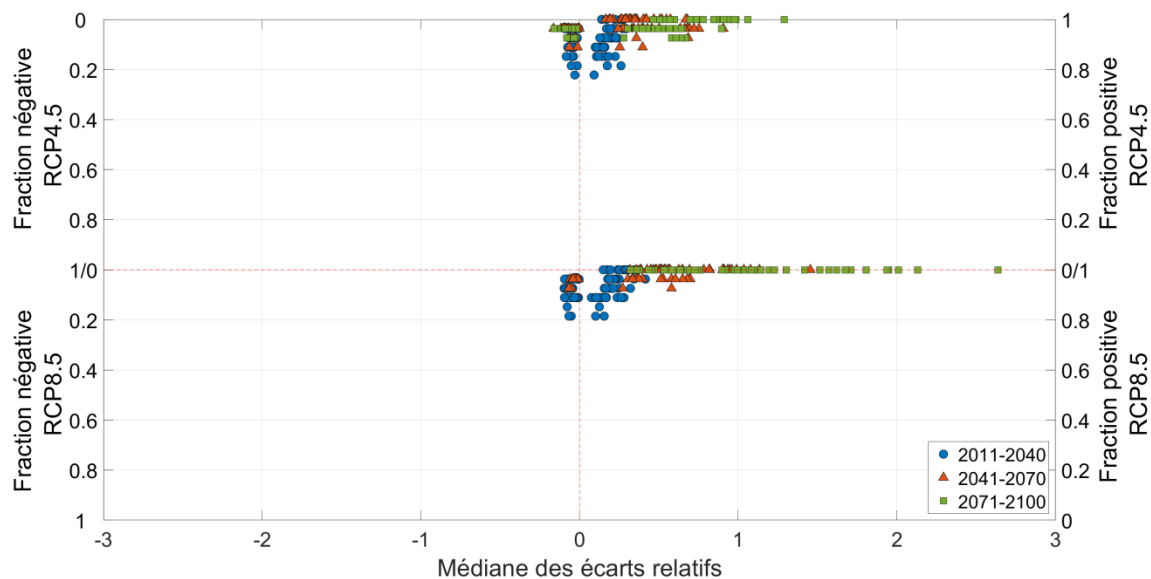


(a)

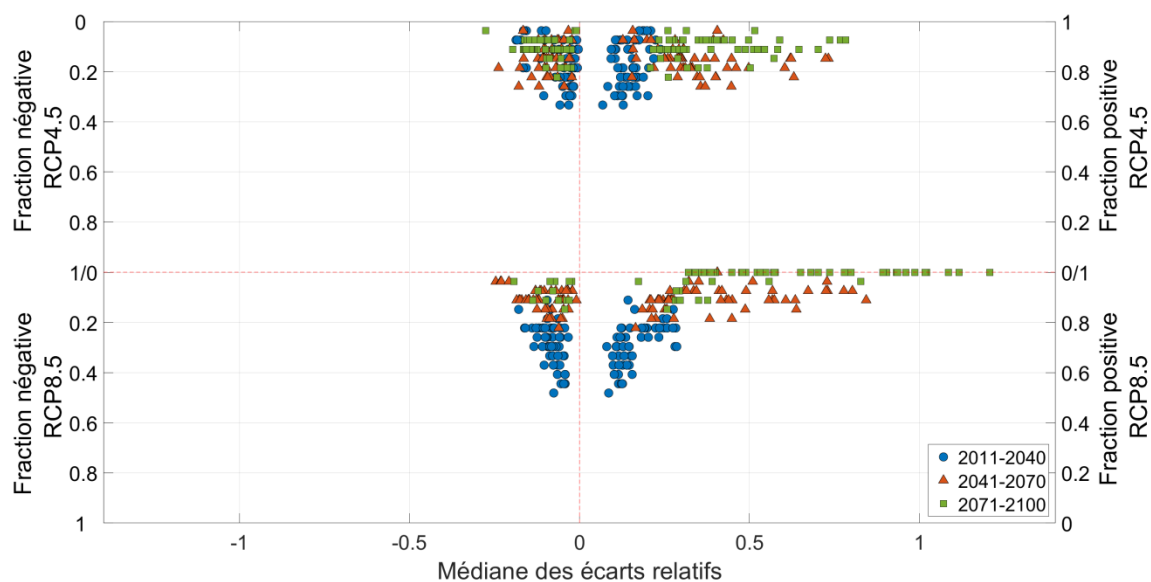


(b)

Figure 8.6 – Diagramme des écarts relatifs médians entre quantiles DMA annuels (janvier à décembre) des périodes futures et du climat de référence aux tronçons sous étude pour le RCP 4.5 (partie supérieure) et le RCP 8.5 (partie inférieure) pour les PdR : a) 2 ans et b) 20 ans. Le quadrant supérieur droit correspond aux écarts positifs (à la hausse) et le quadrant supérieur gauche aux écarts négatifs (à la baisse). L'axe des y indique la fraction de modèle/simulation projetant des hausses (axe de droite) ou des baisses (axe de gauche). L'axe des x correspond à la valeur médiane des écarts relatifs à la hausse (quadrant droit) ou à la baisse (quadrant gauche).



(a)



(b)

Figure 8.7 – Diagramme des écarts relatifs médians entre quantiles DMA en hiver (DJF) des périodes futures et du climat de référence aux tronçons sous étude pour le RCP 4.5 (partie supérieure) et le RCP 8.5 (partie inférieure) pour les PdR : a) 2 ans et b) 20 ans. Voir la Figure 8.6 pour une description du contenu de la figure.

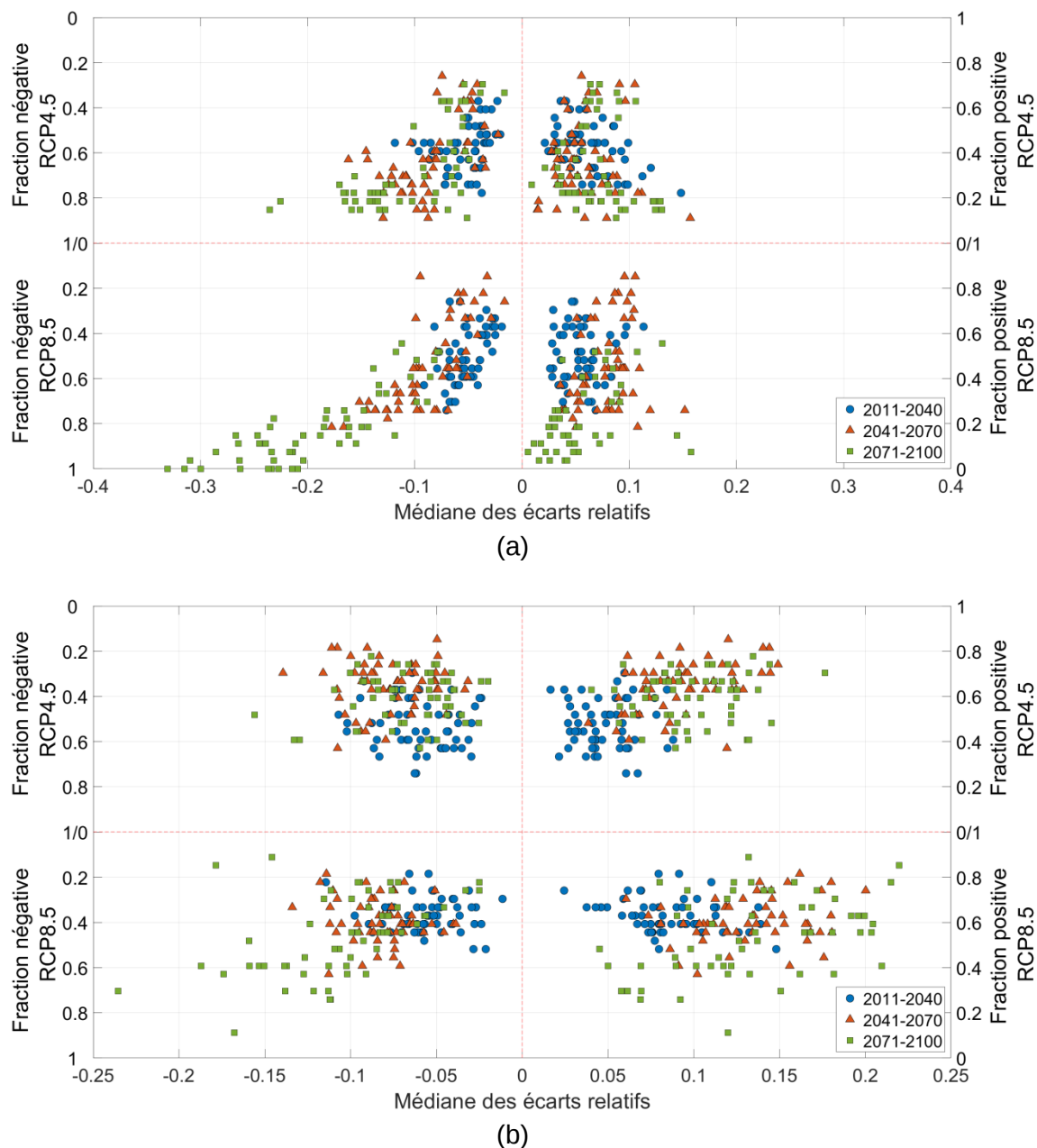


Figure 8.8 – Diagramme des écarts relatifs médians entre quantiles DMA au printemps (MAM) des périodes futures et du climat de référence aux tronçons sous étude pour le RCP 4.5 (partie supérieure) et le RCP 8.5 (partie inférieure) pour les PdR : a) 2 ans et b) 20 ans. Voir la Figure 8.6 pour une description du contenu de la figure.

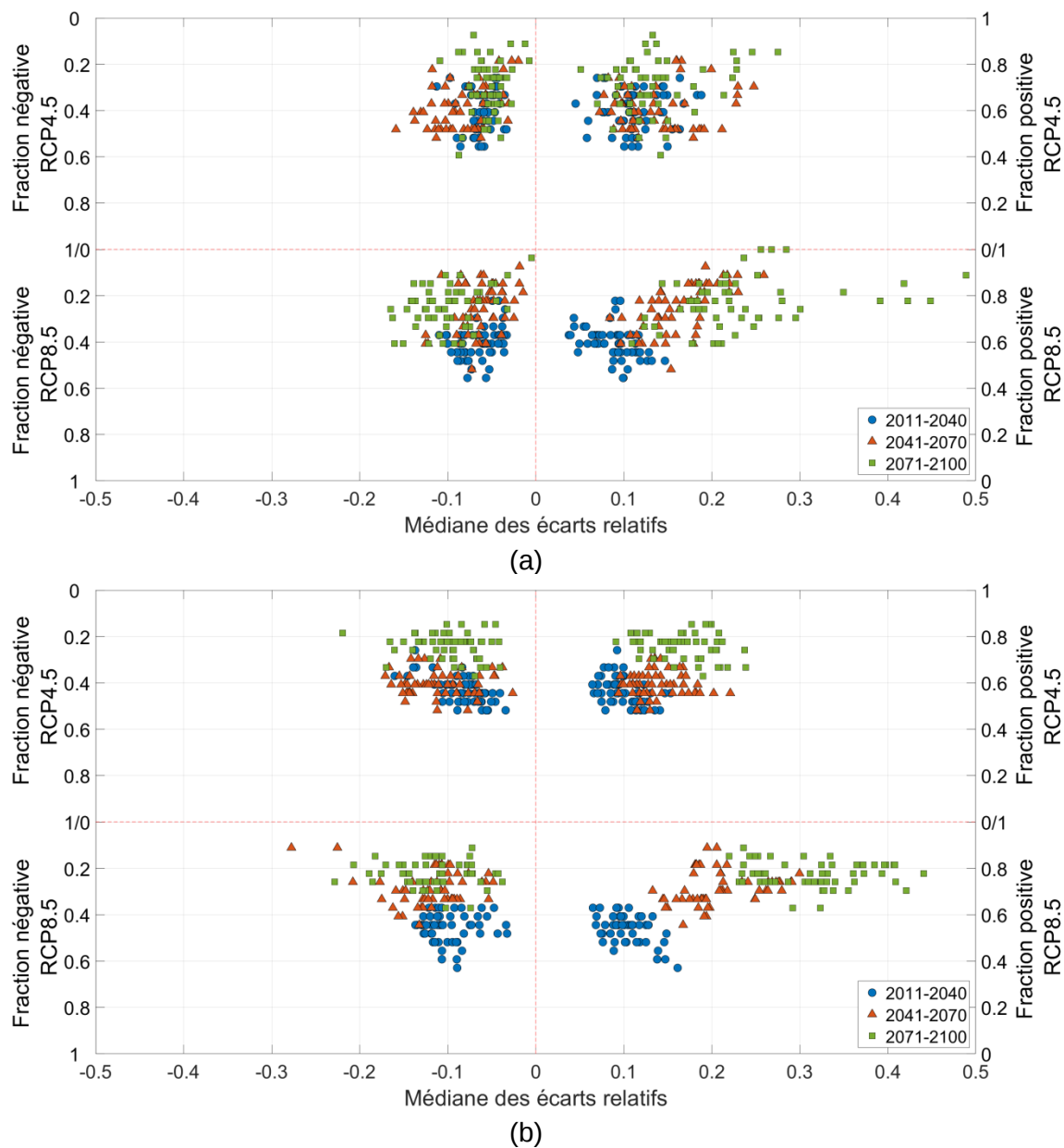


Figure 8.9 – Diagramme des écarts relatifs médians entre quantiles DMA en été/automne (JJASON) des périodes futures et du climat de référence aux tronçons sous étude pour le RCP 4.5 (partie supérieure) et le RCP 8.5 (partie inférieure) pour les PdR : a) 2 ans et b) 20 ans. Voir la Figure 8.6 pour une description du contenu de la figure

Les constats suivants émergent de l'examen de ces figures :

- DMA annuels (Figure 8.6) : on constate une augmentation graduelle des DMA annuels, plus accentuée pour la période 2071-2100 et pour le RCP 8.5. L'ampleur des changements semble corrélée au niveau d'accord entre simulations. Ainsi, pour le RCP 8.5 et la période 2071-2100, des variations de plus de 20% sont projetées à plusieurs tronçons par plus de 80% des modèles/simulations. À l'inverse le niveau d'accord pour les tronçons où des augmentations de l'ordre de 10 à 20% sont projetées est plus faible (de l'ordre de 40 à 60%). Les écarts simulés sont globalement plus importants pour la PdR 20 ans. Il convient de noter également que des diminutions des DMA à quelques tronçons sont simulées par une majorité de modèles/simulations pour la PdR 2 ans.
- DMA en hiver (Figure 8.7) : Le portrait global est très marqué en hiver. Ainsi, pour le RCP 4.5, plus de 80% des modèles/simulations projettent des augmentations de plus de 20% des DMA hivernaux pour la période 2071-2100 à une forte majorité de tronçons. Cette tendance est encore plus marquée pour le RCP 8.5 où tous les modèles/simulations projettent des augmentations de plus de 25% à plusieurs tronçons. On observe par ailleurs, lorsque l'on considère des périodes futures de plus en plus lointaines, une progression vers un accord et des augmentations plus importantes pour l'ensemble des tronçons. Il ressort donc que les DMA en saison hivernale sont les plus fortement impactés par les CC. Ceci peut résulter dans certains cas d'un devancement de la crue printanière et dans d'autres cas de l'occurrence plus fréquente de pluie durant la période DJF. Il faut toutefois mettre ses résultats en perspective considérant les limites relatives de la modélisation hydrologique de cette saison.
- DMA au printemps (Figure 8.8) : La réponse hydrologique pour les DMA printaniers est beaucoup plus floue avec des accords plus ou moins importants entre modèles sur d'éventuelles augmentations ou diminutions selon les tronçons. Aucun portrait global clair n'émerge dans ce cas et ce même pour le RCP 8.5. Il est intéressant de noter que des diminutions très probables (plus de 90% des modèles/simulations) de l'ordre de 20% à 30% sont projetées à plusieurs tronçons pour la PdR 2 ans et le RCP 8.5. Ces diminutions sont toutefois absentes lorsque la PdR 20 ans ou le RCP 4.5 sont considérés.
- DMA été/automne (Figure 8.9) : Si le niveau d'accord semble relativement faible pour les périodes futures 2011-2041 et 2041-2070, la tendance se confirme pour la période

2071-2100 avec des hausses simulées par une majorité de modèles/simulations des DMA été/automne de plus de 10% à plusieurs tronçons. Ces variations sont encore plus importantes et plus consensuelles pour le RCP 8.5 avec des augmentations projetées de plus de 20% par environ 80% des modèles/simulations à plusieurs tronçons.

Le portrait présenté jusqu'ici est global et regroupe l'ensemble des tronçons. Afin de voir s'il existe des patrons régionaux, les cartes des variations présentées aux Figures 8.6 à 8.9 sont présentées aux Figures 8.10 à 8.13 (seuls les résultats pour le RCP 8.5, la période 2071-2100 et les PdR 2 et 20 ans sont présentés). Ces cartes présentent l'écart majoritairement simulé (à la hausse ou à la baisse), la fraction de modèles qui simulent ce changement et son ampleur pour chaque tronçon. L'examen de ces cartes conduit aux constats suivants :

- DMA en hiver (Figure 8.11) : La carte de la Figure 8.11 suggère des hausses plus importantes dans la partie nord du territoire particulièrement pour la PdR 20 ans. Ces hausses sont simulées par plus de 90% des modèles/simulations.
- DMA au printemps (Figure 8.12) : Les résultats sont très différents selon que l'on considère la PdR 2 ans ou 20 ans. Les diminutions s'étendent à l'ensemble du territoire pour la PdR 2 ans avec des diminutions plus importantes dans la partie sud-ouest. Le schéma est différent pour la PdR 20 ans alors que des hausses et des baisses sont simulées sur l'ensemble du territoire par 50% à 75% des modèles. Le patron spatial est plus erratique dans ce dernier cas.
- DMA été/automne (Figure 8.13) : Le patron régional des variations des DMA d'été/automne suggère des hausses légèrement plus importantes dans la partie nord du territoire pour les deux PdR considérées. La grande majorité de ces hausses sont simulées par 75 à 90% des modèles.
- DMA annuels (Figure 8.10) : La distribution spatiale des variations des DMA annuels est très contrastée avec des augmentations très probables (plus de 90% des modèles) dans la partie sud-est et des diminutions probables (75% à 90% des modèles) à plusieurs BV dans la partie nord-ouest pour la PdR 2 ans. Un patron similaire est observé pour la PdR 20 ans sauf dans la partie nord-ouest où les résultats sont plus variables d'un BV à l'autre.

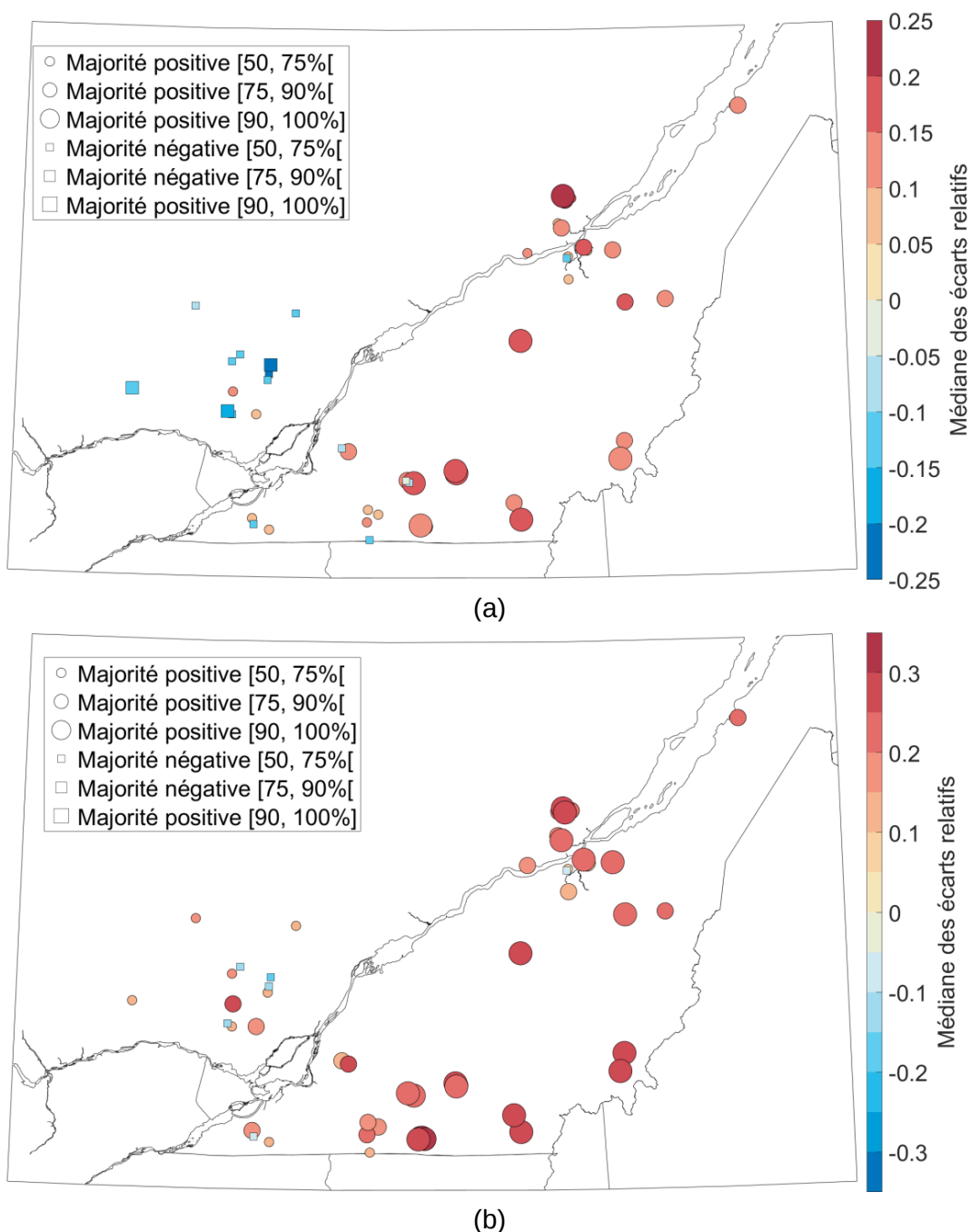
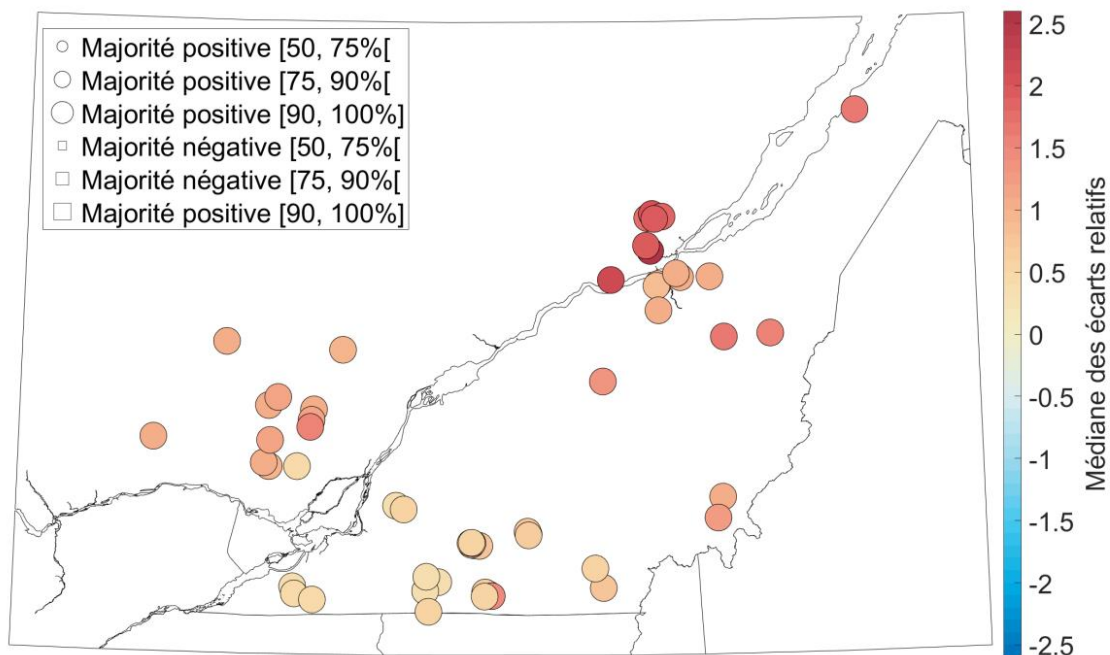
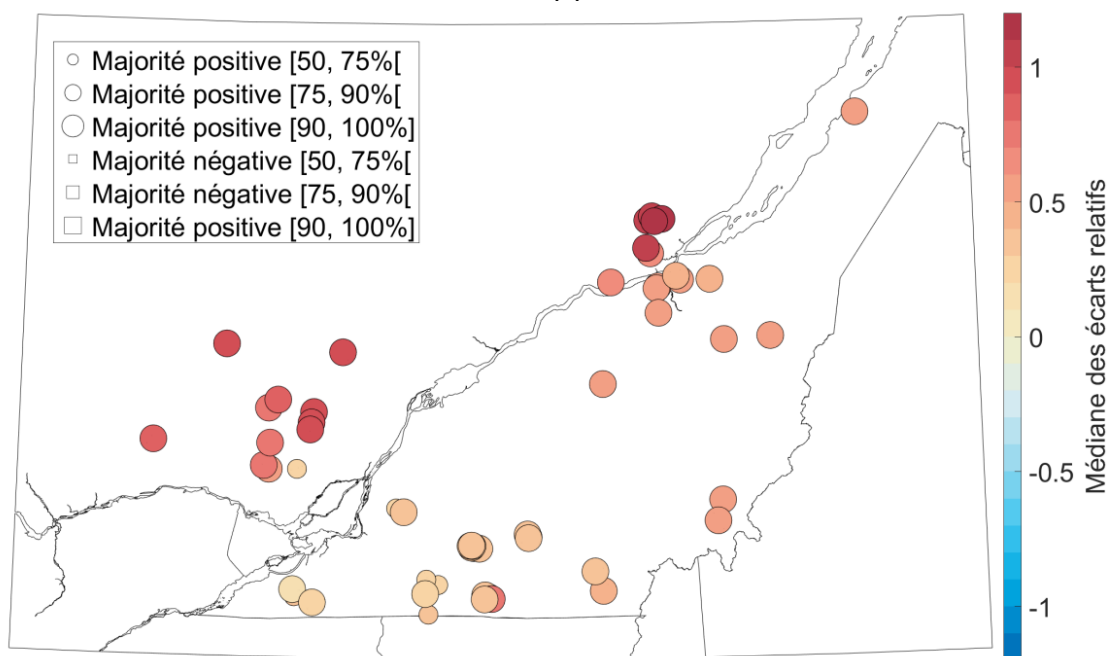


Figure 8.10 – Carte des projections médianes des écarts relatifs entre quantiles DMA annuels entre la période 2071-2100 et la période de référence aux tronçons sous étude pour le RCP 8.5 pour la PdR : a) 2 ans et b) 20 ans. Les cercles correspondent aux tronçons où les hausses sont dominantes (plus de 50% des modèles/simulations projettent des hausses) et les carrés aux tronçons où les diminutions dominent (plus de 50% des modèles/simulations projettent des diminutions). La taille des points/carrés correspond au pourcentage de modèles/simulations projetant des hausses ou des diminutions. Les couleurs indiquent la médiane des écarts relatifs simulés par les modèles/simulations projetant des hausses ou des diminutions.

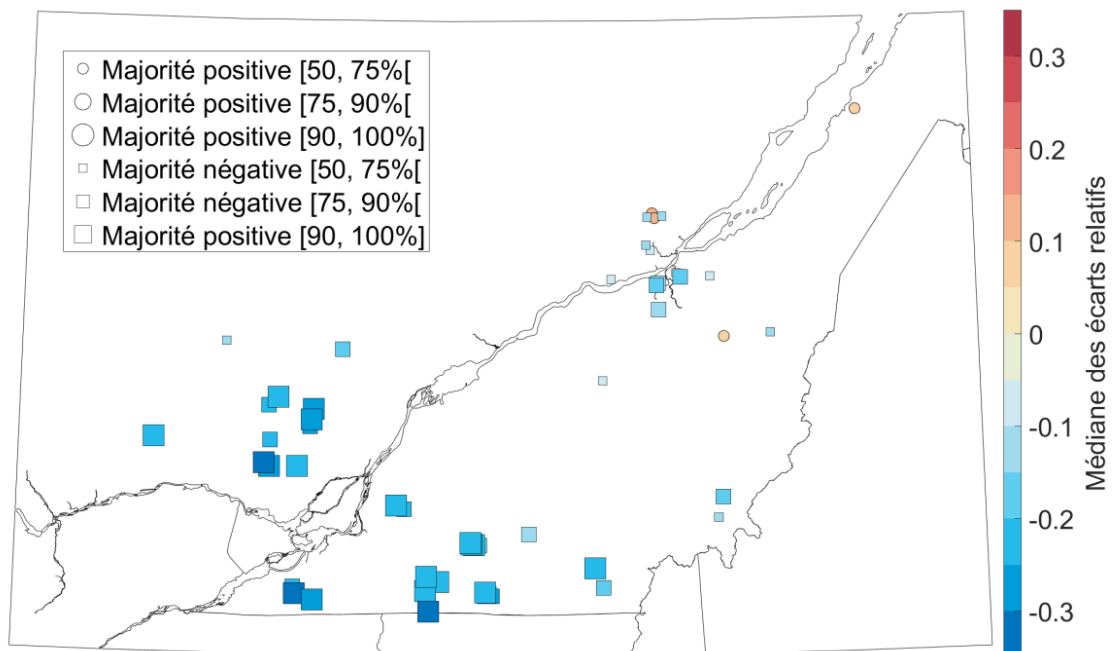


(a)

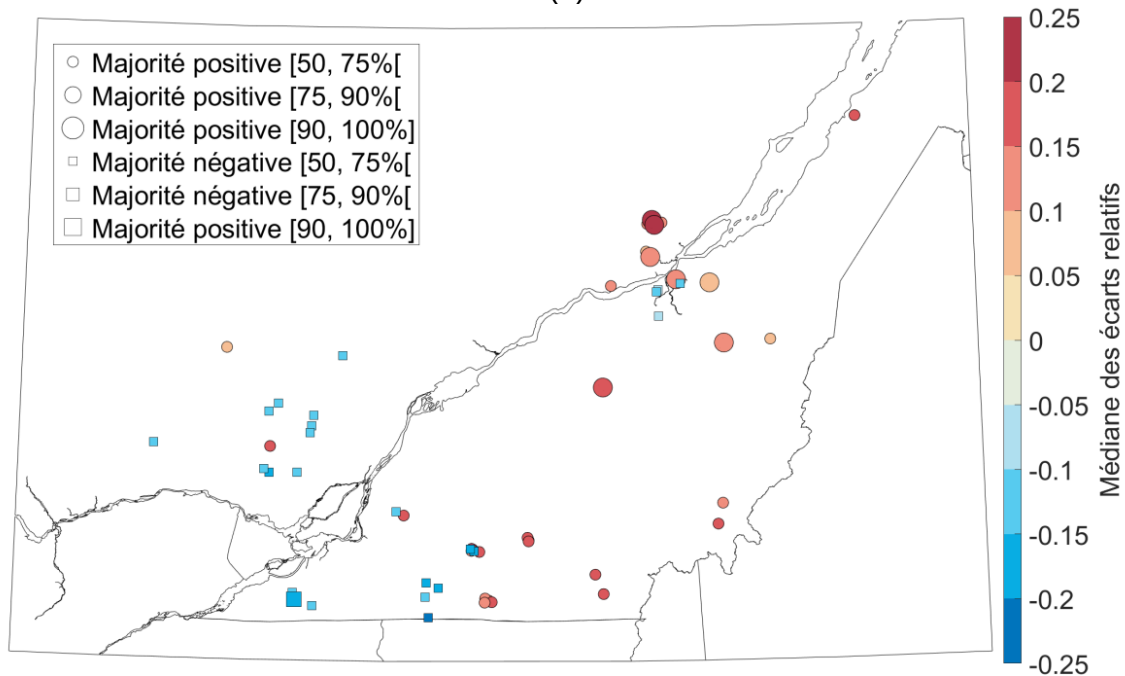


(b)

Figure 8.11 – Carte des projections médianes des écarts relatifs entre quantiles DMA en hiver (DJF) entre la période 2071-2100 et la période de référence aux tronçons sous étude selon le RCP 8.5 pour la PdR : a) 2 ans et b) 20 ans. Voir la Figure 8.10 pour une description du contenu de la figure.

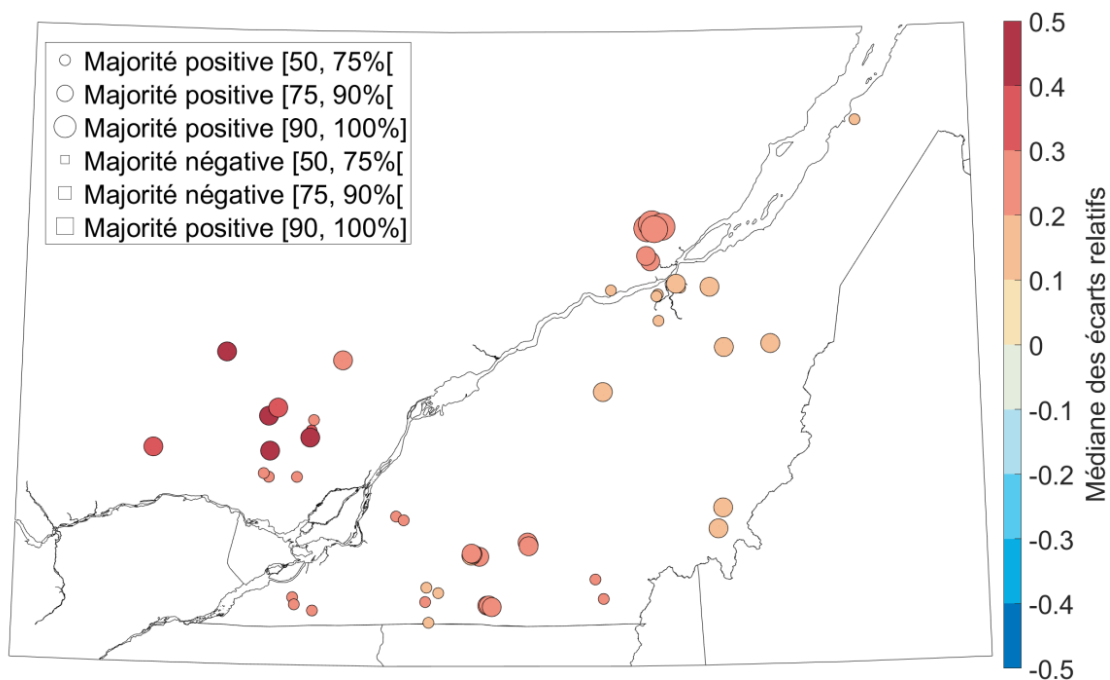


(a)

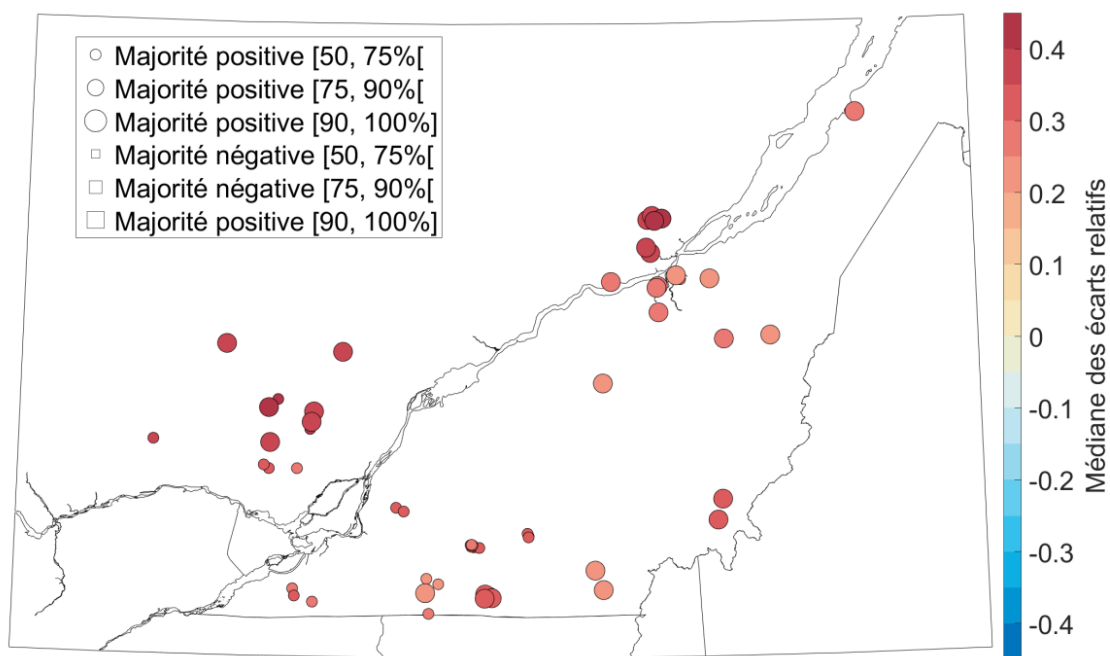


(b)

Figure 8.12 – Carte des projections médianes des écarts relatifs entre quantiles DMA au printemps (MAM) entre la période 2071-2100 et la période de référence aux tronçons sous étude selon le RCP 8.5 pour la PdR : a) 2 ans et b) 20 ans. Voir la Figure 8.10 pour une description du contenu de la figure.



(a)



(b)

Figure 8.13 – Carte des projections médianes des écarts relatifs entre quantiles DMA en été/automne (JJASON) entre la période 2071-2100 et la période de référence aux tronçons sous étude selon le RCP 8.5 pour la PdR : a) 2 ans et b) 20 ans. Voir la Figure 8.10 pour une description du contenu de la figure.

Comment interpréter le patron spatial contrasté des DMA annuels à la lumière de l'évolution future des DMA du printemps, de l'été/automne et de l'hiver ? Le premier élément à considérer est la nette prépondérance des crues printanières comme crues les plus importantes de l'année pour les régions du nord en climat de référence (Figure 8.4a). Cette prépondérance s'atténue en climat futur mais le gradient nord-sud persiste. Le deuxième élément à considérer est la diminution des crues printanières sur l'ensemble du territoire pour la PdR 2 ans à tout le moins (Figure 8.12a) combinée à une augmentation des crues été/automne (Figure 8.13a) et hivernales (Figure 8.11a). Ces effets combinés auront pour conséquence que les crues maximales annuelles surviendront plus fréquemment en hiver et en été/automne au détriment du printemps (Figure 8.4). La résultante en terme d'ampleur des crues maximales annuelles variera toutefois selon les régions. Pour les régions où les crues printanières sont plus dominantes en climat de référence, telle la région nord-ouest, l'effet combiné des diminutions des crues printanières et de hausses des crues pour les autres périodes résulte en de légères et peu consensuelles diminutions des DMA annuels. Pour les régions où les crues maximales annuelles sont plus susceptibles de se produire à d'autres périodes que le printemps, tel le sud du Québec, les baisses des crues printanières seront supplantées par les hausses des crues des autres saisons, résultant en une hausse des DMA annuels (Figure 8.10).

8.3.4 Portait global et régional de l'évolution future des débits de crue

Les analyses précédentes de l'évolution future des crues au Québec suggèrent que :

- Les crues maximales annuelles historiquement observées au printemps, surviendront plus fréquemment en été/automne et en hiver en climat futur.
- Les crues en hiver et en été/automne seront plus importantes alors que les crues printanières seront plus faibles (du moins pour la PdR 2 ans).
- Les augmentations des crues en hiver et en été/automne et la diminution des crues printanières expliquent la progressive redistribution des crues maximales annuelles au sein de l'année.
- Les effets combinés de ces hausses/diminutions des crues saisonnières se traduira par un patron régional contrasté quant à l'évolution future des crues maximales annuelles. Pour certaines régions, p.ex. la région de l'Outaouais, la prépondérance actuelle des crues printanières fera en sorte que les crues maximales annuelles resteront vraisemblablement inchangées alors que pour

d'autres régions, p. ex, le sud du Québec, les hausses des crues d'hiver et d'été/automne l'emporteront et conduiront à une hausse des crues maximales annuelles.

- Ces variations sont d'autant plus probantes et importantes que la période future considérée est lointaine et le RCP élevé.

Ce portrait global doit être nuancé selon les régions (p. ex. pour la région au nord de la Ville de Québec). Des analyses complémentaires devront être réalisées pour en confirmer certains éléments. Ces résultats montrent cependant la relative complexité de l'hydrologie des crues au Québec et l'impact majeur que les CC auront sur le devenir de ces crues. Les implications en terme de gestion du risque d'inondation sont majeures.

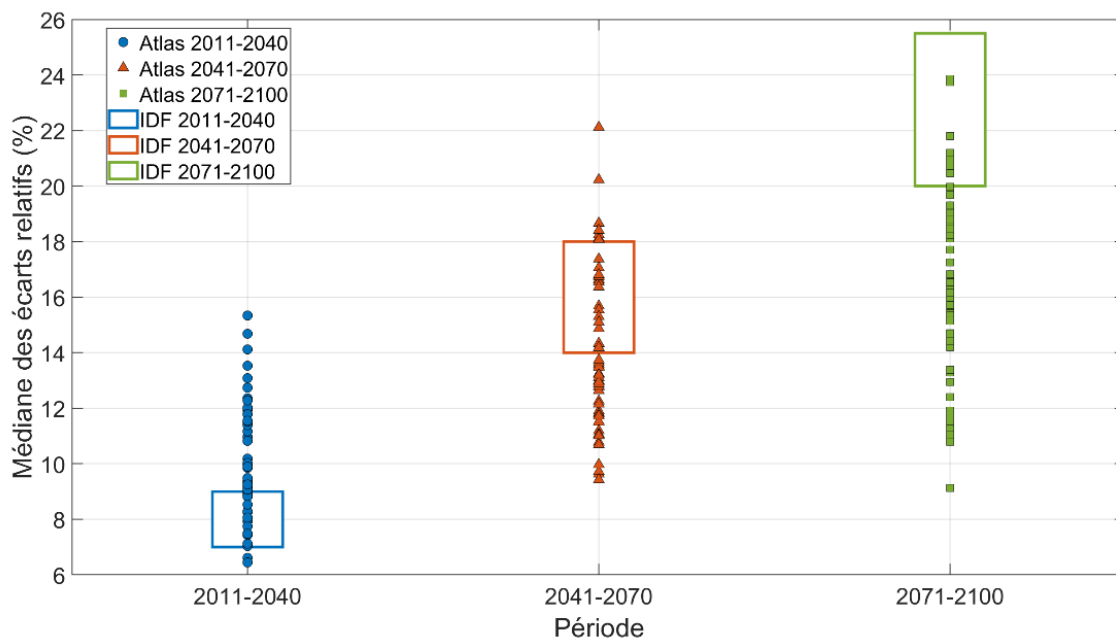
8.4 Comparaison des projections de pluies extrêmes et de l'Atlas Hydroclimatique

La section précédente a permis de développer un portrait global de l'évolution future des crues pour le Québec méridional. Tel que mentionné plus tôt, l'utilisation de la MÉRA pour l'analyse de l'évolution future des crues repose sur l'hypothèse que l'intrant unique à considérer est l'évolution future des pluies extrêmes. Ce faisant elle ne s'applique qu'aux crues de la période juin à novembre. Suivant cette hypothèse, les augmentations des crues juin-novembre seront égales aux augmentations des pluies extrêmes de durée égale au TC du BV considéré. Ces augmentations ont déjà été présentées au Tableau 8.1.

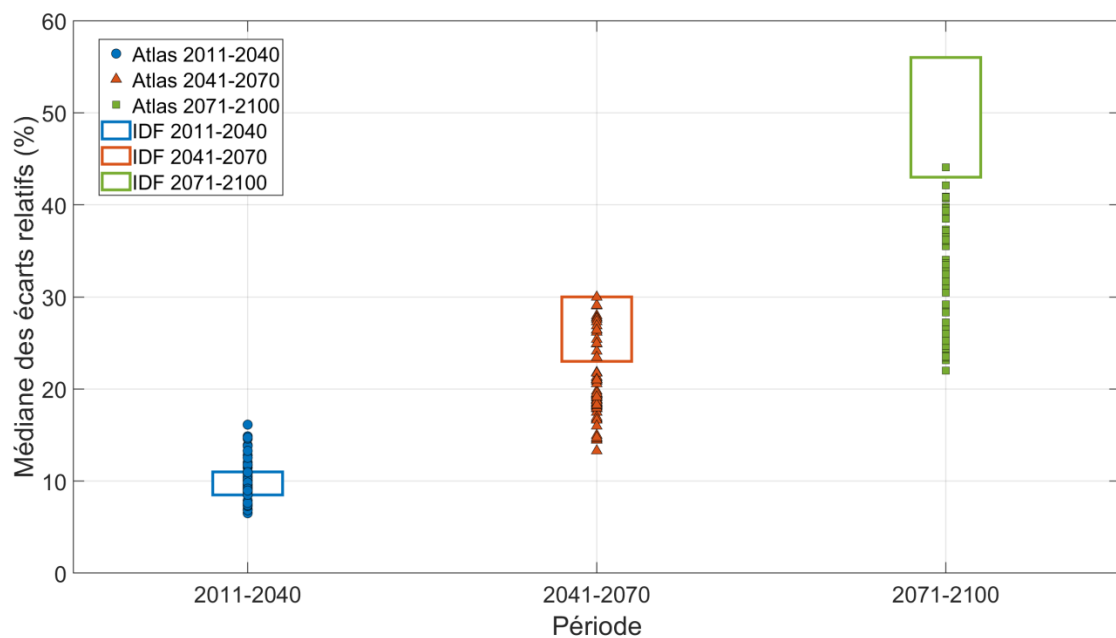
Comment se compare alors les projections futures issues de l'Atlas hydroclimatique aux projections futures d'évolution des pluies extrêmes ? La Figure 8.14 permet de comparer ces valeurs. L'examen de cette figure montre que globalement les majorations des DMA de juin-décembre sont du même ordre que les augmentations projetées des intensités de pluies extrêmes pour les périodes 2011-2040 et 2041-2070 mais inférieures à ces valeurs pour la période 2071-2100. Ce résultat est intéressant puisqu'il montre une cohérence entre projections des DMA de juin-octobre issues de l'Atlas hydroclimatique et projections des pluies extrêmes pour les deux périodes futures les plus proches (2011-2040 et 2041-2070).

Pour la période plus lointaine, plusieurs facteurs peuvent expliquer que les projections de DMA sont plus petites que les projections de pluies intenses. La plus importante est sans

doute la résolution spatiale et temporelle des séries de modèles climatiques utilisées pour les simulations hydrologiques de l'Atlas. En effet, l'ensemble CMIP5 est utilisé et il est composé de modèles globaux de résolution spatiales très diverses mais toutes supérieures à 100 km x 100 km et simulant à un pas de temps journalier. Cette résolution spatiale dépasse donc largement la taille des BV sous étude (moins de 100 km²) alors que la résolution temporelle est supérieure aux TC de la plupart des BV. Par ailleurs, plusieurs résultats montrent que les augmentations projetées pour les précipitations extrêmes de durées inférieures à la journée sont plus importantes que les augmentations des précipitations journalières (p. ex. Innocenti *et al.* 2019). Le fait d'utiliser des projections journalières de modèles globaux contribue à sous-estimer les augmentations projetées des pluies extrêmes qui demeure le facteur clef responsable de l'augmentation des DMA de la période juin-novembre en climat futur.



(a)



(b)

Figure 8.14 – Diagramme comparant les écarts des DMA de juin-novembre et de PdR 20 ans simulés par l'Atlas hydroclimatique et les projections d'augmentation des pluies extrêmes (valeurs minimales et maximales du Tableau 8.1) aux différents tronçons sous étude pour les trois périodes futures selon : a) le RCP 4.5 et b) le RCP 8.5. Seuls les tronçons où les hausses sont dominantes (plus de 50% des modèles/simulations projettent des hausses) sont présentés.

CHAPITRE 9. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Les travaux de recherche réalisés dans le cadre de la présente étude s'inscrivent dans l'initiative INFO-Crue laquelle vise à offrir des outils permettant de délimiter les zones inondables dans une grande partie du Québec méridional dans un contexte de changements climatiques.

La modélisation hydrologique actuelle d'INFO-Crue n'est pas adaptée à la simulation des débits de petits bassins versants (BV) de superficies inférieures à 100 km² ou présentant une occupation urbaine significative. Dès lors, différentes approches pour estimer des débits de crues de récurrences 2, 10, 20, 50, 100 et 350 ans ont été documentées et par la suite testées et analysées afin d'identifier une approche pour l'estimation des débits de crues et éventuellement l'intégrer à la plateforme INFO-Crue. La méthode retenue doit être relativement simple et rapide à mettre en place, fournir une estimation des incertitudes sur les quantiles de débits de crues estimés et être utilisable pour développer des projections des débits de pointe en climat futur.

Différentes catégories de méthodes d'estimation de débits de crues pour des BV non-jaugés ont été documentées. Cette revue de littérature a conduit aux constats, conclusions et recommandations suivantes :

1. Parmi les méthodes empiriques de types MÉRA, la version Mailhot *et al.* (2021) a été retenue puisqu'elle a été adaptée et mise à jour à partir des données de BV du Québec méridional dont la superficie est inférieure à 100 km² et répond donc aux besoins du projet. Les autres versions ne sont pas recommandées pour trois raisons. Premièrement, les méthodes d'estimation des variables de la MÉRA sont basées sur des BV non représentatifs de ceux du Québec. Deuxièmement, les informations relatives au développement des méthodes d'estimation des variables sont souvent incomplètes voire inexistantes. Finalement, dans l'objectif de réduire les incertitudes liées à l'estimation de certains paramètres de la MÉRA (p. ex. le coefficient de ruissellement), certaines versions de la MÉRA se complexifie singulièrement et dès lors sont plus difficilement applicables à grande échelle.
2. Concernant les méthodes statistiques de type analyse fréquentielle régionale des crues, aucune n'a été retenue et a fait l'objet d'une analyse plus poussée. Les efforts et le temps nécessaires pour identifier une méthode de partition du territoire

en régions homogènes et ensuite l'appliquer à un vaste territoire sont les principales raisons pourquoi ce type d'approches n'a pas été retenu et analysé plus avant. À ces raisons il faut ajouter le risque de régions sous-représentées en termes de densité de BV jaugés (ces méthodes exigent pour leur mise en place une densité de petit BV jaugés incompatible avec les données colligées dans le cadre du présent projet). Ce dernier enjeu explique aussi pourquoi les méthodes géostatistiques, encore plus exigeante en matière de densité de stations de jaugeage requise pour leur mise en place, n'ont pas été examinées plus avant dans le cadre de cette étude.

3. L'utilisation d'un MHP a été retenue puisqu'ils sont plus simples et plus rapides à mettre en place et à caler que les modèles hydrologiques plus complexes. De plus, des études ont montré qu'un MHP peut offrir des performances similaires voire supérieures à des modèles plus complexes dans certains contextes.
4. Le modèle GR5H a été retenu puisqu'il a été appliqué et utilisé à de nombreuses occasions et récemment dans le cadre de travaux s'intéressant notamment aux prévisions hydrologiques et aux impacts des changements climatiques sur les régimes hydrologiques.

La première méthode considérée est la méthode rationnelle (MÉRA), plus particulièrement la version développée dans le cadre d'un projet antérieur réalisé pour le compte du MTQ intitulé *Révision des critères de conception des ponceaux pour des bassins de drainage de 25 km² et moins dans un contexte de changements climatiques* (voir Mailhot et al. 2018, 2021). La MÉRA a ainsi été appliquée à 111 BV où l'on dispose de stations hydrométriques à l'exutoire. Ces BV ont tous une superficie inférieure à 250 km² et se trouvent au Québec, en Ontario, au Nouveau-Brunswick et dans quatre états des États-Unis (Maine, Massachussets, New York et Vermont). Pour tous ces BV, un minimum de 15 années de débits observés à un pas de temps sous-journalières (généralement aux 15 minutes) durant la période du 1^{er} juin au 30 novembre de chaque année (période d'écoulement en eau libre où les crues résultent d'épisodes de pluie intenses) est disponible. La MÉRA a également été appliquée à 42 BV jugés prioritaires par le MELCC dont les superficies sont inférieures à 50 km² mais pour lesquels l'on ne dispose pas de données de débits observés.

La deuxième méthode considérée repose sur l'utilisation d'un modèle hydrologique parcimonieux. Le modèle GR5H comportant cinq paramètres à caler et à résolution

horaire a été retenu afin de simuler les débits pour 14 des 111 BV à l'étude tous situés au Québec. Ces simulations ont été réalisées avec comme données d'entrée la grille de données météorologiques (GC3H) produite par le MELCC dont la résolution est de trois heures. Cette grille météorologique s'est avérée être la meilleure option considérant les nombreuses difficultés associées à la collecte de données météorologiques de qualité (c'est-à-dire où les stations météorologiques sont situées près des sites d'étude, comportant peu de données manquantes, qui concordent avec les périodes d'enregistrement de débits, dont les données sont sous-journalière, etc.)

En ce qui concerne la plateforme INFO-Crue, parmi les 14 BV où des données sont disponibles seuls cinq étaient simulés dans INFO-Crue. Toutefois et tel que mentionné précédemment, les débits simulés par INFO-Crue étaient disponibles pour les 42 BV prioritaires.

Les débits maxima annuels (DMA) pour la période de juin à novembre ont été extraits des débits mesurés ou simulés par la plateforme INFO-Crue pour chacun des BV sous étude. Ces DMA ont ensuite été ajustés à la distribution *Generalized Extreme Value* (GEV) et les quantiles correspondants aux PdR 2, 10, 20, 50, 100 et 350 ans finalement estimés. À noter qu'une analyse des séries DMA pour les périodes printanières (mars-avril-mai) et hivernales (décembre-janvier-février) a été réalisée et a permis de montrer que, sans surprise, pour une grande majorité d'année, la crue la plus importante annuellement survient au printemps.

Les comparaisons des quantiles de DMA (juin à décembre) réalisées aux fins d'analyses ont été les suivantes :

- débits MÉRA vs débits observés (111 BV);
- débits MÉRA vs débits MHP / débits observés (14 BV);
- débits MÉRA vs débits MHP / débits INFO-Crue / débits observés (5 BV);
- débits MÉRA vs débit INFO-Crue (42 BV prioritaires).

Les comparaisons des quantiles DMA estimés par la MÉRA, le MHP, INFO-Crue et des quantiles DMA estimés à partir des séries observées conduisent aux constats, conclusions et recommandations suivantes :

1. Des trois méthodes d'estimation des débits de crues qui ont été comparées, la MÉRA représente la méthode qui répond le mieux aux critères d'application

définies en préambule de cette étude. Sa simplicité et rapidité de mise en œuvre, le fait que les données nécessaires à son application sont disponibles pour tout le Québec, la possibilité d'estimer les incertitudes et le relativement bon accord entre les quantiles MÉRA et observés sont tous des éléments favorisant cette méthode. Elle est donc recommandée pour l'estimation des débits de crues de récurrences 2, 10, 20, 50, 100 et 350 ans, considérant la période juin-novembre, et l'application à grande échelle à des BV jaugés et non-jaugés de moins de 100 km² du Québec méridional. Les valeurs fournies par la MÉRA doivent être vue comme de bonnes 'premières approximations'.

2. La version de la MÉRA recommandée est celle développée par Mailhot *et al.* (2021) puisqu'elle a été spécifiquement développée à partir de données provenant de BV situés au Québec et dans les territoires limitrophes (Ontario, États du nord-est des États-Unis). Un facteur de correction (Tableau 7.2) devra toutefois être appliqué aux valeurs des quantiles obtenus.
3. La MÉRA est également recommandée pour l'estimation des débits de crues pour des BV plus urbains. La comparaison des quantiles MÉRA, considérant des BV avec une occupation urbaine supérieure à 10% (23 BV), aux quantiles observés montre des résultats similaires aux comparaisons comprenant l'ensemble des BV à l'étude (111 BV). La MÉRA prend en compte la présence de secteurs urbains à travers le coefficient de ruissellement.
4. Les quantiles MÉRA ne concernent que les crues susceptibles de survenir en eau libre en l'absence de couvert de neige ce qui correspond grosso modo à la période de juin à novembre pour les BV du territoire sous étude.
5. L'utilisation à grande échelle du MHP GR5H pour l'estimation de débits de crues de petits BV paraît irréaliste à ce stade-ci. Bien que les résultats montrent une bonne concordance entre les quantiles MHP et les quantiles observés, le nombre restreint de BV considérés pour les comparaisons (14) est trop petit pour en tirer des conclusions fermes. De plus, pour une application à grande échelle sur des BV non-jaugés il serait nécessaire de procéder à une régionalisation des paramètres du MHP à partir d'une analyse comprenant un plus grand nombre de BV jaugés ou encore de développer des relations fonctionnelles entre les paramètres du modèle et certaines caractéristiques physiographiques. Dès lors, l'utilisation du modèle GR5H pourrait s'avérer relativement laborieuse et longue à mettre en place.

6. L'utilisation du MHP GR5H pour l'estimation des débits de crues pour des BV urbains reste à confirmer et à valider. En effet, les BV utilisés pour la comparaison des quantiles MHP et des quantiles observés ont tous des occupations urbaines inférieures à 7 %. Dès lors, il n'est pas possible de tirer quelques conclusions que ce soient sur la performance du modèle GR5H pour des BV plus urbanisés (bien qu'à priori rien ne laisse présager une performance moindre du MHP pour des BV urbains une fois le modèle correctement calé). À cela s'ajoute encore une fois la nécessité de procéder à une régionalisation des paramètres tel qu'expliqué à la recommandation précédente.
7. L'utilisation de la plateforme INFO-Crue n'est pas recommandée tant pour une utilisation sur de petits BV que pour des BV ayant une occupation urbaine plus importante. La principale raison justifiant cette recommandation est le faible niveau de confiance accordée par les intervenants de la DEH à la modélisation hydrologique en place de petits BV ($< 100 \text{ km}^2$) et ceux comportant une occupation urbaine supérieure à 20 %. De plus les comparaisons entre les quantiles INFO-Crue et les quantiles observés sur cinq BV seulement ne permettent pas de statuer de façon probante sur la performance de cette méthode. Finalement, la comparaison des quantiles MÉRA aux quantiles INFO-Crue montre une très faible corrélation entre ces deux ensembles de valeurs. Ce dernier résultat ne permet pas, considérant les incertitudes importantes des quantiles MÉRA de conclure quoi que ce soit sur la performance réelle de la plateforme INFO-Crue.
8. L'estimation des débits de crues pour la période estivale-automnale pourrait ainsi s'effectuer en deux temps. L'application de la MÉRA à grande échelle aux BV de moins de 100 km^2 permettra d'abord de dresser un premier portrait global des débits de crues en périodes estivales et automnales au Québec. Des BV ou tronçons critiques pourraient ensuite être identifiés sur la base de ces résultats et de considérations liées à l'occupation du territoire et des enjeux locaux (p. ex. présence de communautés vulnérables, enjeux historique d'inondations). Ces sites pourraient par la suite faire l'objet d'une analyse plus détaillée ou cette fois un MHP pourrait être mis en place. L'enjeu des données disponibles pour sa mise en place demeure toutefois. Diverses stratégies pourraient alors être envisagées sur la base des informations locales ou régionales disponibles.

Concernant l'enjeu plus spécifiquement de l'évolution future des crues en climat futur, les séries simulées dans l'Atlas hydroclimatique pour les tronçons des Groupes A et C (BV prioritaires INFO-Crue) ont été analysées. Les DMA annuels (janvier à décembre) et des périodes hivernales (DJF), printanières (MMA) et de l'été/automne (JJASON) ont été extraits. Chacune de ces séries a ensuite été ajustée à une distribution GEV et les quantiles de différentes PdR estimés pour chacune des périodes 1991-2020, 2041-2070 et 2071-2100. Les écarts entre chacune de ces périodes futures et la période de référence ont finalement été calculés.

Afin de combiner les différents résultats de simulations (99 simulations, 52 utilisant le scénario RCP 4.5 et 47 le scénario RCP 8.5 issues de 29 modèles globaux du climat), les écarts à la hausse et à la baisse ont été traités distinctement, le niveau d'accord entre les simulations étant établi sur la base de la fraction de modèle qui projettent une hausse ou une baisse (stratégie 'un modèle-un vote').

L'analyse des projections de l'Atlas hydroclimatiques aux tronçons sous étude montre que :

1. Les crues en périodes hivernales (DJF) et en périodes estivales/automnales (JJASON) seront plus fréquentes et plus importantes alors que les crues printanières (MAM) seront moins importantes.
2. Les crues les plus importantes à l'échelle annuelle surviendront plus fréquemment en périodes étés/automne et en périodes hivernales au détriment des crues printanières; un patron spatial suggère des hausses plus importantes dans la partie nord du territoire particulièrement pour la PdR 20 ans. Ces hausses sont simulées par plus de 90% des modèles/simulations.
3. Les effets combinés des hausses/baisses des crues pour les différentes périodes de l'année se traduira par un patron régional contrasté quant à l'évolution future des crues maximales annuelles (crues plus importantes à survenir une année donnée peu importe la saison); ainsi pour certaines régions (p.ex. l'Outaouais), les crues maximales annuelles resteront approximativement inchangées (mais surviendront moins fréquemment au printemps) alors que pour d'autres régions (p. ex. le sud du Québec), les hausses des crues d'hiver et d'été/automne l'emporteront et conduiront à une hausse des crues maximales annuelles.

4. Tous les changements énumérés plus haut sont d'autant plus significatifs (niveaux d'accord) et importants que la période future considérée est lointaine et le RCP élevé.
5. La comparaison des projections des précipitations extrêmes et des projections d'augmentation des DMA été/automne montre que les majorations des DMA de juin-décembre simulées par l'Atlas hydroclimatique sont du même ordre que les augmentations projetées des intensités de pluies extrêmes pour les périodes 2011-2040 et 2041-2070 mais inférieures à ces valeurs pour la période 2071-2100. Ce résultat est important puisqu'il montre que les projections des DMA de juin-octobre issues de l'Atlas hydroclimatique sont cohérentes avec les projections des pluies extrêmes pour les deux périodes futures les plus proches (2011-2040 et 2041-2070). Il supporte l'intuition hydrologique suivant laquelle les hausses des crues été/automne devraient globalement correspondre aux augmentations de pluies intenses durant cette période. Le résultat selon laquelle les hausses des DMA sont plus petits que les hausses des pluies intenses pour la période 2071-2100 pourrait s'expliquer par le fait que des projections journalières de modèles globaux sont utilisées dans l'Atlas hydroclimatique. En effet, plusieurs études récentes suggèrent que les augmentations projetées pour les précipitations extrêmes de durées inférieures à la journée sont plus importantes que les augmentations des précipitations journalières. Sans compter que les intensités de pluie simulées par des modèles climatiques globaux, dont la résolution spatiale demeure relativement grossière par rapport à la superficie des BV considérés, tendront à nettement sous-estimer les intensités de pluies intenses pour ces petits BV.

BIBLIOGRAPHIE

Arsenault, R., Gatién, P., Renaud, B., Brisette, F., Martel, J.-L. (2015). A comparative analysis of 9 multi-model averaging approaches in hydrological continuous streamflow simulation. *J. Hydrol.*, 529;(3), 754–767, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.09.001.

ASCE et WPCF (1969). Design and construction of sanitary and storm sewers. American society of civil engineers, Water pollution control federation, ASCE-Manuals and reports on engineering practice – No. 37, WPCF Manual of practice No. 9, 345 East 47TH St. 1979 New York, N.Y. 10017, 332 p.

ASTEE (2017). Mémento technique 2017 : Conception et le dimensionnement des systèmes de gestion des eaux pluviales et de collecte des eaux usées. Association scientifique et technique pour l'eau et l'environnement, 275 p. En ligne : <https://www.astee.org/publications/memento-technique-2017/>.

Baiamonte, G. (2020). A rational runoff coefficient for a revisited rational formula. *Hydrolog. Sci. J.*, 65;(1), 112-126, DOI: 10.1080/02626667.2019.1682150.

Bennet, J.C., Robertson, D.E., Las Shrestha, D., Wanf, Q.J., Enever, D. Hapuarachchi, P., Tuteja, N.K. (2014). A System for Continuous Hydrological Ensemble Forecasting (SCHEF) to lead times of 9 days. *J. Hydrol.*, 519;(D) 2832–2846, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.08.010.

Bergeron, O. (2016). Guide d'utilisation. Grilles climatiques trois heures du Programme de surveillance du climat du Québec. Version 1, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction de l'information sur le milieu atmosphérique, ISBN 978-2-550-76287-4 (PDF), 23 p.

Bertrand-Krajewski, J.-L. (2008). Short Historical Dictionary on Urban Hydrology and Drainage, CG 1333, 8 p.

Brutsaert, W. (2005). Hydrology : An introduction. Cambridge, University press, New York, 605 p.

Caquot, A (1941). Écoulement des eaux pluviales ; Compte Rendu à l'Académie des Sciences de Paris du 20 octobre 1941.

Cleveland, T.G., Thompson, D.B., Fang, X. (2011). Use of the rational and modified rational method for hydraulic design. Texas Tech University, Multidisciplinary research in transportation, Texas department of transportation, Report #: 0-06070-1. En ligne : www.techmrt.ttu.edu/reports.php.

Coles, S. (2001). An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer Series in Statistics, Springer, London, 209 p., DOI: 10.1007/978-1-4471-3675-0.

Dalrymple, T. (1960). Flood frequency analysis. Water Supply Paper 1543A, US Geological Survey, Reston, Virginia, 80 p.

DEH (2018). Document d'accompagnement de l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional. Direction de l'expertise hydrique, Québec, ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques 34 p. En ligne : <https://www.cephq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/doc-accompagnement.pdf>.

Devi, G.K., Ganasri, B.P., Dwarakish, G.S. (2015) A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001 – 1007, ICWRCOE, DOI : 10.1016/j.aqpro.2015.02.126

Dhakal, N., Fang, X., Asquith, W.H., Cleveland, T.G., Thompson, D.B. (2013). Rate-based estimation of the runoff coefficients for selected watersheds in Texas. *J. Hydrol. Eng.*, 18;(12), 1571-1580. DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000753.

Dhakal, N., Fang, X., Cleveland, T.G., Thompson, D.B., Asquith, W.H., Marzen, L.J. (2012). Estimation of volumetric runoff coefficients for Texas watersheds using land-use and rainfall-runoff Data. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 138;(1), 43-54. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000368.

Dooge, J.C.I. (1957). The rational method for estimating flood peaks: Irish contributions to the technique. *Continuing design, Engineering*, September (6), 311-313.

Duan, Q., Sorooshian, S., Gupta, V.K., 1994. *Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models*. *J. Hydrol.*, 158;(3), 265–284. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90057-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90057-4).

Dunne, T., Leopold, L.B. (1978). *Water in environmental planning*. W.H. Freeman and Company, San Francisco, 818 p.

Fennessey, L.A.J., Miller, A.C., Hamlett, J.M. (2001). Accuracy and precision of NRCS models for small watersheds. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, 37;(4), 899-912. DOI: 10.1111/j.1752-1688.2001.tb05521.x.

French, R., Pilgrim, D.H., Laurenson, E.M. (1974). Experimental examination of the rational method for small rural catchments. *Rational method for rural catchments, Civ. Eng. Trans.*, 16;(2), 95-102.

Goyen, A., Philips, B.C., Pathiraja, S. (2014). Project 13 stage 3 : Urban rational method review. Australian rainfall & runoff, Revision projects, Project 13, Rational method developments, P13/S3/001, Engineers Australia, Water Engineering, 266 p. En ligne: <http://arr.ga.gov.au/arr-guideline/revision-projects/project-list/projects/project-13>.

Grimaldi, S., Petroselli, A. (2015). Do we still need the Rational Formula? An alternative empirical procedure for peak discharge estimation in small and ungauged basins. *Hydrol. Sci. J.*, 60;(1), 67-77. DOI: 10.1080/02626667.2014.880546.

Grover, P.L., Burn, D.H., Cunderlik, J.M. (2002). A comparison of index flood estimation procedures for ungauged catchments. *Can. J. Civ. Eng.*, 29;(5), 734–741, DOI: 10.1139/L02-065.

Han, S., Coulibaly, P., Biondi, D. (2019). Assessing Hydrologic Uncertainty Processor Performance for Flood Forecasting in a Semiurban Watershed. *J. Hydrol. Eng.*, 24;(9), 05019025, DOI: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001828.

Hill, A.J., Neary, V.S. (2005). Factors affecting estimates of average watershed slope. *J. Hydrol. Eng.*, 10;(2), 133-140.

Horner, W.W., Flynt, F.L. (1936). Relation between rainfall and run-off from urban areas. *Trans. Amer. Soc. Civil Engr.*, 101, 140-206.

Hosking J.R.M., Wallis J.R. (1997). *Regional Frequency Analysis - An Approach Based on L-Moments*. Cambridge Press University. 222 p.

Hotchkiss, R. H., Provaznik, M. K. (1995). Observations on the rational method C value. Watershed management: Planning for the 21st century, T.J. Ward, ed., ASCE, Reston, VA, 21-26.

Innocenti S., Mailhot A., Leduc M., Cannon A.J., Frigon A. (2019a). Projected Changes in the Probability Distributions, Seasonality, and Spatiotemporal Scaling of Daily and Subdaily Extreme Precipitation Simulated by a 50-Member Ensemble Over Northeastern North America. *J. Geophys. Res.-Atm.*, 124;(19), 10427-10449. DOI: 10.1029/2019jd031210.

Islam, Z. (2011). A Review on Physically Based Hydrologic Modeling. Technical Report May 2011, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Alberta, 45 p., DOI: 10.13140/2.1.4544.5924.

Jaiswal, R.K., Sohrat Ali, S., Bharti, B. (2020). Comparative evaluation of conceptual and physical rainfall-runoff models. *Applied Water Science*, 10;(48), 1-14, DOI: 10.1007/s13201-019-1122-6.

Jajarmizadeh, M., Harun, S., Salarpour, M. (2012). A Review on Theoretical Consideration and Types of Models in Hydrology. *J. Environ. Sci. Techno.*, 5;(5), 249-261, DOI: 10.3923/jest.2012.249.261.

Jiang, R. (2001). Investigation of runoff curve number initial abstraction ratio. The University of Arizona, 120 p. En ligne : <http://arizona.openrepository.com/arizona/handle/10150/191301>.

Kay, J.E., Deser, C., Phillips, A., Mai, A., Hannay, C., Strand, G., Arblaster, J.M., et al. (2015). The Community Earth System Model (CESM) Large Ensemble Project: A Community Resource for Studying Climate Change in the Presence of Internal Climate Variability." *B. Am. Meteorol. Soc.*, 96;(8): 1333–1349, DOI: 10.1175/BAMS-D-13-00255.1.

Kuichling, E. (1889). The relation between the rainfall and the discharge of sewers in populous districts. *Transactions, American Society of Civil Engineers* 20 (January), 56 p.

Leduc, M., Frigon, A., Ludwig, R., Braun, M., Martel, J.-L., Brissette, F., et al. (2019). ClimEx project: A 50-member ensemble of climate change projections at 12-km resolution over Europe and northeastern North America with the Canadian Regional Climate Model (CRCM5). *J. App. Meteor. Climatol.*, 58(4): 663–693. DOI:10.1175/JAMC-D-18-0021.1.

Li, Y., Wang, Q.J., Robertson, D.E., Bennett, J.C. (2017). Improved error modelling for streamflow forecasting at hourly time steps by splitting hydrographs into rising and falling limbs. *J. Hydrol.*, 555, 586-599, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.10.057.

Li, Y., Ryu, D., Western, A.W., Wang, Q.J., Robertson, D.E., Crow, W.T. (2014). An integrated error parameter estimation and lag-aware data assimilation scheme for real-time flood forecasting. *J. Hydrol.*, 519;(D), 2722-2736, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.08.009

Li, Y., Ryu, D., Western, A.W., Wang, Q.J. (2013). Assimilation of stream discharge for flood forecasting: The benefits of accounting for routing time lags. *Water Resour. Res.*, 49;(4), 1887-1900, DOI: 10.1002/wrcr.20169,2013.

Mailhot, A., Bolduc, S., Talbot, G., Vaittinada Ayar, P. (2021). Révision des critères de conception des ponceaux pour des bassins de drainage de 25 km² et moins dans un contexte de changements climatiques (CC06.2). Rapport Final, Institut National de la

Recherche Scientifique INRS-Eau, Terre et Environnement, Québec, décembre 2020, 173 p.

Mailhot, A., Bolduc, S., Talbot, G., Vaittinada Ayar, P. (2020). Révision des critères de conception des ponceaux pour des bassins de drainage de 25 km² et moins dans un contexte de changements climatiques (CC06.2). Rapport d'étape 3, Institut National de la Recherche Scientifique INRS-Eau, Terre et Environnement, Québec, Février 2020, 58 p.

Mailhot, A., Bolduc, S., Talbot, G., Vaittinada Ayar, P. (2019). Révision des critères de conception des ponceaux pour des bassins de drainage de 25 km² et moins dans un contexte de changements climatiques (CC06.2). Rapport d'étape 2, Institut National de la Recherche Scientifique INRS-Eau, Terre et Environnement, Québec, Juin 2019, 145 p.

Mailhot, A., Bolduc, S., Talbot, G. (2018). Révision des critères de conception des ponceaux pour des bassins de drainage de 25 km² et moins dans un contexte de changements climatiques (CC06.1). Rapport Final, Institut National de la Recherche Scientifique INRS-Eau, Terre et Environnement, Québec, mars 2018, 193 p. En ligne : <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1220191.pdf>.

Mailhot, A., Bolduc, S., Guillo, M. (2016). Hydrologie à l'échelle de petits bassins-versants agricoles. Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau, Terre et Environnement, Ministère de l'Agriculture, des Pêches et de l'Alimentation (MAPAQ), Direction de l'Agroenvironnement et du développement durable (DAEDD), 151 p. En ligne : https://www.agrireseau.net/documents/Document_94081.pdf.

Martel, J.-L., Mailhot, A., Brissette, F., Caya, D. (2018). Role of Natural Climate Variability in the Detection of Anthropogenic Climate Change Signal for Extreme Precipitation at local and regional scales. *J. Climate*, 31:4241-4263. DOI: 10.1175/jcli-d-17-0282.1.

Martynov A., Laprise R., Sushama L., Winger K., Šeparović L., Dugas B. (2013). Reanalysis-driven climate simulation over CORDEX North America domain using the Canadian regional climate model. version 5: model performance evaluation. *Clim Dynam.*, 41(11–12):2973–3005. DOI: 10.1007/s00382-013-1778-9. Mathevet, T. (2005). Quels modèles de pluie-débit globaux au pas de temps horaire? Développement empiriques et comparaison de modèles sur un large échantillon de bassins versant. Thèse de doctorat, École nationale de génie rural, des eaux et des forêts, Paris, 463 p.

McCueb, R.H., Knight, Z., Cutter, G. (2006). Evaluation of the Nash-Sutcliffe efficiency index. *J. Hydrol. Eng.*, 11;(6), 597-602, DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(597).

McKenney, D. W., Hutchinson, M. F., Papadopol, P., Lawrence, K., Pedlar, J. H., Campbell, K. B., Milewska, E., Hopkinson, R. F., Price, D., Owen, T. W. (2011). Customized Spatial Climate Models for North America. *B. Am. Meteorol. Soc.*, 1612-1622, DOI : 10.1175/2011BAMS3132.1.

MDDELCC (2017). Manuel de calcul et de conception des ouvrages municipaux de gestion des eaux pluviales : aux fins d'obtenir une soustraction au processus d'autorisation par déclaration de conformité. Direction des eaux usées du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 102 p. En ligne : <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/2976705>.

Meinshausen M., Smith S.J., Calvin K., Daniel J.S., Kainuma M.L.T., Lamarque J.-F., Matsumoto K., Montzka S.A., Raper S.C.B., Riahi K., Thomson A., Velders G.J.M., van

Vuuren D.P. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300, *Climatic Change*, 109, 213–241, DOI:10.1007/s10584-011-0156-z.

Merz, R., Blöschl, G. (2005). Flood frequency regionalisation—spatial proximity vs. catchment attributes, *J. Hydrol.*, 302;(1-4), 283-306, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.07.018.

Moglen, G.E., Hartman, G.L. (2001). Resolution effects on hydrologic modeling parameters and peak discharge. *J. Hydrol. Eng.*, 6;(6), 490-497.

MTO (1997). Drainage management manual, Part 3, Chapter 8, Hydrology, Hydraulics and Stormwater Quality. Ontario Ministry of Transportation, Drainage and hydrology Section, Transportation engineering Branch, Quality and standards Division,

Normand, D. (1974). Ajustement expérimental de la formule de Caquot en hydrologie urbaine. *La Houille Blanche*, N° 4/5, 357-361.

Orth, R., Staudinger M., Seneviratne, S.I., Seibert, J., Massimiliano, Z. (2015). Does model performance improve with complexity? A case study with three hydrological models. *J. Hydrol.*, 523, 147-159, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.044.

Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. *J. Hydrol.*, 303, 290-306, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.026.

Pandey, G., Nguyen, V. (1999). A comparative study of regression based methods in regional flood frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 225(1-2), 92-101, DOI: 10.1016/S0022-1694(99)00135-3.

Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *J. Hydrol.*, 279;(1-4), 275-289, DOI: 10.1016/S0022-1694(03)00225-7.

Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V. (2001). Does a large number of parameters enhance model performance? Comparative assessment of common catchment model structures on 429 catchments. *J. Hydrol.*, 242;(3-4), 275-301, DOI: 10.1016/S0022-1694(00)00393-0.

Pilgrim, D.H., Cordery, I. (1993). Chapter 9: Flood runoff. In Maidment, D.T. *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill, New-York, USA.

Ponce, V.M., Hawkins, R.H. (1996). Runoff curve number: Has it reached maturity? *J. Hydrol. Eng.*, 1;(1), 11-19. DOI : 10.1061/(ASCE)1084-0699(1996)1:1(11), 11-19.

Ponce, V.M. (1989). *Engineering hydrology: Principles and practices*. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 640 p.

Requena, A.I., Chebana, F., Ouara, T. B.M.J. (2017). Heterogeneity measures in hydrological frequency analysis: review and new developments. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 1651–1668. DOI: 10.5194/hess-21-1651-2017.

Robinson, J.S., Sivapalan, M. (1997). An investigation into the physical causes of scaling and heterogeneity of regional flood frequency. *Water Resour. Res.*, 33;(5), 1045-1059, DOI: 10.1029/97WR00044.

- Rondeau-Genesse, G., Braun, M. (2020). Production des scénarios climatiques pour les projets : Impact des changements climatiques sur les débits au Québec (cQ2) et la thématique Évolution du climat du projet de Soutien à INFO-Crue. Rapport présenté par Ouranos. Montréal. 14 p. + annexes.
- Rossmiller, R. (1980). The rational formula revisited. International symposium on urban storm runoff, University of Kentucky, Lexington, Kentucky, July 28-31, 1980, p. 1-12.
- Saadi, M. Oudin, L., Ribstein, P. (2019b). Random Forest Ability in Regionalizing Hourly Hydrological Model Parameters. *Water*, 11;(8), 1540, DOI: 10.3390/w11081540.
- Saadi, M. Oudin, L., Ribstein, P. (2019a). Étude de la sensibilité des paramètres d'un modèle « rural » sur des bassins versants urbanisés. *La Houille Blanche*, (2), 35-43, DOI: 10.1051/lhb/2019013.
- Salinas, J.L., Laaha, G., Rogger, M., Parajka, J., Viglione, A., Sivapalan, M., Blöschl, G. (2013). Comparative assessment of predictions in ungauged basins – Part 2: Flood and low flow studies. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 2637–2652, DOI: 10.5194/hess-17-2637-2013.
- Schaake, J. C., Geyer, J. C., Knapp, J. W. (1967). Experimental examination of the rational method. *J. Hydr. Eng. Div.-ASCE*, 93;(6), 353-370.
- Schwab, G. O., Frevert, R. K. (1985). Elementary soil and water engineering. 3rd Edition, Johnm Wiley & Sons, Inc., Toronto, 356 p.
- Schwab, G. O. (1957). Elementary soil and water engineering. John Wiley & Sons, New York, 292 p.
- Seiller, G., Anctil, F. (2014). Climate change impacts on the hydrologic regime of a Canadian river: comparing uncertainties arising from climate natural variability and lumped hydrological model structures. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 18;(6), 2033–2047, DOI: 10.5194/hess-18-2033-2014.
- Sitterson, J., Knightes, C., Parmar, R., Wolfe, K., MUche, M., Avant, B. (2017). An overview of rainfall-runoff model types. EPA/600/R-14/152, United States Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, National Exposure Research Laboratory, Athens, Georgia, 30605, 29 p.
- Skøien, J.O., Merz, R., Blöschl, G. (2006). Top-kriging - geostatistics on stream networks. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10(2), 277–287, DOI: 10.5194/hess-10-277-2006.
- Spence, C., Burn, D.H., Davison, B., Hutchinson, D., Ouarda, T.B.M.L., St-Hilaire, A., Weber, F., Whitfield, P.H. (2013). A Canadian viewpoint on data, information and uncertainty in the context of prediction in ungauged basins. *Hydrol. Res.*, 44;(3), 419-429, DOI: 10.2166/nh.2012.055.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., Meehl, G. A. (2012). An overview of CMIP5 and the experiment design. *B. Am. Meteorol. Soc.*, 93;(4), 485-498. DOI: 10.1175/bams-d-11-00094.1.
- Thompson, D.B. (2006). The rational method, regional regression equations, and site-specific flood-frequency relations. Texas Tech University, Report No. 0-4405-1, En ligne : <https://ttu-ir.tdl.org/ttu-ir/bitstream/handle/2346/22794/4405-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Transports Québec (2017). Manuel de conception des ponceaux. Ministère des transports du Québec, Division des structures, 541 pp.

USDA-NRCS (1986). Urban hydrology for small watersheds. TR-55, United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, En ligne : http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044171.pdf.

Vägverket (2008). Hydraulisk dimensionering. VVMB 310, Publikation 2008:61, 67p.

Valery, A. (2010). Modélisation précipitations – débit sous influence nivale : Élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. Doctorat ParisTech, Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement, 405 pp.

Villeneuve J.-P., Duchesne S., Mailhot A. (2007). Analyse de la pluviométrie récente sur le territoire de la Ville de Québec et pronostics d'évolution dans un contexte de changements climatiques. Rapport de recherche 911-f, INRS. Centre Eau, Terre et Environnement, 168 p.

Westfall P. H. (2014) Kurtosis as Peakedness, 1905–2014. R.I.P., *The American Statistician*, 68;(3): 191-195. DOI: 10.1080/00031305.2014.917055.

Wikhydro (2021). Méthode de Caquot (HU). [http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/M%C3%A9thode_de_Caquot_\(HU\)](http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/M%C3%A9thode_de_Caquot_(HU)). Site consulté le 20 avril 2021. Dernière mise à jour en 9/3/2020.

Wong, T. S. W. (2002). Call for awakenings in storm drainage design. *J. Hydrol. Eng.*, 7;(1), 1-2, DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2002)7:1(1).

Yen, B. C. (1992). "Preface." Catchment runoff and Rational formula, B. C. Yen, ed., Water Resources Publications, Littleton, CO, iii–iv.

Young, C. B., McEnroe, B. M. (2014). Evaluating the form of the rational equation. *J. Hydrol. Eng.*, 19;(1), 265-269, DOI : 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000769.

Zhang, Z. Y., Stadnyk, T. A., Burn, D. H. (2020). Identification of a preferred statistical distribution for at-site flood frequency analysis in Canada. *Can. Water Resour. J.*, 45;(1), 43-58. DOI: 10.1080/07011784.2019.1691942.

ANNEXE A. INFORMATION GÉNÉRALE SUR LES STATIONS HYDROMÉTRIQUES

Tableau A.1 - Caractéristiques des stations hydrométriques retenues et appartenant aux bassins versants des Groupes A et B (Québec)

Station de jaugeage		Source	Groupe	Coordonnées Station		Opération		Année opération	Année disponible	Mann-Kendall p-value	Tronçon INFO-Crue
Numéro	Nom			Lat.	Long.	Début	Fin				
030425	De la Roche	DEH ¹	A	45.02	-73.02	2001	Ouvert	19	17	0.77	MONT00902
040212	Saint-Louis			46.37	-74.51	1968	Ouvert	23	17	0.27	OUTV00306
040409	Suffolk			45.88	-75.02	1976	Ouvert	22	20	0.82	OUTV00561
050812	Aux Pommes			46.70	-71.69	1987	Ouvert	23	17	0.77	SLNO00460
052228	Noire			46.34	-73.65	1974	Ouvert	22	19	0.14	SLNO00616
030426	Ewing			B	45.13	-73.08	2001	Ouvert	18	16	0.69
050813	Décharge du lac Clair	MFFP ²	46.97		-71.66	1988	Ouvert	23	21	0.32	
051002	Des Eaux Volées	FOM ³	47.27		-71.16	1965	Ouvert	24	22	0.71	
051003	Des Eaux Volées		47.27		-71.14	1967	Ouvert	25	22	0.87	
051004	Des Aulnaies		47.29		-71.16	1966	Ouvert	25	18	0.71	
0120201	Dauphine	DEH	46.97		-70.86	1970	Ouvert	23	19	1.00	
N/A	Laflamme	MFFP	47.32		-71.13	1999	2017	19	16	0.89	
	Tirasse		49.21		-73.65	2001	2017	17	15	0.17	
	Lac Croche	UM ⁴	45.19		-74.01	2000	2019	20	16	1.00	

1- DEH : Direction de l'expertise hydrique et atmosphérique

2- MFFP : Ministère des forêts, de la faune et des parcs

3- FOM : Forêt Montmorency

4- UM : Université de Montréal

5- Non applicable : il n'y a pas de tronçon INFO-Crue associé aux bassins versants du groupe B.

Tableau A.2 – Liste des bassins versants prioritaires retenus pour les analyses (inclus dans Groupe C)

Numéro du tronçon INFO-Crue	Coordonnées		Superficie dans INFO-Crue (km ²)
	Lat.	Long.	
MONT00138	45.41	-72.30	47.7
MONT00139	45.43	-72.31	7.7
MONT00141	45.41	-72.30	2.3
MONT00289	45.36	-72.69	28.7
MONT00290	45.36	-72.65	4.4
MONT00292	45.36	-72.71	17.9
MONT00293	45.37	-72.72	9.6
MONT00294	45.37	-72.70	1.2
MONT00297	45.37	-72.71	1.2
MONT00531	45.56	-73.25	11.5
MONT00660	45.11	-72.60	33.0
MONT00666	45.11	-72.59	25.7
MONT00667	45.12	-72.61	11.5
MONT00672	45.10	-72.56	14.0
MONT00673	45.10	-72.61	0.5
MONT00930	45.17	-72.95	27.9
MONT00974	45.13	-73.04	14.3
MONT01284	45.54	-73.20	5.1
MONT01351	45.14	-73.99	5.8
MONT01462	45.11	-73.98	6.2
OUTV03255	45.75	-74.18	34.5
OUTV03256	45.76	-74.22	9.7
OUTV03323	46.05	-74.19	41.5
OUTV03352	45.88	-74.17	26.2
OUTV03354	45.75	-73.98	43.8
SLNO00027	47.01	-71.41	26.5
SLNO00032	47.03	-71.38	17.3
SLNO00036	47.01	-71.31	13.7
SLNO00041	46.84	-71.39	17.6
SLNO00719	46.04	-73.86	30.1
SLNO00816	45.98	-73.88	43.5
SLNO00817	45.95	-73.88	10.7
SLSO00005	46.67	-71.34	44.7
SLSO00007	46.66	-71.35	34.3
SLSO00064	46.40	-70.86	35.5
SLSO00340	45.59	-70.89	5.0
SLSO00346	45.49	-70.93	10.3
SLSO02209	45.14	-71.76	7.4
SLSO02215	45.24	-71.82	2.1
SLSO02472	46.42	-70.52	6.8
SLSO02510	46.71	-71.18	27.3
SLSO02511	46.73	-71.21	4.4

Tableau A.3 - Liste des bassins versants prioritaires retirés des analyses (non inclus dans Groupe C)

Numéro du tronçon INFO-Crue	Coordonnées Station		Superficie dans INFO-Crue (km²)
	Lat.	Long.	
MONT00140	45.41	-72.29	33.7
MONT00142	45.41	-72.27	19.1
MONT00143	45.42	-72.27	8.3
MONT00144	45.41	-72.26	9.2
MONT00291	45.36	-72.70	23.6
MONT00295	45.37	-72.72	7.4
MONT00296	45.37	-72.72	6.0
MONT00298	45.35	-72.72	3.5
MONT00299	45.36	-72.67	3.9
MONT00661	45.11	-72.60	31.4
MONT00662	45.11	-72.59	30.1
MONT00663	45.11	-72.64	4.4
MONT00664	45.12	-72.65	1.1
MONT00665	45.11	-72.65	1.1
MONT00668	45.12	-72.63	4.2
MONT00669	45.12	-72.60	6.8
MONT00670	45.12	-72.61	3.2
MONT00671	45.12	-72.59	3.1
MONT00674	45.10	-72.61	1.4
OUTV03256	45.76	-74.22	9.7
OUTV03257	45.75	-74.21	4.4
OUTV03324	46.06	-74.22	13.3
OUTV03325	46.06	-74.17	19.6
SLSO00006	46.70	-71.34	0.2
SLSO00008	46.68	-71.36	5.3
SLSO00009	46.66	-71.35	29.1
SLSO00011	46.67	-71.31	2.8
SLSO00065	46.41	-70.85	0.2
SLSO00066	46.41	-70.83	10.6
SLSO02512	46.70	-71.17	22.7
SLSO02513	46.72	-71.18	0.8
SLSO02514	46.70	-71.17	17.6

Tableau A.4 – Caractéristiques des stations hydrométriques retenues et appartenant aux bassins versants du Groupe D (Nouveau-Brunswick)

Station de jaugeage		Opérateur	Coordonnées Station		Opération		Année opération	Année disponible	Mann-Kendall value
Numéro	Nom		Lat.	Long.	Début	Fin			
01AF009	Iroquois River	ECCC ¹ et GNB ²	47.46	-68.36	1995	2019	25	19	0.68
01AK001	Shogomoc Stream		45.94	-67.32	1995	2019	25	24	0.21
01AK007	Nackawic Stream		46.05	-67.24	1995	2019	25	23	0.06
01AL004	Narrows Mountain Brook		46.28	-67.02	1997	2019	23	18	0.65
01AQ001	Lepreau River		45.17	-66.47	1995	2019	25	23	0.40
01BJ010	Middle River		47.61	-65.72	1995	2019	25	23	0.11
01BP002	Catamaran Brook		46.86	-66.19	1996	2019	24	17	0.65
01BU009	Holmes Brook SITE NO.		45.89	-65.15	1995	2019	25	21	0.98
01BV004	Black River		45.31	-65.85	1995	2019	25	22	0.10
01BV006	Point Wolfe River		45.56	-65.02	1995	2019	25	17	0.97

1- ECCC : Environnement et changement climatique Canada

2- GNB : Gouvernement du Nouveau-Brunswick

Tableau A.5 - Caractéristiques des stations hydrométriques retenues et appartenant aux bassins versants du Groupe E (États-Unis : Me : Maine ; Ma : Massachussetts ; Vt : Vermont ; NY : New York).

Station de jaugeage		Opérateur	Coordonnées Station		Opération		Année opération (données horaires)	Année disponible	Mann- Kendall p-value
Numéro	Nom		Lat.	Long.	Début	Fin			
Ma_01162500	Priest Brook	USGS ¹	42.68	-72.12	1988	2019	32	27	0.95
Ma_01169900	South River		42.54	-72.69	1990	2019	30	23	0.81
Ma_01174565	West Branch Swift River		42.46	-72.38	1995	2019	25	19	0.23
Ma_01175670	Sevenmile River		42.27	-72.01	1990	2019	30	27	0.97
Me_01021470	Libby Brook		44.80	-67.73	2000	2019	20	20	1.00
Me_01037380	Ducktrap River		44.33	-69.06	1998	2019	22	20	0.28
Me_01063310	Stony Brook		43.86	-70.64	1995	2019	25	24	0.35
NY_01349700	East Kill		42.25	-74.3	1997	2019	23	23	0.18
NY_01349711	West Kill Below Hunter		42.19	-74.28	1997	2019	23	22	0.96
NY_01349810	West Kill		42.23	-74.39	1997	2019	23	22	0.48
NY_01350035	Bear Kill		42.34	-74.45	1998	2019	22	20	0.26
NY_01350080	Manor Kill at West		42.38	-74.41	1990	2019	30	28	0.48
NY_01350120	Platter Kill		42.41	-74.45	1990	2019	30	27	1.00
NY_01350140	Mine Kill		42.43	-74.47	1990	2019	30	23	0.12
NY_01360640	Valatie Kill		42.55	-73.59	1990	2019	30	25	0.53
NY_01362497	Little Beaver Kill at		42.02	-74.27	1997	2019	23	22	0.74
NY_01363382	Bush Kill BLW Maltby		41.97	-74.29	2000	2019	20	19	0.48
NY_01365000	Rondout Creek		41.87	-74.49	1990	2019	30	24	0.64
NY_01365500	Chesnut Creek		41.85	-74.54	1999	2019	21	19	0.40
NY_01374559	West Branch Croton River		41.47	-73.76	1995	2019	25	24	0.90
NY_01413088	East Branch Delaware		42.29	-74.56	2000	2019	20	20	0.90
NY_01414000	Platte Kill		42.13	-74.7	1997	2019	23	23	0.32
NY_01415000	Tremper Kill		42.12	-74.82	1989	2019	32	29	0.03
NY_01421618	Town Brook		42.36	-74.66	1997	2019	23	22	0.08
NY_01434017	East Branch Neversink		41.93	-74.54	1991	2019	29	28	0.61
NY_01434025	Biscuit BK Above Pigeon		42.00	-74.50	1988	2019	32	26	0.15
NY_01434498	West Branch Nerversink		41.92	-74.57	1991	2019	29	29	0.09

Station de jaugeage		Opérateur	Coordonnées Station		Opération		Année opération (données horaires)	Année disponible	Mann- Kendall p-value
Numéro	Nom		Lat.	Long.	Début	Fin			
NY_01521500	Canisteo River	USGS ¹	42.40	-77.71	1988	2019	32	16	0.22
NY_04233286	Sixmile Creek		42.38	-76.39	2003	2019	17	17	0.16
Vt_01135150	Pope Brook		44.48	-72.12	1991	2019	29	25	1.00
Vt_01139800	East Orange Branch		44.09	-72.34	1990	2019	30	23	0.09
Vt_01142500	Ayers Brook		43.93	-72.66	1990	2019	30	19	0.07
Vt_04288225	W Branch Little R ABV		44.52	-72.77	2000	2019	20	19	0.38
Vt_04288230	Ranch Brook		44.50	-72.78	2000	2019	20	19	0.23

1- USGS : *United States Geological Survey*

Tableau A.6 - Caractéristiques des stations hydrométriques retenues et appartenant aux bassins versants du Groupe F (Ontario)

Station de jaugeage		Opérateur	Coordonnées Station		Opération		Année opération	Année disponible	Mann-Kendall p-value
Numéro	Nom		Lat.	Long.	Début	Fin			
02AB020	McIntyre River	ECCC ¹	48.48	-89.32	1987	2016	30	28	0.42
02BF004	Big Carp River		46.52	-84.47	1981	2019	38	31	0.10
02BF005	Norberg Creek (Site A)		47.06	-84.43	1981	2016	35	28	0.12
02BF007	Norberg Creek (Site C)		47.04	-84.41	1995	2016	21	15	0.43
02BF008	Norberg Creek (Site D)		47.05	-84.40	1980	2016	36	28	0.44
02BF009	Norberg Creek (Site E)		47.06	-84.40	1981	2016	35	27	0.34
02BF012	Norberg Creek (Site F)		47.06	-84.39	1995	2016	21	15	0.17
02BF013	Tributary to Norberg Creek		47.04	-84.42	1995	2016	21	21	0.23
02DB007	Coniston Creek		46.48	-80.82	1980	2019	39	27	0.16
02DD013	La Vase River		46.26	-79.40	1974	2019	45	40	0.98
02EC010	Schomberg River		44.01	-79.69	1969	2019	50	44	0.06
02ED017	Hogg Creek		44.73	-79.78	1988	2019	31	27	0.77
02ED100	Beeton Creek		44.05	-79.80	1997	2016	20	16	0.69
02FD002	Lucknow River		43.97	-81.51	1980	2019	39	29	0.69
02FE014	Blyth Brook		43.76	-81.46	1985	2019	34	25	0.71
02GA031	Blue Springs Creek		43.58	-80.11	1971	2016	46	44	0.88
02GA041	Grand River		44.14	-80.36	1984	2019	35	27	0.56
02GA044	Silver Spring Creek		43.38	-80.64	1998	2019	21	21	1.00
02GA045	Hunsburger Creek A		43.37	-80.63	1998	2019	21	17	0.17
02GA046	Hunsburger Creek B		43.38	-80.63	1998	2019	21	21	0.22
02HB020	Credit River Erin Branch		43.77	-80.09	1983	2016	34	31	0.92
02HC019	Duffins Creek		43.89	-79.06	1969	2019	50	47	0.10
02HC038	West Duffins Creek		43.92	-79.18	1974	2019	45	23	0.29
02HD003	Ganaraska River		44.02	-78.44	1969	2016	48	41	1.00
02HD004	North Weat Ganaraska		44.02	-78.44	1969	2016	48	31	0.11
02HH003	Pigeon River		44.12	-78.70	2004	2019	15	16	0.10
02HJ005	Squirrel Creek		44.12	-78.39	2002	2019	17	15	0.62
02HK009	Burnley Creek		44.20	-77.91	1985	2016	32	22	0.43

Station de jaugeage		Opérateur	Coordonnées Station		Opération		Année opération	Année disponible	Mann-Kendall p- value
Numéro	Nom		Lat.	Long.	Début	Fin			
02HK011	Mayhew Creek	ECCC ¹	44.11	-77.61	1993	2016	24	19	0.94
02MC028	Riviere Delisle		45.33	-74.64	1986	2019	33	19	0.53

1- ECCC : Environnement et changement climatique Canada

Tableau A.7 - Caractéristiques des stations hydrométriques retenues et appartenant aux bassins versants du Groupe G

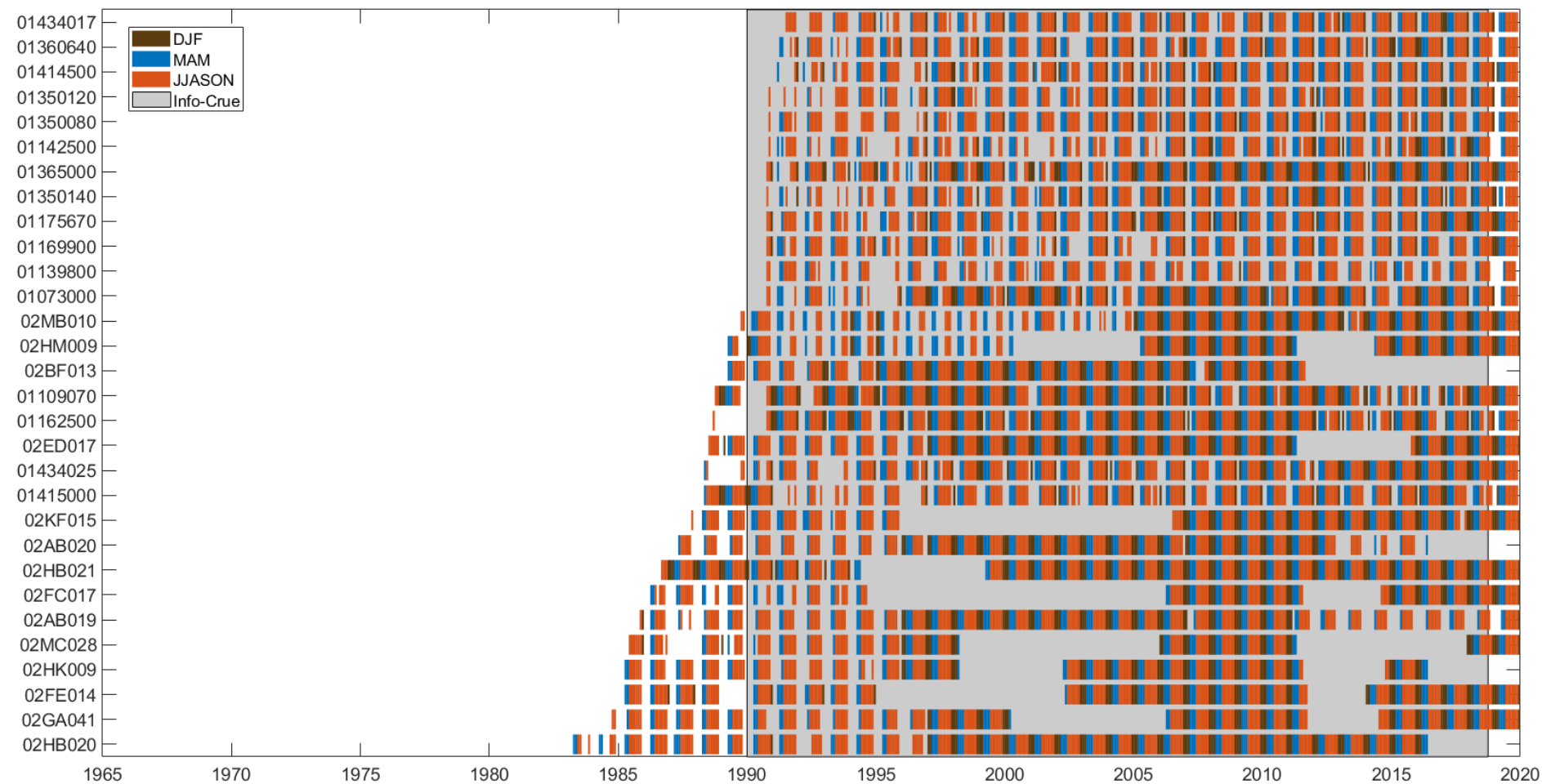
Station de jaugeage		Opérateur	Coordonnées Station		Opération		Année opération	Année disponible	Mann-Kendall p-value
Numéro	Nom		Lat.	Long.	Début	Fin			
02AB019	McVicar Creek	ECCC ¹	48.45	-89.22	1986	2019	33	33	0.59
02DD014	Chippewa Creek		46.31	-79.46	1975	2019	44	43	0.15
02EC009	Holland River		44.09	-79.49	1969	2019	50	50	<0.01*
02GA030	Alder Creek		43.37	-80.55	1969	2016	48	42	0.68
02GE005	Dingman Creek		42.93	-81.35	1970	2019	49	21	0.33
02GH011	Little River		42.31	-82.93	1986	2019	33	32	0.06
02HA014	Redhill Creek		43.24	-79.77	1978	2019	41	33	0.04*
02HB012	Grindstone Creek		43.30	-79.87	1970	2019	50	49	0.44
02HB021	Ancaster Creek		43.23	-79.97	1987	2019	32	28	0.02*
02HC009	East Humber River		43.79	-79.58	1969	2019	50	39	<0.01*
02HC013	Highland Creek		43.78	-79.19	1969	2019	50	34	0.22
02HC018	Lynde Creek		43.88	-78.96	1969	2019	50	44	0.08
02HC028	Little Rouge Creek		43.91	-79.22	1969	2019	50	50	<0.01*
02HC030	Etobicoke Creek		42.77	-80.98	1969	2019	50	46	0.04*
02HC031	West Humber River		43.76	-79.68	1969	2019	50	43	0.02*
02HC033	Mimico Creek		43.65	-79.52	1969	2019	50	46	0.13
02HM009	West Branch Little Cataraqui		44.24	-76.58	1990	2019	29	16	0.16
02KF015	Graham CREEK		45.34	-75.81	1988	2019	31	22	0.55
02MB010	Buells Creek		44.59	-75.70	1990	2019	29	17	0.25
Ma_01109070	Segreganset River	USGS ¹	41.84	-71.14	1988	2019	32	26	0.28
Me_01073000	Oyster River		45.00	-70.97	1990	2019	30	22	0.51
NY_01374598	Horse Pound Brook		41.48	-73.69	1996	2019	24	23	0.49
NY_01374890	Cross River		41.26	-73.6	1996	2019	24	24	0.46
NY_01421610	West Branch Delaware River		42.37	-74.67	2000	2019	20	19	0.59

1- ECCC : Environnement et changement climatique Canada

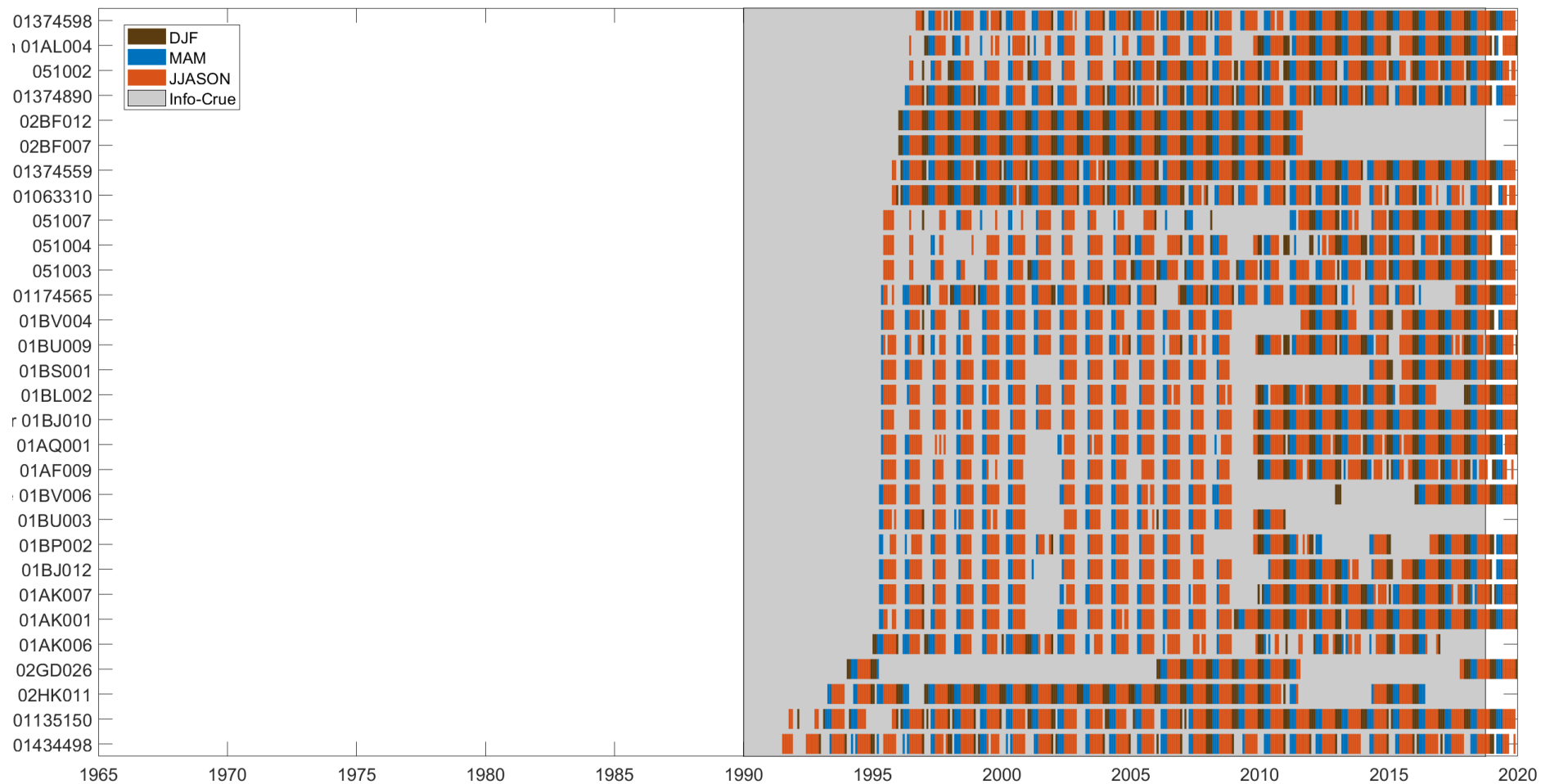
2- USGS : *United States Geological Survey*

Un astérisque indique une tendance significative (p-value < 0.05) dans les séries des débits maxima annuels (1^{er} juin – 31 octobre)

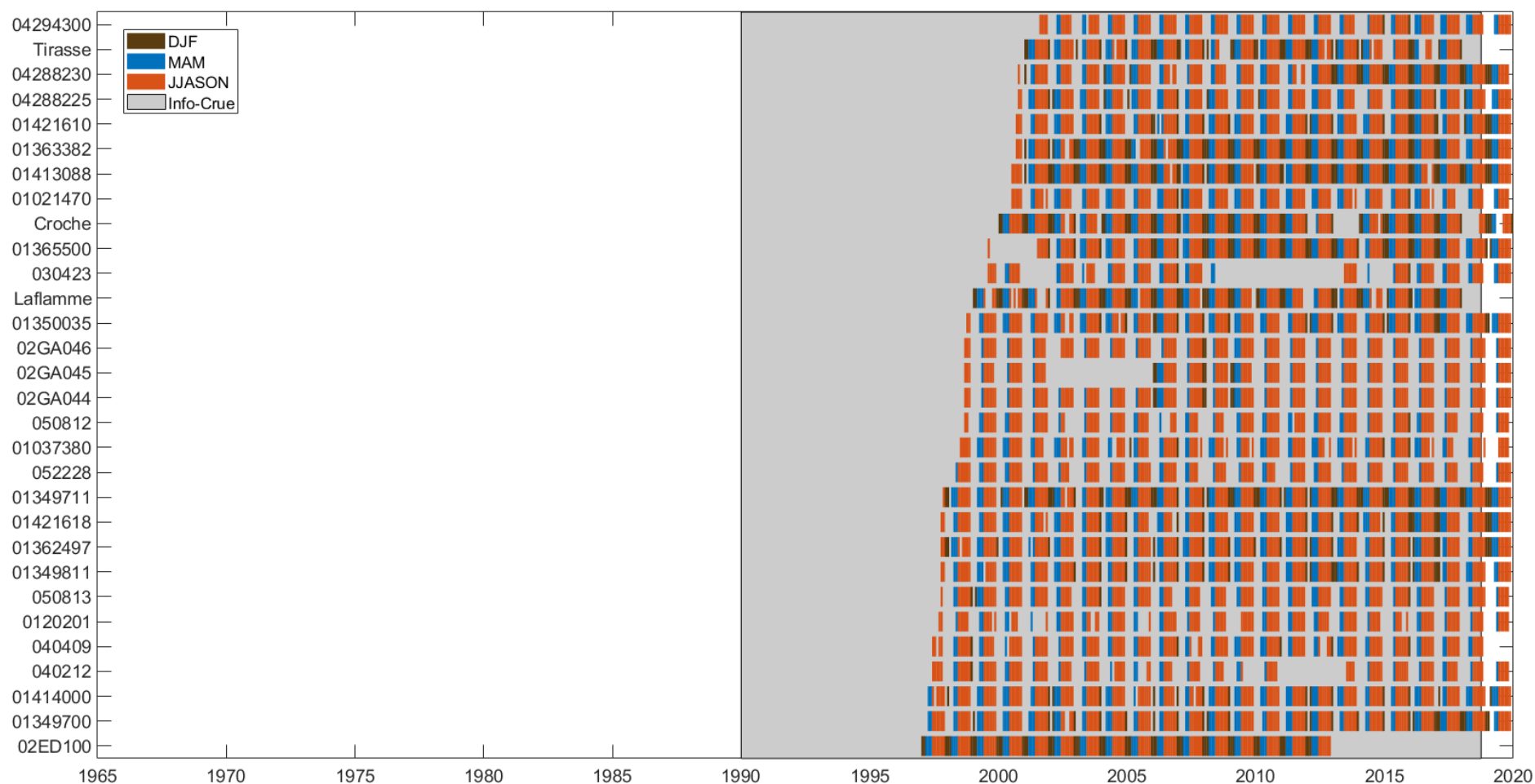
ANNEXE B. COUVERTURE TEMPORELLE DES DONNÉES HYDROMÉTRIQUES AUX STATIONS SOUS ÉTUDE



(a)



(b)



(c)

Figure B.1 - Périodes couvertes par les données hydrométriques aux stations sous étude. Les stations sont ordonnées en fonction de leur date de mise en opération. Les zones en blanc correspondent aux périodes où les données sont manquantes. Le code de couleur identifie les périodes suivantes de l'année : 1) décembre-janvier-février (en marron); 2) mars-avril mai (en bleu); 3) juin à novembre (en rouge) et la période de simulation INFO-Crue (en gris)

ANNEXE C – DISTRIBUTIONS GENERALIZED EXTREME VALUE (GEV) ET GUMBEL

Les intensités des MAP pour les durées 5, 10, 15, 30 min, 1, 2, 6, 12, 24, 48 et 72 heures et de PdR 2, 5, 10, 25, 50, 100 et 350 ans ont été estimées en considérant la distribution *Generalized Extreme Value* (GEV) dont les trois paramètres ont été ajustés en utilisant la méthode des L-moments. La fonction de densité de probabilité, f_{GEV} de la distribution GEV s'écrit :

$$f_{GEV}(x; \mu, \beta, \xi) = \frac{1}{\beta} \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\beta} \right) \right]^{(-1/\xi - 1)} \exp \left\{ - \left[1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\beta} \right) \right]^{-1/\xi} \right\} \quad (C.1)$$

où x est l'intensité de pluie (en mm/h), μ le paramètre de position, β le paramètre d'échelle ($\beta > 0$) et ξ , le paramètre de forme. On distingue trois cas selon la valeur du paramètre de forme :

$$\begin{aligned} x &\in \left[\mu - \frac{\beta}{\xi}, +\infty \right] & si \quad \xi > 0 \\ x &\in [-\infty, +\infty] & si \quad \xi = 0 \\ x &\in \left[-\infty, \mu - \frac{\beta}{\xi} \right] & si \quad \xi < 0 \end{aligned} \quad (C.2)$$

Le cas $\xi > 0$ correspond à la situation où la distribution n'est pas bornée positivement et on parle alors de distribution à queue lourde ou '*heavy-tailed*'. Dans le cas $\xi < 0$, la distribution est bornée. La Figure C.1 présente un exemple de la fonction de densité de probabilité de la distribution GEV pour les cas $\xi < 0$ (distribution bornée), $\xi = 0$ (distribution Gumbel) et $\xi > 0$ (distribution non bornée ou à queue lourde – '*heavy-tailed*').

Le cas $\xi = 0$ correspond à la distribution Gumbel qui est donc un cas particulier de la distribution GEV et dont la densité de probabilité s'écrit :

$$f_{Gum}(x; \mu, \beta) = \frac{1}{\beta} \exp \left[- \left(\frac{x - \mu}{\beta} \right) \right] \exp \left\{ - \exp \left[- \left(\frac{x - \mu}{\beta} \right) \right] \right\} \quad (C.3)$$

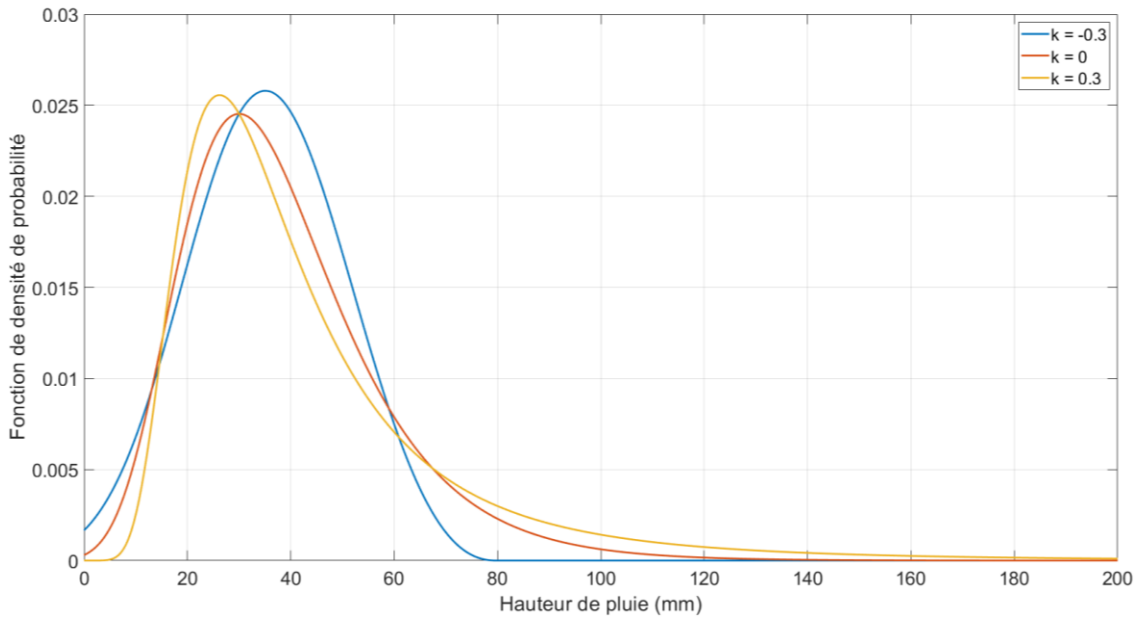


Figure C.1 – Exemple de fonction de densité de probabilité de la distribution GEV pour les cas $\xi < 0$ (distribution bornée; ligne bleu), $\xi = 0$ (distribution Gumbel; ligne rouge) et $\xi > 0$ (distribution non bornée ou à queue lourde - 'heavy-tailed'; ligne jaune).

La version régionale de la densité de probabilité de la distribution GEV régionale est construite en divisant les valeurs des MAP de chaque durée par la valeur moyenne des MAP à la station considérée. Ces séries aux différentes stations pour chaque durée sont ensuite combinées et ajustées à une distribution GEV similaire à celle présentée à l'équation C.1 afin d'estimer les valeurs des paramètres régionaux de la GEV (μ_R, β_R, ξ_R). Les quantiles régionaux sont enfin estimés en multipliant les quantiles de la distribution régionale par un facteur multiplicatif $\bar{x}$ (valeur moyenne des MAP) qui dépend de la durée considérée.

$$I_{GEV}^R(p; \mu, \beta, \xi) = \bar{x} \left(\mu_R + \frac{\sigma_R}{\beta_R} \left\{ [-\log(p)]^{-\beta_R} - 1 \right\} \right) \quad (C.4)$$

Les valeurs du facteur multiplicatif et des paramètres régionaux (μ_R, β_R, ξ_R) sont regroupées au Tableau C.1.

Tableau C1 - Valeurs des paramètres régionaux de la GEV et valeurs estimées par Villeneuve *et al.* (2007).

Durée	Facteur multiplicatif	Paramètres GEV régionale			Villeneuve <i>et al.</i> (2007) ^{1,2} (tableau 7.7, p. 78)		
		μ_R	β_R	ξ_R	μ_R	β_R	ξ_R
5 min	8.3	0.876	0.250	-0.086	0.861	0.260	-0.045
10 min	11.8	0.869	0.257	-0.075	0.849	0.261	0.003
15 min	14.2	0.863	0.260	-0.053	0.841	0.263	0.029
30 min	18.3	0.839	0.263	0.034	0.838	0.292	-0.022
1 h	22.7	0.817	0.256	0.122	0.829	0.274	0.045
2 h	29.0	0.831	0.227	0.146	0.830	0.256	0.082
6 h	43.4	0.868	0.241	-0.030	0.825	0.243	0.128
12 h	52.9	0.879	0.240	-0.082	0.836	0.266	0.039
24 h	62.0	0.878	0.220	-0.026	0.869	0.267	-0.095
48 h	70.7	0.898	0.202	-0.079	-	-	-
72 h	78.4	0.895	0.187	-0.017	-	-	-

1. Les durées 48 et 72 heures n'ont pas été considérées dans l'étude de Villeneuve *et al.* (2007).
2. A noter que la paramétrisation utilisée dans Villeneuve *et al.* (2007) pour le paramètre de forme est différente de celle du présent document. Le signe de ce paramètre est inversé, c'est-à-dire ξ_R (Villeneuve *et al.*) = - ξ_R (présente étude). La paramétrisation utilisée dans le tableau est celle de la présente étude.

ANNEXE D. QUANTILES DE DÉBIT ET PARAMÈTRES DE LA DISTRIBUTION GEV

Tableau D.1 – Quantiles de débits estimés pour diverses périodes de retour à partir des données observées et paramètres de la distribution GEV (*Generalized extreme value*) pour les bassins versants des Groupes A et B (Québec)

Station de jaugeage	Groupe	Paramètre GEV			Débit (m³/s)							
		Xi	Alpha	K	2	5	10	20	25	50	100	350
030425	A	13.8	6.8	-0.10	16.3	24.8	31.0	37.3	39.5	46.3	53.5	67.9
040212		7.4	4.1	-0.20	9.0	14.6	19.1	24.0	25.8	31.6	38.4	53.0
040409		7.0	5.2	-0.12	8.9	15.5	20.4	25.5	27.3	32.9	38.9	51.1
050812		15.0	7.2	-0.20	17.7	27.4	35.2	43.8	46.8	56.9	68.3	93.4
052228		19.0	11.2	0.07	23.0	35.0	42.4	49.1	51.2	57.4	63.2	73.1
030426	B	8.96	5.16	0.36	10.7	14.9	16.9	18.4	18.7	19.7	20.5	21.5
050813		0.3	0.2	-0.14	0.3	0.6	0.7	0.9	1.0	1.2	1.4	1.9
051002		0.9	0.5	-0.15	1.1	1.7	2.1	2.6	2.8	3.3	3.9	5.2
051003		3.0	1.6	-0.30	3.6	6.1	8.2	10.8	11.7	15.0	19.1	28.9
051004		0.7	0.3	-0.25	0.8	1.3	1.7	2.2	2.3	2.9	3.6	5.2
0120201		6.7	3.5	0.02	9.0	11.9	14.4	16.8	17.5	19.8	22.1	26.1
Laflamme		0.1	0.0	-0.20	0.1	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.5
Tirasse		0.1	0.0	0.15	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Lac Croche		0.1	0.0	0.12	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3

Tableau D.2 – Quantiles de débits estimés pour diverses périodes de retour à partir des données observées et paramètres de la distribution GEV (*Generalized extreme value*) pour les bassins versants du Groupe C (INFO-Crue, Québec)

Numéro du tronçon INFO-Crue	Paramètre GEV			Débit (m³/s)							
	Xi	Alpha	K	2	5	10	20	25	50	100	350
MONT00138	20.9	11.0	0.01	24.9	36.2	43.1	49.3	51.1	56.6	61.7	70.1
MONT00139	3.8	1.9	0.07	4.5	6.6	7.9	9.0	9.4	10.5	11.5	13.2
MONT00141	1.2	0.6	0.06	1.4	2.1	2.5	2.9	3.0	3.4	3.7	4.3
MONT00289	6.6	3.9	0.23	8.0	11.5	13.4	15.0	15.4	16.6	17.7	19.1
MONT00290	2.1	1.2	0.31	2.5	3.5	4.0	4.4	4.5	4.8	5.0	5.3
MONT00292	5.9	2.9	0.30	6.9	9.4	10.7	11.6	11.9	12.6	13.2	14.0
MONT00293	2.6	1.2	0.27	3.1	4.2	4.7	5.2	5.3	5.6	5.9	6.3
MONT00294	0.7	0.3	0.16	0.8	1.1	1.2	1.4	1.4	1.5	1.6	1.8
MONT00297	0.5	0.2	0.17	0.6	0.8	1.0	1.1	1.1	1.2	1.3	1.4
MONT00531	3.3	1.7	0.04	3.9	5.7	6.9	8.0	8.3	9.4	10.4	12.1
MONT00660	13.3	8.5	-0.06	16.4	26.6	33.8	41.0	43.3	50.7	58.4	73.2
MONT00666	10.1	6.4	-0.08	12.4	20.2	25.7	31.3	33.2	39.1	45.2	57.1
MONT00667	3.9	2.5	0.08	4.8	7.4	9.0	10.5	11.0	12.3	13.6	15.7
MONT00672	6.4	3.9	-0.13	7.8	12.8	16.6	20.6	21.9	26.3	31.1	41.0
MONT00673	0.2	0.1	-0.05	0.3	0.4	0.5	0.7	0.7	0.8	0.9	1.1

Numéro du tronçon INFO-Crue	Paramètre GEV			Débit (m³/s)							
	Xi	Alpha	K	2	5	10	20	25	50	100	350
MONT00930	7.3	3.3	0.14	8.5	11.7	13.6	15.2	15.7	17.1	18.3	20.3
MONT00974	5.3	2.2	0.08	6.0	8.3	9.7	11.0	11.4	12.6	13.6	15.4
MONT01284	1.9	1.0	-0.09	2.3	3.5	4.4	5.3	5.6	6.6	7.7	9.7
MONT01351	2.3	1.4	0.22	2.7	4.0	4.7	5.3	5.4	5.9	6.3	6.9
MONT01462	0.4	0.3	0.02	0.6	0.9	1.2	1.4	1.5	1.7	1.9	2.3
OUTV03255	2.0	1.5	-0.01	2.5	4.2	5.3	6.4	6.8	7.9	9.0	10.9
OUTV03256	0.4	0.3	0.05	0.5	0.8	1.0	1.2	1.3	1.4	1.6	1.8
OUTV03323	4.7	3.3	-0.18	5.9	10.3	13.8	17.6	18.9	23.3	28.3	38.9
OUTV03352	5.7	4.2	0.05	7.2	11.8	14.7	17.4	18.3	20.8	23.2	27.4
OUTV03354	15.3	8.8	0.06	18.5	27.8	33.7	39.1	40.8	45.7	50.5	58.5
SLNO00027	5.8	3.2	-0.00	7.0	10.7	13.1	15.4	16.2	18.4	20.7	24.8
SLNO00032	7.3	4.0	0.10	8.8	12.9	15.4	17.6	18.2	20.2	22.0	24.9
SLNO00036	4.4	2.2	0.09	5.2	7.4	8.8	10.1	10.4	11.5	12.6	14.3
SLNO00041	7.9	4.1	0.00	9.3	14.0	17.0	19.9	20.8	23.7	26.5	31.6
SLNO00719	1.3	0.8	-0.15	1.6	2.6	3.4	4.2	4.4	5.3	6.3	8.4
SLNO00816	2.2	1.4	-0.16	2.8	4.6	6.0	7.6	8.1	9.9	11.8	16.0
SLNO00817	0.7	0.5	-0.16	0.9	1.6	2.2	2.8	3.0	3.6	4.4	5.9
SLSO00005	8.7	3.5	-0.04	10.0	14.1	17.0	19.8	20.7	23.6	26.6	32.1
SLSO00007	4.5	1.7	-0.01	5.2	7.1	8.4	9.7	10.1	11.4	12.6	14.9
SLSO00064	17.8	7.5	-0.22	20.7	31.2	39.8	49.5	52.9	64.6	78.2	108.7
SLSO00340	1.7	1.3	-0.05	2.2	3.7	4.7	5.8	6.1	7.2	8.3	10.4
SLSO00346	3.9	2.5	0.07	4.8	7.5	9.1	10.6	11.1	12.4	13.7	15.9
SLSO02209	4.3	2.3	0.06	5.1	7.5	9.1	10.5	10.9	12.2	13.4	15.6
SLSO02215	1.0	0.5	-0.06	1.2	1.9	2.3	2.8	2.9	3.4	3.9	4.8
SLSO02472	2.5	1.2	-0.11	2.9	4.3	5.4	6.5	6.9	8.1	9.4	11.9
SLSO02510	6.3	2.3	-0.05	7.2	9.9	11.9	13.8	14.4	16.4	18.4	22.2
SLSO02511	2.6	1.0	0.01	3.0	4.1	4.8	5.5	5.7	6.4	7.1	8.3

Tableau D.3 – Quantiles de débits estimés pour diverses périodes de retour à partir des données observées et paramètres de la distribution GEV (*Generalized extreme value*) pour les bassins versants du Groupe D (Nouveau-Brunswick)

Station de jaugeage	Paramètre GEV			Débit (m³/s)							
Numéro	Xi	Alpha	K	2	5	10	20	25	50	100	350
01AF009	15.7	11.7	-0.22	20.2	36.5	49.8	64.8	70.1	88.2	109.1	155.9
01AK001	14.0	10.5	-0.07	17.9	30.6	39.6	48.7	51.7	61.2	71.2	90.4
01AK007	36.8	28.1	-0.10	47.3	82.2	107.5	133.6	142.2	170.1	199.8	258.4
01AL004	1.2	1.1	0.02	1.6	2.8	3.6	4.4	4.6	5.4	6.1	7.3
01AQ001	44.0	35.6	0.03	57.0	96.2	121.3	1445.0	152.3	174.7	196.5	234.5
01BJ010	26.4	23.7	-0.25	35.5	69.6	98.3	131.4	143.2	184.3	233.1	345.9
01BP002	4.0	4.0	-0.15	5.5	10.8	14.8	19.2	20.6	25.5	30.9	42.3
01BU009	5.4	4.3	0.13	6.9	11.3	13.8	16.1	16.7	18.7	20.4	23.3
01BV004	28.4	19.2	-0.45	36.1	69.5	103.1	147.8	165.3	231.8	322.2	576.3
01BV006	0.9	0.9	-0.14	1.3	2.5	3.37	4.3	4.6	5.7	6.9	9.2

Tableau D.4 - Quantiles de débits estimés pour diverses périodes de retour à partir des données observées et paramètres de la distribution GEV (*Generalized extreme value*) pour les bassins-versants du Groupe E (États-Unis : Me : Maine ; Ma : Massachussetts ; Vt : Vermont ; NY : New York)

Station de jaugeage	Paramètre GEV			Débit (m³/s)							
	Xi	Alpha	K	2	5	10	20	25	50	100	350
Ma_01162500	4.3	2.7	-0.04	5.2	8.4	10.5	12.6	13.3	15.5	17.7	21.8
Ma_01169900	26.6	21.1	-0.37	34.9	68.9	100.8	141.1	156.2	212.1	284.0	471.6
Ma_01174565	7.3	8.6	-0.23	10.6	22.7	32.6	43.8	47.8	61.5	77.4	113.2
Ma_01175670	1.7	1.2	-0.53	2.2	4.5	7.1	10.7	12.1	18.0	26.3	51.9
Me_01021470	1.8	1.0	-0.17	2.1	3.5	4.5	5.6	6.0	7.3	8.7	11.8
Me_01037380	6.9	5.6	-0.17	9.0	16.4	22.1	28.4	30.5	37.6	45.6	62.6
Me_01063310	0.3	0.2	-0.56	0.4	0.8	1.3	2.1	2.4	3.6	5.3	10.9
NY_01349700	53.0	35.5	-0.08	66.2	109.7	140.8	172.6	183.1	216.6	251.9	320.8
NY_01349711	7.9	6.4	-0.57	10.5	22.9	36.9	57.3	65.7	99.7	149.9	310.0
NY_01349810	36.7	27.4	-0.52	47.8	98.8	153.3	229.5	260.3	381.2	553.4	1072.4
NY_01350035	17.0	17.0	-0.16	23.4	45.8	62.9	81.4	87.7	108.6	131.8	180.4
NY_01350080	13.2	14.7	-0.38	19.0	42.9	65.4	93.7	104.5	144.0	194.9	328.2
NY_01350120	2.0	1.8	-0.55	2.8	6.3	10.1	15.6	17.9	27.0	40.2	81.7
NY_01350140	11.1	12.4	-0.24	15.9	33.4	48.0	64.6	70.5	90.9	114.7	169.1
NY_01360640	5.5	4.9	-0.15	7.4	13.7	18.5	23.6	25.3	31.1	37.4	50.5
NY_01362497	22.3	12.1	-0.15	26.9	42.7	54.8	67.8	72.2	86.8	103.0	136.9
NY_01363382	24.4	12.4	-0.51	29.4	52.5	77.1	111.5	125.4	179.9	257.5	490.9
NY_01365000	55.0	35.6	-0.14	68.4	114.5	149.5	186.6	199.3	240.8	286.3	380.6
NY_01365500	26.0	17.4	-0.01	32.4	52.2	65.5	78.2	82.3	94.8	107.3	129.9
NY_01374559	3.0	2.5	-0.48	4.0	8.4	13.0	19.3	21.8	31.4	44.9	84.2
NY_01413088	4.2	3.5	-0.18	5.6	10.2	13.9	17.9	19.3	24.0	29.2	40.6

Station de jaugeage	Paramètre GEV			Débit (m³/s)							
	Xi	Alpha	K	2	5	10	20	25	50	100	350
NY_01414000	26.4	22.0	0.00	34.5	59.5	76.1	92.1	97.2	112.9	128.5	156.7
NY_01415000	16.6	14.5	-0.39	22.3	46.0	68.4	97.0	107.9	148.0	200.1	337.8
NY_01421618	19.4	16.2	-0.24	25.6	48.6	67.7	89.6	97.4	124.3	155.9	228.2
NY_01434017	49.4	31.7	-0.14	61.4	102.2	133.0	165.6	176.6	212.8	252.4	333.8
NY_01434025	5.3	2.8	-0.26	6.4	10.4	13.8	17.7	19.1	24.0	29.8	43.2
NY_01434498	73.6	58.7	-0.13	95.6	171.1	227.7	287.7	308.0	374.5	447.1	596.1
NY_01521500	16.3	3.3	0.60	17.3	19.5	20.3	20.8	20.9	21.2	21.4	21.6
NY_04233286	23.7	21.1	-0.16	31.6	59.3	80.5	103.4	111.2	137.1	165.8	226.0
Vt_01135150	3.2	1.4	-0.25	3.7	5.7	7.4	9.3	10.0	12.5	15.3	21.9
Vt_01139800	5.9	3.9	-0.20	7.4	12.8	17.1	21.8	23.5	29.1	35.5	49.5
Vt_01142500	13.1	12.3	-0.42	18.0	38.8	59.1	85.7	96.0	134.5	185.9	326.5
Vt_04288225	10.0	3.4	-0.50	11.4	17.6	24.2	33.2	36.8	50.9	70.6	129.0
Vt_04288230	7.4	3.4	-0.28	8.8	13.9	18.2	23.4	25.3	31.9	39.9	58.8

Tableau D.5 - Quantiles de débits estimés pour diverses périodes de retour à partir des données observées et paramètres de la distribution GEV (*Generalized extreme value*) pour les bassins-versants du Groupe F (Ontario)

Station de jaugeage	Paramètre GEV			Débit (m³/s)							
	Xi	Alpha	K	2	5	10	20	25	50	100	350
02AB020	5.1	4.1	-0.33	6.7	13.1	18.9	26.0	28.7	38.2	50.2	80.3
02BF004	6.9	7.1	-0.11	9.6	18.5	25.0	31.8	34.0	41.3	49.1	64.8
02BF005	1.0	0.6	-0.25	1.2	2.0	2.7	3.4	3.7	4.7	5.8	8.3
02BF007	0.4	0.3	-0.40	0.5	1.0	1.4	1.9	2.1	2.9	3.9	6.5
02BF008	0.6	0.4	-0.26	0.7	1.3	1.8	2.3	2.5	3.2	4.0	5.9
02BF009	0.7	0.5	-0.26	0.9	1.7	2.3	3.1	3.3	4.2	5.3	7.8
02BF012	0.2	0.2	-0.53	0.3	0.6	0.9	1.4	1.6	2.3	3.4	6.6
02BF013	0.1	0.1	-0.40	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.6	0.8	1.3
02DB007	8.4	4.6	0.14	10.0	14.6	17.2	19.5	20.2	22.1	23.9	26.7
02DD013	5.0	2.5	-0.10	5.9	9.0	11.2	13.5	14.3	16.8	19.4	24.5
02EC010	1.3	1.2	-0.38	1.7	3.6	5.4	7.7	8.5	11.7	15.7	26.4
02ED017	2.2	1.6	-0.39	2.8	5.4	7.8	11.0	12.1	16.5	22.2	37.3
02ED100	2.5	2.4	-0.50	3.4	7.8	12.5	18.9	21.5	31.6	45.9	88.4
02FD002	4.5	3.0	-0.17	5.6	9.7	12.8	16.2	17.4	21.3	25.6	34.9
02FE014	8.4	6.2	-0.28	10.8	20.0	28.0	37.4	40.8	52.8	67.4	102.3
02GA031	1.1	0.4	-0.43	1.3	2.0	2.7	3.6	3.9	5.3	7.1	12.0
02GA041	6.0	6.4	-0.11	8.4	16.6	22.6	28.8	30.9	37.7	45.0	59.7
02GA044	0.2	0.1	-0.63	0.3	0.6	1.0	1.5	1.7	2.7	4.2	9.4
02GA045	0.6	0.3	0.25	0.7	0.9	1.0	1.1	1.2	1.2	1.3	1.4
02GA046	0.2	0.2	-0.29	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0	1.3	1.6	2.5
02HB020	1.6	0.8	-0.14	1.9	3.0	3.7	4.6	4.8	5.8	6.8	8.9
02HC019	7.6	5.9	-0.43	9.9	20.1	30.2	43.5	48.7	68.3	94.6	167.7
02HC038	3.7	3.2	-0.21	4.9	9.3	12.8	16.7	18.1	22.8	28.1	39.9
02HD003	6.1	2.8	0.08	7.1	10.0	11.8	13.4	13.9	15.4	16.7	19.0

Station de jaugeage	Paramètre GEV			Débit (m³/s)							
	Xi	Alpha	K	2	5	10	20	25	50	100	350
02HD004	2.4	1.6	-0.32	3.0	5.4	7.6	10.2	11.2	14.7	18.9	29.5
02HH003	1.6	0.7	-0.10	1.9	2.7	3.3	3.9	4.2	4.8	5.6	7.0
02HJ005	0.8	0.4	0.10	0.9	1.3	1.5	1.7	1.8	2.0	2.2	2.4
02HK009	3.6	2.0	-0.11	4.3	6.8	8.6	10.5	11.2	13.2	15.5	19.9
02HK011	2.5	2.2	-0.23	3.3	6.3	8.8	11.6	12.6	16.0	20.0	28.9
02MC028	3.7	2.6	0.08	4.6	7.3	8.9	10.4	10.9	12.2	13.5	15.6

Tableau D.6 - Quantiles de débits estimés pour diverses périodes de retour à partir des données observées et paramètres de la distribution GEV (*Generalized extreme value*) pour les bassins-versants du Groupe G (Urbain), États-Unis : Me : Maine ; Ma : Massachussets ; Vt : Vermont ; NY : New York.

Station de jaugeage	Paramètre GEV			Débit (m³/s)							
	Xi	Alpha	K	2	5	10	20	25	50	100	350
Numéro											
02AB019	3.9	2.7	-0.43	4.9	9.5	14.1	20.0	22.3	30.9	42.5	74.2
02DD014	6.1	2.1	-0.02	6.9	9.4	11.0	12.6	13.2	14.8	16.4	19.4
02EC009	11.1	7.8	-0.18	14.1	24.5	32.7	41.6	44.7	55.0	66.7	91.7
02GA030	2.2	2.1	-0.19	3.0	5.9	8.2	10.8	11.7	14.6	18.0	25.4
02GE005	9.9	7.0	-0.14	12.5	21.5	28.2	35.4	37.8	45.8	54.5	72.4
02GH011	15.6	6.3	0.04	17.9	24.7	29.0	33.1	34.3	38.1	41.7	47.9
02HB012	5.2	3.4	-0.20	6.5	11.2	15.0	19.2	20.6	25.6	31.3	43.8
02HB021	1.5	0.9	-0.19	1.8	3.0	4.0	5.1	5.5	6.7	8.1	11.2
02HC009	6.4	5.6	-0.23	8.5	16.4	22.8	30.1	32.7	41.5	51.8	75.0
02HC013	62.4	33.0	0.17	74.1	106.2	124.4	139.8	144.3	157.2	168.6	186.0
02HC018	10.0	7.1	-0.14	12.7	21.8	28.7	36.1	38.5	46.7	55.6	73.9
02HC028	7.8	6.1	-0.03	10.0	17.1	22.0	26.7	28.3	33.1	38.0	47.1
02HC030	57.3	27.8	-0.02	67.5	99.5	121.0	141.8	148.5	169.2	189.9	227.9
02HC031	10.7	12.5	-0.34	15.6	35.1	52.8	74.6	82.7	111.9	148.6	241.2
02HC033	27.0	11.6	0.01	31.3	44.4	53.0	61.2	63.8	71.8	79.7	93.9
02HM009	3.6	1.8	-0.04	4.2	6.3	7.7	9.1	9.6	11.0	12.5	15.2
02KF015	2.9	1.3	0.03	3.4	4.9	5.8	6.7	6.9	7.8	8.6	10.0
02MB010	6.2	3.0	0.08	7.3	10.5	12.5	14.2	14.8	16.4	17.8	20.3
Ma_01109070	2.8	2.6	-0.39	3.9	8.2	12.3	17.5	19.5	26.8	36.3	61.4
Me_01073000	3.6	2.3	-0.47	4.5	8.6	12.8	18.5	20.7	29.4	41.3	75.7
NY_01374598	1.3	1.0	-0.66	1.7	3.8	6.3	10.3	12.0	19.1	30.5	70.3
NY_01374890	3.9	2.7	-0.39	5.0	9.5	13.8	19.2	21.3	28.9	38.9	65.2
NY_01421610	5.8	4.9	-0.22	7.7	14.5	20.1	26.3	28.6	36.1	44.8	64.3

ANNEXE E. PROCESSUS DE CARACTÉRISATION DES BASSINS-VERSANTS

Afin d'être en mesure d'estimer les débits de conception pour différentes récurrences à partir de la MÉRA, il est nécessaire de caractériser les BV. Le Tableau E.1 présente les caractéristiques à considérer ainsi que les abréviations et les unités pour chacune d'elles. Les principales sources d'information utilisées pour la caractérisation des BV sont présentées au Tableau E.2 (BV du Québec), au Tableau E.3 (BV du N-B), au Tableau E.4 (BV des États-Unis) et au Tableau E.5 (BV de l'Ontario).

Tableau E.1 – Caractéristiques physiographiques nécessaires à l'estimation des débits de conception avec la MÉRA.

Caractéristiques	Description/Abréviation/Symbole	Unité
Superficie	A	km ²
Pente moyenne du bassin versant	S _B	%
Pente moyenne du cours d'eau	S _C	%
Longueur du cours d'eau principal	L _C	km
Occupation du territoire	Forestier (Arbre et arbuste)	%
	Agricole (culture et pâturage)	
	Urbain	
	Lac et milieux humides	
Classification hydrologique des sols	Groupe hydrologique A	%
	Groupe hydrologique B	
	Groupe hydrologique C	
	Groupe hydrologique D	

Tableau E.2 – Sources d'information utilisées pour la caractérisation des BV des Groupes A, B et C (Québec)

Source d'information	Caractéristique	Provenance ¹	Utilisé pour estimer
Modèles numériques de terrain du Québec ²	Échelle 1:20 000 Résolution (10 m x 10 m)	MERN	A
			S _B
			S _C
Cartes topographiques ³	Échelle 1:20 000	MERN	A
Géobase du réseau hydrographique du Québec ⁴	Échelle 1:20 000 (Sud du Québec) Échelle 1:50 000 (Nord du Québec)	MERN	A
			S _C
			L _C
			Occupation du territoire
Inventaire annuel des cultures du Canada ⁵	Inventaire de l'année 2016	ECCC	Occupation du territoire
Dépôts de surface Forêt Ouverte ⁶	Valable pour la période 2010-2013	MFFP	Classification hydrologique des sols

1. MERN : Ministère de l'Énergie et des Ressources Naturelles du Québec ; ECCC : Environnement et changement climatique Canada ; MFFP : Ministère des forêts, de la faune et des parcs du Québec

2. <https://mern.gouv.qc.ca/repertoire-geographique/modeles-numeriques-terrain-echelle-1-20000/>

3. <https://mern.gouv.qc.ca/repertoire-geographique/cartes-topographiques-echelle-1-20000/>

4. <https://mern.gouv.qc.ca/repertoire-geographique/reseau-hydrographique-grhq/>

5. <https://www.agr.gc.ca/atlas/iac/>

6. <https://www.foretouverte.gouv.qc.ca/>

Tableau E.3 - Sources d'information utilisées pour la caractérisation des BV du Groupe D (N-B)

Source d'information	Caractéristique	Provenance ¹	Utilisé pour estimer
Modèle numérique d'élévation dérivés de LIDAR ²	Résolution (1 m x 1 m)	Service N-B	A
			S _B
			S _C
Cartes topographiques	Échelle < 1:40 000	World Topographic Map - ESRI	A
Réseau Hydrographique du N-B ³	Mise à jour 2015	MDER	A
			S _C
			L _C
			Occupation du territoire
Inventaire annuel des cultures du Canada ⁴	Considérant l'année 2016	ECCC	Occupation du territoire
Dépôts de surface Sols forestier ⁵		MDER	Classification hydrologique des sols

1. MDER : Ministère du Développement de l'énergie et des ressources du Nouveau-Brunswick ; ECCC : Environnement et changement climatique Canada

2. <http://www.snb.ca/geonb1/f/DC/NBDEM.asp>

3. <http://www.snb.ca/geonb1/f/DC/NBHN.asp>

4. <https://www.agr.gc.ca/atlas/iac/>

5. <http://www.snb.ca/geonb1/f/DC/forestsoils.asp>

Tableau E.4 - Sources d'information utilisées pour la caractérisation des BV du Groupe E et G (États-Unis)

Source d'information	Caractéristique	Provenance ¹	Utilisé pour estimer
3DEP Elevation ²	Résolution (1 m x1 m)	National Map Viewer USGS ^A	A
			S _B
			S _C
US Topo ²	Échelle variable		A
National Hydrography Dataset ²			A
			S _C
			L _C
			Occupation du territoire
NLCD Land Cover ³	2011	MRLC ^B	Occupation du territoire
Dépôts de surface (Web soil survey) ⁴		USDA ^C	Classification hydrologique des sols

1- USGS: United States Geological Survey; MRLC: Multi-Resolution Land Characteristics Consortium; USDA: United States Department of Agriculture

2- <http://viewer.nationalmap.gov/advanced-viewer/>

3- www.mrlc.gov/data/nlcd-2011-land-cover-conus

4- <https://websoilsurvey.sc.egov.usda.gov/App/HomePage.htm>

Tableau E.5 - Sources d'information utilisées pour la caractérisation des BV du Groupe F et G (Ontario)

Source d'information	Caractéristique	Provenance ¹	Utilisé pour estimer
Provincial digital elevation model v3.0 ² Ontario Digital Surface Model (Imagery-Derived) ³ Ontario Digital Terrain Model (Lidar-Derived) ⁴	Résolution (30 m x 30 m) (2 m x 2 m) (0.5 m x 0.5 m)	Ontario's Open Data Team	A
			S _B
			S _C
Cartes topographiques	Échelle < 1 : 40 000	World Topographic Map-ESRI	A
Ontario Hydro Network - Hydrographic Line ⁵ Ontario Hydro Network – Waterbody ⁶	Mise à jour 2020	Ontario's Open Data Team	A
			S _C
			L _C
			Occupation du territoire
Inventaire annuel des cultures du Canada ⁷	Considérant l'année 2016	ECCC ^A	Occupation du territoire
Dépôts de surface (Soil survey) ⁸	Mise à jour 2015	Ontario's Open Data Team	Classification hydrologique des sols

1- ECCC : Environnement et changement climatique Canada

2- <https://data.ontario.ca/dataset/provincial-digital-elevation-model>

3- <https://geohub.lio.gov.on.ca/datasets/mnrf::ontario-digital-surface-model-imagery-derived>

4- <https://geohub.lio.gov.on.ca/datasets/776819a7a0de42f3b75e40527cc36a0a>

5- <https://data.ontario.ca/dataset/ontario-hydro-network-hydrographic-line>

6- <https://data.ontario.ca/dataset/ontario-hydro-network-waterbody>

7- <https://www.agr.gc.ca/atlas/iac/>

8- <https://data.ontario.ca/dataset/soil-survey>

E.1 Superficie

Considérant la petite superficie des BV, une délimitation manuelle des limites des superficies en amont des stations hydrométriques a été réalisée pour les BV des Groupes A, B, D. Pour les BV du Groupe C, un point en aval de chaque BV prioritaire a été retenu pour la délimitation des BV. Pour les BV des Groupes E et F, la délimitation des BV dans le cadre du projet pour le MTQ sur la révision des critères de conception des ponceaux a été retenue (pour plus de détails voir Mailhot *et al.* 2018). Finalement, pour les BV du Groupe G, la délimitation des BV provient de : Polygones des bassins du Réseau hydrométrique national³.

E.2 Pente moyenne du BV

Les modèles numériques de terrain (MNT), ou modèles numériques d'élévation, ont été utilisés afin d'estimer la pente moyenne des BV. La fonctionnalité *Spatial analyst* → *Surface* → *SLOPE* d'ArcGIS a été utilisée pour estimer la pente de chacune des cellules ou tuiles des MNT alors que la fonctionnalité *Spatial analyst* → *Zonal* → *STATISTICAL AS TABLE* a permis d'estimer la pente moyenne considérant toutes les tuiles comprises à l'intérieur de chacun des BV.

Les MNT pour l'Ontario et le N-B ont des résolutions parfois beaucoup plus fines allant de 0.5 m x 0.5 m à 2 m x 2 m (Tableaux E.3 et E.5). Plusieurs études ont montré que la pente moyenne d'un BV est inversement proportionnelle à la taille des cellules (Moglen et Hartman, 2001; Hill et Neary, 2005). Ces auteurs expliquent que des cellules de plus grandes tailles ont un effet de lissage sur la topographie à fine échelle. Puisqu'une très fine résolution est susceptible de surestimer les pentes moyennes des BV, tous les modèles d'élévation ont été agrégés de manière à obtenir un nouveau modèle d'élévation dont la résolution est de 10 m x 10 m. Cette étape a été réalisée en utilisant la fonctionnalité *Data Management* → *Raster* → *Raster Processing* → *RESAMPLE* d'ArcGIS.

³ <https://open.canada.ca/data/en/dataset/0c121878-ac23-46f5-95df-eb9960753375>

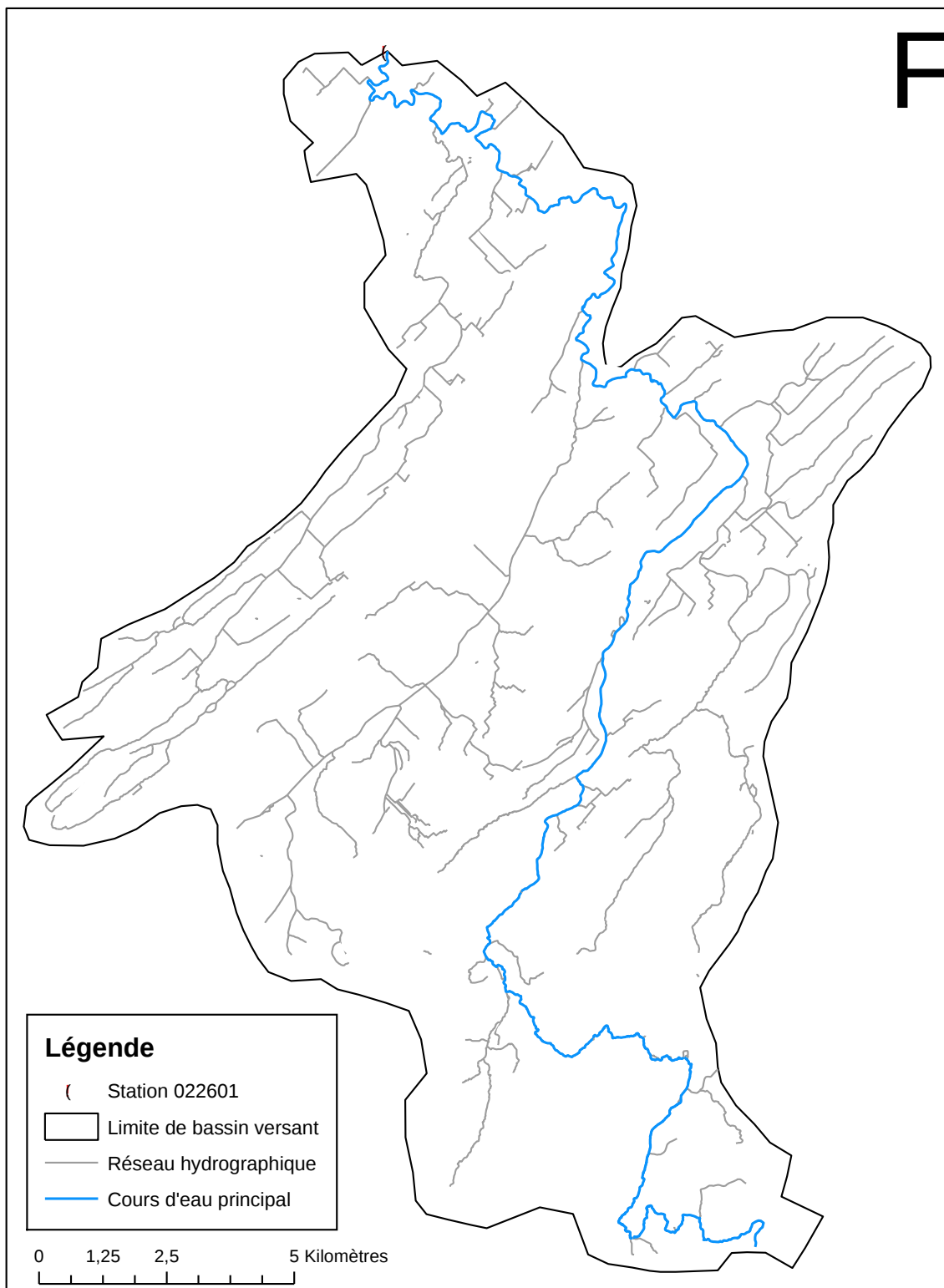


Figure E.1 – Réseau hydrographique complet et cours d'eau principal (en bleu) du BV de la station de Kamouraska (022601).

E.3 Longueur du cours d'eau principal

Le cours d'eau principal correspond au plus long tracé hydrographique de l'exutoire jusqu'à la limite amont du BV considérant l'entièreté du réseau hydrographique. Lorsque le réseau hydrographique n'atteint pas les limites du BV, un tronçon supplémentaire est ajouté depuis le tronçon le plus en amont jusqu'à la limite du BV en suivant la topographie. La Figure E.1 montre un exemple de cours d'eau principal pour un BV ayant un réseau hydrographique complexe (Kamouraska, 022601). Pour les BV des Groupes A, B, C, D, E et F, le plus long parcours de l'eau a été délimité manuellement. Pour les BV du Groupe G, une procédure visant la délimitation du plus long parcours de l'eau, s'appuyant sur un MNT et l'outil *Arc Hydro*, a été utilisée afin d'accélérer le processus.

E.4 Pente moyenne du cours d'eau

Le pente moyenne du cours d'eau a été estimée en considérant la longueur totale du cours d'eau principal. Le cours d'eau principal correspond au plus long tracé hydrographique de l'exutoire jusqu'à la limite amont du BV considérant la tout le réseau hydrographique (voir Section E.3). Une fois le cours d'eau principal identifié, l'outil *3D Analyst* → *Functionnal surface information* → *ADD SURFACE INFORMATION* d'ArcGIS a été utilisé pour calculer la pente moyenne du cours d'eau. Cette pente moyenne est estimée à partir des pentes des tuiles, elles-mêmes estimées préalablement lors du calcul de la pente moyenne du BV (voir Section E.2), qui touchent au tracé du cours d'eau principal.

E.5 Occupation du territoire

L'occupation du territoire a été déterminée à partir des couches hydrographiques surfaciques (lacs) et de l'inventaire annuel des cultures du Canada (IAC) pour tous les BV du Québec, de l'Ontario et du Nouveau-Brunswick. Ainsi la superficie des lacs a été estimée avec la couche hydrographique surfacique dans un premier temps et chacun de ces éléments surfaciques a été 'soustrait' (ou 'masqué') de la couche de l'IAC en utilisant l'outil *Analysis* → *Overlay* → *Erase* d'ArcGIS. Les surfaces restantes de l'IAC ont été utilisées pour estimer les occupations du territoire suivantes : forêt, culture, pâturage, milieux humides, zones urbaines de faible, moyenne et haute densité. La même procédure a été utilisée pour les BV des États-Unis où, toutefois, l'occupation du territoire provient du *National Land Cover Database* (NLCD, 2011).

ANNEXE F. CARACTÉRISTIQUES PHYSIOGRAPHIQUES DES BASSINS VERSANTS

Tableau F.1 - Caractéristiques physiographiques des bassins versants des Groupes A et B (Québec)

Numéro de station	Groupe	Superficie (km ²)	Pente bassin versant (%)	Pente cours d'eau (%)	Longueur du cours d'eau (km)	Occupation (%)					
						Boisé	Culture	Pâturage	Urbain	Lac	Milieux humides
030425	A	70	6.3	0.2	21.9	34	19	38	3	1	5
040212		40	11.9	1.5	15.2	96	0	0	0	4	0
040409		63	9.3	0.5	16.6	95	0	3	1	1	0
050812		96	2.8	0.3	35.6	68	9	14	7	0	2
052228		188	14.9	5.5	33.8	92	0	0	1	6	1
030426	B	28.7	0.4	0.1	12.7	8	80	12	0	0	1
050813		2.1	10.8	2.9	2.4	84	0	0	0	16	0
051002		3.6	11.1	4.7	2.4	99	0	0	0	0	1
051003		8.4	12.3	9.3	5.5	99	0	0	0	0	1
051004		1.1	15.8	11.2	1.2	100	0	0	0	0	0
120201		24.1	1.6	0.7	12.6	43	28	27	1	0	1
MFFP		0.7	13.2	7.9	1.1	92	0	0	0	8	0
MFFP		0.5	4.6	4.2	0.9	100	0	0	0	0	0
UM		1.0	11.2	5.5	2.0	86	0	0	0	14	0

Tableau F.2 - Caractéristiques physiographiques des bassins versants du Groupe C (Québec)

Numéro de station	Superficie (km ²)	Pente bassin versant (%)	Pente cours d'eau (%)	Longueur du cours d'eau (km)	Occupation (%)					
					Boisé	Culture	Pâturage	Urbain	Lac	Milieux humides
MONT00138	45.4	4.7	2.1	18.2	72	2	20	4	0	2
MONT00139	6.6	4.0	5.8	5.8	66	1	28	4	0	2
MONT00141	2.7	4.9	4.1	3.3	63	0	22	14	0	1
MONT00289	29.8	3.0	0.5	8.7	61	6	12	17	0	4
MONT00290	5.1	6.5	6.1	4.4	74	3	5	16	0	1
MONT00292	20.9	2.3	0.9	8.3	57	5	15	18	0	4
MONT00293	13.2	2.5	1.0	6.0	59	1	12	23	0	6
MONT00294	1.7	1.9	1.0	3.2	57	0	3	38	0	2
MONT00297	1.5	1.8	1.1	2.8	51	0	11	36	0	2
MONT00531	17.0	0.4	1.3	9.4	9	65	4	21	0	0
MONT00660	42.2	12.2	13.9	11.3	80	0	9	9	0	1
MONT00666	26.2	12.5	15.3	10.1	79	0	7	12	0	1
MONT00667	13.8	5.7	1.9	5.7	71	1	13	14	0	2
MONT00672	12.3	20.2	16.2	9.5	88	0	2	9	0	1
MONT00673	1.3	5.8	5.4	2.7	62	2	10	24	0	1
MONT00930	32.9	0.9	0.7	13.0	25	49	23	2	0	1
MONT00974	16.6	0.7	0.1	7.5	2	79	17	2	0	0
MONT01284	15.1	2.7	0.4	6.0	25	30	11	33	1	1
MONT01351	23.4	0.4	0.1	10.9	7	79	9	5	0	0
MONT01462	9.2	1.0	0.5	6.6	47	28	9	13	0	3
OUTV03255	35.8	3.0	3.5	20.3	83	0	0	15	0	1
OUTV03256	7.8	3.9	5.6	6.5	96	0	0	3	0	1
OUTV03323	38.4	14.0	4.4	10.8	95	0	0	5	0	0
OUTV03352	26.0	12.9	6.4	11.8	63	0	0	36	0	1
OUTV03354	29.2	1.4	1.1	13.7	37	14	8	40	0	1

Numéro de station	Superficie (km ²)	Pente bassin versant (%)	Pente cours d'eau (%)	Longueur du cours d'eau (km)	Occupation (%)					
					Boisé	Culture	Pâturage	Urbain	Lac	Milieux humides
SLNO00027	26.5	15.0	7.7	12.0	92	0	1	5	0	1
SLNO00032	18.2	16.5	5.8	11.3	85	0	0	15	0	0
SLNO00036	13.3	20.7	8.5	7.2	99	0	0	1	0	0
SLNO00041	13.8	3.9	1.6	8.8	59	3	9	27	0	1
SLNO00719	25.0	10.2	7.4	11.0	88	0	0	8	0	4
SLNO00816	49.5	10.8	3.5	17.0	87	0	0	8	4	2
SLNO00817	12.0	8.6	8.8	7.9	94	0	0	4	1	1
SLSO00005	40.2	1.7	2.0	16.9	40	11	13	27	0	8
SLSO00007	32.7	1.4	0.4	9.6	44	14	14	19	0	10
SLSO00064	34.4	5.9	8.4	12.5	63	6	25	5	0	1
SLSO00340	5.4	5.3	3.6	4.1	59	2	9	29	0	1
SLSO00346	10.5	8.9	5.4	6.7	85	1	12	2	0	1
SLSO02209	6.4	7.9	11.0	6.0	53	9	31	6	0	0
SLSO02215	2.4	4.7	5.2	3.0	33	34	23	9	0	1
SLSO02472	7.1	4.1	2.6	4.7	57	6	18	18	0	1
SLSO02510	25.0	1.4	4.7	13.6	39	17	14	20	0	9
SLSO02511	4.6	2.0	0.8	5.4	17	0	7	73	0	3

Tableau F.3 - Caractéristiques physiographiques des bassins versants du Groupe D (Nouveau-Brunswick)

Numéro de station	Superficie (km ²)	Pente bassin versant (%)	Pente cours d'eau (%)	Longueur du cours d'eau (km)	Occupation (%)					
					Boisé	Culture	Pâturage	Urbain	Lac	Milieux humides
01AF009	182.5	12.3	2.6	34.2	97	1	0	1	0	0
01AK001	247.1	7.4	0.9	39.1	87	0	0	1	4	7
01AK007	242.9	5.7	2.2	36.3	90	3	0	2	0	5
01AL004	4.3	9.4	4.5	4.7	99	0	0	0	0	1
01AQ001	232.2	7.8	0.9	49.5	77	0	0	2	6	15
01BJ010	214.9	4.8	1.5	47.4	93	1	0	1	0	5
01BP002	26.1	6.0	2.0	13.1	96	0	0	1	1	2
01BU009	6.5	5.9	2.9	3.5	95	0	0	1		4
01BV004	42.3	9.5	3.1	15.2	83	0	0	9	3	5
01BV006	136.9	12.6	2.2	32.3	95	0	0	1	0	4

Tableau F.4 - Caractéristiques physiographiques des bassins versants du Groupe E (États-Unis ; Me : Maine; Ma : Massachussetts ; Vt : Vermont ; NY : New York)

Numéro de station	Superficie (km ²)	Pente bassin versant (%)	Pente cours d'eau (%)	Longueur du cours d'eau (km)	Occupation (%)					
					Boisé	Culture	Pâturage	Urbain	Lac	Milieux humides
Me_01021470	16.5	2.1	0.2	10.0	62	38	0	0	0	0
Me_01037380	38.6	4.5	0.7	14.7	79	1	5	3	4	8
Me_01063310	4.0	5.1	0.8	3.9	82	0	0	0	0	18
Vt_01135150	8.4	9.0	4.5	4.9	83	2	14	0	0	0
Vt_01139800	22.9	15.5	3.0	8.7	95	0	4	0	0	0
Vt_01142500	79.2	12.0	1.1	22.1	75	2	16	6	0	1
Ma_01162500	51.2	5.2	0.4	24.1	80	0	1	4	2	12
Ma_01169900	61.8	11.7	1.3	22.6	83	2	5	6	0	3
Ma_01174565	32.8	7.9	1.4	11.7	92	0	0	4	0	3
Ma_01175670	23.3	6.7	0.9	12.5	74	2	8	6	3	8
NY_01349700	91.5	11.2	0.9	26.5	89	1	1	8	1	1
NY_01349711	12.7	23.5	8.4	5.2	100	0	0	0	0	0
NY_01349810	69.6	19.0	2.0	18.8	95	1	1	4	0	0
NY_01350035	65.9	11.4	0.9	19.1	70	10	11	7	1	1
NY_01350080	84.1	8.9	1.2	15.8	77	12	3	8	0	2
NY_01350120	31.0	7.1	2.3	12.0	75	8	4	5	5	4
NY_01350140	42.1	8.6	2.3	13.6	84	5	4	5	1	2
NY_01360640	22.8	6.9	1.0	13.1	73	7	7	8	1	5
NY_01362497	43.1	12.2	0.5	15.2	93	1	1	2	1	2
NY_01363382	44.5	23.8	3.8	7.2	99	1	0	0	0	0
NY_01365000	100.0	18.2	2.1	20.9	98	0	1	1	0	0
NY_01365500	55.5	9.7	4.6	10.5	86	2	5	5	1	2
NY_01374559	28.7	8.4	0.3	9.6	76	1	0	9	5	10

Numéro de station	Superficie (km ²)	Pente bassin versant (%)	Pente cours d'eau (%)	Longueur du cours d'eau (km)	Occupation (%)					
					Boisé	Culture	Pâturage	Urbain	Lac	Milieux humides
NY_01413088	35.2	16.4	0.2	10.1	90	3	3	3	0	1
NY_01414000	90.1	15.0	1.2	20.4	83	6	5	5	0	0
NY_01415000	85.7	13.3	0.9	17.9	81	6	8	4	0	1
NY_01421618	37.4	12.8	1.8	9.3	67	11	18	3	0	0
NY_01434017	59.0	15.0	1.7	20.2	99	0	0	1	0	0
NY_01434025	9.6	17.2	4.6	5.2	100	0	0	0	0	0
NY_01434498	87.2	14.7	1.4	22.9	99	0	0	0	0	0
NY_01521500	78.6	7.3	1.1	21.1	83	9	7	1	0	1
NY_04237962	88.8	8.2	1.5	22.9	53	30	9	5	0	2
Vt_04288225	12.1	26.0	9.5	5.0	84	0	16	0	0	0
Vt_04288230	9.8	20.9	10.0	3.6	100	0	0	0	0	0
Vt_04294300	91.8	4.9	0.8	18.8	49	11	24	3	6	7

Tableau F.5 - Caractéristiques physiographiques des bassins versants du Groupe F (Ontario)

Numéro de station	Superficie (km ²)	Pente bassin versant (%)	Pente cours d'eau (%)	Longueur du cours d'eau (km)	Occupation (%)					
					Boisé	Culture	Pâturage	Urbain	Lac	Milieus humides
02AB020	76.2	4.4	0.4	31.7	77	1	1	4	1	17
02BF004	47.5	5.4	1.1	14.8	77	0	12	2	2	7
02BF005	10.4	11.9	2.4	8.2	88	0	0	0	11	1
02BF007	5.1	11.6	3.6	4.6	88	0	0	0	11	1
02BF008	3.5	12.3	4.0	3.7	89	0	0	0	9	2
02BF009	2.1	12.1	3.8	2.1	92	0	0	0	6	3
02BF012	0.9	11.7	7.8	1.0	84	0	0	0	13	3
02BF013	0.5	9.4	4.1	1.1	91	0	0	0	9	0
02DB007	69.4	5.1	0.3	18.8	82	0	1	6	1	10
02DD013	63.9	2.7	0.2	24.1	74	0	8	0	2	16
02EC010	41.2	3.9	0.5	14.0	20	25	43	6	1	6
02ED017	57.0	3.4	0.3	24.7	37	17	31	3	0	13
02ED100	75.4	3.8	0.4	17.7	21	28	36	10	0	5
02FD002	65.8	2.2	0.2	24.1	11	32	34	3	0	21
02FE014	76.5	2.2	0.2	21.1	13	69	9	4	0	6
02GA031	39.4	2.8	0.7	14.3	34	12	34	2	0	17
02GA041	66.5	0.9	0.2	14.2	4	29	37	2	0	28
02GA044	2.2	1.5	1.1	2.7	14	67	11	0	0	9
02GA045	4.8	2.8	1.3	4.1	12	71	10	0	0	8
02GA046	2.1	2.2	1.2	2.5	7	83	8	0	0	2
02HB020	36.3	3.7	0.4	16.7	18	32	33	5	0	12
02HC019	90.4	4.5	1.2	25.8	37	16	36	6	1	5
02HC023	60.2	4.3	0.6	16.3	19	20	49	6	1	5
02HC038	65.2	3.1	0.7	20.9	22	32	35	4	1	6
02HD003	66.0	4.9	0.8	23.8	52	12	26	3	0	7

Numéro de station	Superficie (km ²)	Pente bassin versant (%)	Pente cours d'eau (%)	Longueur du cours d'eau (km)	Occupation (%)					
					Boisé	Culture	Pâturage	Urbain	Lac	Milieux humides
02HD004	47.4	5.0	1.2	15.2	60	12	19	2	0	8
02HD018	14.7	5.2	1.4	6.1	21	33	25	5	1	16
02HH003	25.8	3.8	0.6	13.0	46	8	31	2	0	12
02HJ005	11.6	5.2	0.9	6.0	43	36	18	0	0	3
02HK009	79.4	5.2	0.4	22.2	46	12	26	3	0	14
02HK011	34.0	4.6	0.8	10.1	45	13	15	0	1	25
02MC028	88.0	1.7	0.1	33.0	35	13	15	2	0	35

Tableau F.6 - Caractéristiques physiographiques des bassins versants du Groupe G (Ontario et États-Unis, Me : Maine; Ma : Massachussetts ; Vt : Vermont ; NY : New York)

Numéro de station	Superficie (km ²)	Pente bassin versant (%)	Pente cours d'eau (%)	Longueur du cours d'eau (km)	Occupation (%)					
					Boisé	Culture	Pâturage	Urbain	Lac	Milieux humides
02AB019	45.6	4.6	2.2	20.3	76	0	1	22	0	0
02DD014	35.6	4.3	2.4	15.7	56	0	0	41	0	1
02EC009	176.0	4.0	1.6	37.0	21	10	14	52	1	2
02GA030	36.7	3.3	0.4	11.2	13	56	16	11	0	4
02GE005	148.6	1.9	2.0	37.8	10	45	12	31	0	1
02HB012	79.9	1.9	0.7	26.9	18	26	24	14	0	15
02GH011	55.3	0.3	0.3	13.0	1	53	3	43	0	0
02HB021	7.4	2.2	1.4	5.8	11	17	6	65	0	0
02HC009	190.9	4.0	2.3	43.5	24	23	21	29	1	2
02HC013	89.1	2.6	4.0	21.2	2	0	1	97	0	0
02HC018	100.3	4.0	2.9	28.5	23	22	25	27	0	3
02HC028	77.0	2.0	0.4	24.4	9	39	28	17	1	6
02HC030	205.0	1.7	1.5	45.3	4	16	9	70	0	0
02HC031	142.2	1.8	1.4	24.7	9	39	27	24	0	0
02HC033	67.8	1.8	2.2	27.8	1	1	1	96	0	0
02HM009	6.9	2.1	2.0	6.0	7	0	3	88	0	2
02KF015	22.0	1.6	2.3	10.7	25	17	7	48	0	3
02MB010	52.9	1.7	1.7	16.3	38	10	13	27	3	9
Ma_01109070	29.1	2.6	0.2	11.6	64	1	2	17	2	13
Me_01073000	31.3	4.8	0.4	14.8	71	1	3	12	2	11
NY_01374598	9.3	7.4	1.2	6.1	76	3	0	14	3	4
NY_01374890	44.4	7.4	0.8	16.4	71	2	0	13	5	9
NY_01421610	40.6	8.8	1.3	14.4	58	12	17	11	1	2

ANNEXE G. STATION MÉTÉOROLOGIQUES ASSOCIÉE AUX BASSINS VERSANTS À L'ÉTUDE

Tableau G.1 - Station météorologique associée aux bassins versants des Groupes A, B et C et valeurs des paramètres *a* et *b* pour l'estimation de l'intensité des précipitations pour les périodes de retour 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100 et 350 ans.

Station hydrométrique	Station météorologique		Coordonnée géographique		Distance entre station (km)	Paramètre	Période de retour							
	Numéro	Nom	Lat.	Long.			2	5	10	20	25	50	100	350
030425	7022579	Frelighsburg	45.33	-72.85	12.2	a	22.20	26.70	29.60	32.16	33.20	35.90	38.60	44.01
						b	-0.69	-0.67	-0.66	-0.65	-0.65	-0.64	-0.64	-0.64
030426	7027725	Saint-Sébastien	45.77	-70.95	5.8	a	20.90	26.30	29.90	33.09	34.40	37.70	41.00	47.66
MONT00930					16.5	b	-0.68	-0.70	-0.70	-0.71	-0.71	-0.71	-0.71	-0.71
MONT00974					8.6									
040212	7017100	Saint-Donat	46.32	-74.20	24.2	a	19.00	24.50	28.20	31.51	32.80	36.30	39.70	46.53
						b	-0.66	-0.68	-0.68	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69
040409	7031375	Cheneville	45.90	-75.83	5.1	a	19.20	25.20	29.20	32.76	34.20	37.90	41.60	48.99
						b	-0.67	-0.66	-0.66	-0.66	-0.66	-0.66	-0.66	-0.66
050812	7016900	Saint-Augustin	46.73	-71.50	14.9	a	19.80	25.70	29.60	33.14	34.60	38.20	41.80	49.10
						b	-0.65	-0.67	-0.67	-0.68	-0.68	-0.68	-0.68	-0.68
050813	7012240	Duchesnay	46.87	-71.65	11.1	a	20.50	26.60	30.60	34.13	35.60	39.30	42.90	50.37
						b	-0.67	-0.70	-0.71	-0.72	-0.72	-0.73	-0.73	-0.73
051002	7042395	Forêt Montmorency RCS	47.28	-71.15	5.8	a	20.20	25.70	29.30	32.55	33.90	37.20	40.60	47.32
051003					5.9									
051004					3.8	b	-0.64	-0.65	-0.65	-0.65	-0.65	-0.65	-0.65	-0.65
Lac Laflamme					1.7									
052228	7016902	Sainte-Béatrix	46.20	-73.60	16.2	a	19.80	25.70	29.70	33.17	34.60	38.20	41.90	49.17
SLNO00719					27.0	b	-0.63	-0.63	-0.63	-0.63	-0.63	-0.63	-0.63	-0.63
120201	7041177	Cap Tourmente	47.67	-70.78	12.4	a	16.80	21.80	25.20	28.18	29.40	32.50	35.60	41.82
						b	-0.64	-0.64	-0.63	-0.63	-0.63	-0.63	-0.63	-0.63
Lac Tirassee	7091299	Chapais	49.82	-74.98	108.7	a	17.80	23.20	26.70	29.91	31.20	34.50	37.80	44.40
						b	-0.69	-0.70	-0.71	-0.71	-0.71	-0.72	-0.72	-0.72
Lac Croche	7025745	ORMSTOWN	45.12	-74.50	16.3	a	19.70	25.70	29.70	33.32	34.80	38.50	42.20	49.65
MONT01351					5.3	b	-0.69	-0.68	-0.67	-0.67	-0.67	-0.66	-0.66	-0.66
MONT01462					5.6									
MONT00138	7028124	Sherbrooke A	45.43	-71.68	48.1	a	20.40	26.60	30.60	34.20	35.70	39.40	43.10	50.63
MONT00139					48.6	b	-0.69	-0.67	-0.66	-0.65	-0.65	-0.65	-0.64	-0.64
MONT00141					48.1									
MONT00289	7022800	Granby	45.38	-72.72	3.3	a	22.40	28.70	32.90	36.62	38.10	42.00	45.90	53.64
MONT00290					5.8									
MONT00292					2.5									
MONT00293					1.5	b	-0.68	-0.67	-0.67	-0.67	-0.67	-0.67	-0.67	-0.67
MONT00294					2.0									
MONT00297					1.5									
MONT00531	7027517	Sainte-Madeleine	45.62	-73.13	11.6	a	19.10	25.50	29.80	33.54	35.10	39.00	42.90	50.79

Station hydrométrique	Station météorologique		Coordonnée géographique		Distance entre station (km)	Paramètre	Période de retour															
	Numéro	Nom	Lat.	Long.			2	5	10	20	25	50	100	350								
MONT01284					10.2	b	-0.65	-0.68	-0.69	-0.71	-0.71	-0.71	-0.72	-0.72								
MONT00660	7020840	Brome	45.18	-72.57	8.6	a	20.30	27.50	32.20	36.41	38.10	42.50	46.90	55.66								
MONT00666					8.3																	
MONT00667					7.8																	
MONT00672					9.1	b									-0.65	-0.66	-0.67	-0.67	-0.67	-0.68	-0.68	-0.68
MONT00673					10.0																	
OUTV03255	7037400	Saint-Jérôme	45.80	-74.50	11.6	a	18.70	25.60	30.10	34.22	35.90	40.10	44.30	52.77								
OUTV03256					13.5																	
OUTV03352					13.0																	
OUTV03354					8.1	b									-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7
SLNO00816					24.6																	
SLNO00817					20.9																	
OUTV03323	7036762	Sainte-Agathe des Monts	46.05	-74.28	7.4	a	20.10	26.20	30.30	33.95	35.40	39.20	43.00	50.54								
						b	-0.67	-0.68	-0.68	-0.68	-0.68	-0.69	-0.69	-0.69								
SLNO00027	7011309	CHARLESBOURG Parc Orléans	46.87	-71.27	19.2	a	20.80	26.50	30.20	33.53	34.90	38.30	41.80	48.72								
SLNO00032					19.8	b	-0.66	-0.68	-0.68	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69								
SLNO00036					16.7																	
SLNO00041	701S001	Québec Jean-Lesage INTL	46.80	-71.38	4.3	a	20.30	26.50	30.50	34.14	35.60	39.40	43.10	50.66								
						b	-0.67	-0.67	-0.68	-0.68	-0.68	-0.68	-0.68	-0.68								
SLSO00005	7017BFN	STE-FOY (PIE XII)	46.78	-71.32	12.4	a	19.5	25.4	29.3	32.8	34.2	37.9	41.5	48.8								
SLSO00007					13.6	b	-0.67	-0.68	-0.69	-0.69	-0.69	-0.70	-0.70	-0.70								
SLSO00064	7028676	VALLEE Jonction	46.38	-70.93	5.7	a	19.9	26.2	30.4	34.1	35.6	39.5	43.3	51.1								
						b	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.7								
SLSO00340	7023677	Lac Megantic 2	45.60	-70.87	2.2	a	19.50	25.40	29.30	32.82	34.20	37.90	41.50	48.77								
SLSO00346					13.4	b	-0.63	-0.64	-0.65	-0.65	-0.65	-0.66	-0.66	-0.66								
SLSO02209	7027120	Saint-Edwidge	45.20	-71.68	9.0	a	19.90	26.20	30.40	34.10	35.60	39.50	43.30	51.06								
SLSO02215					11.6	b	-0.68	-0.70	-0.71	-0.72	-0.72	-0.72	-0.73	-0.73								
SLSO02472	7057287	Sainte-Germaine	46.42	-70.47	4.3	a	16.30	21.70	25.20	28.41	29.70	33.00	36.30	42.90								
SLSO02510	7024254	Lauzon	46.82	-72.00	13.7	a	18.50	24.00	27.60	30.90	32.20	35.60	39.00	45.75								
SLSO02511					13.0	b	-0.62	-0.63	-0.64	-0.64	-0.64	-0.65	-0.65	-0.65								

Tableau G.2 - Station météorologique associée aux bassins versants du Groupe D et valeurs des paramètres *a* et *b* pour l'estimation de l'intensité des précipitations pour les périodes de retour 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100 et 350 ans.

Station de jaugeage	Station météorologique		Coordonnée géographique		Distance entre station (km)	Paramètre	Période de retour							
	Numéro	Nom	Lat.	Long.			2	5	10	20	25	50	100	350
01AF009	8101303	Edmundston	47.42	-68.32	5.2	a	22.40	29.30	33.80	37.86	39.50	43.70	47.90	56.32
						b	-0.65	-0.64	-0.64	-0.64	-0.64	-0.64	-0.63	-0.63
01AK001	8104482	Royal road west	46.08	-66.73	47.9	a	18.00	22.70	25.80	28.59	29.70	32.60	35.50	41.26
01AK007					39.3									
01AL004					30.9	b	-0.62	-0.63	-0.64	-0.64	-0.64	-0.64	-0.65	-0.65
01AK006	8104480	Royal road	46.07	-66.72	3.9	a	18.50	25.20	29.70	33.68	35.30	39.40	43.60	51.86
						b	-0.63	-0.65	-0.66	-0.67	-0.67	-0.68	-0.68	-0.68
01AQ001	8104900	Saint-John A	45.32	-65.88	32.3	a	21.00	27.70	32.10	36.12	37.70	41.90	46.00	54.25
01BV004					3.1	b	-0.55	-0.55	-0.56	-0.56	-0.56	-0.56	-0.56	-0.56
01BJ010	8100514	Belledune	47.90	-65.83	33.4	a	14.10	19.30	22.70	25.68	26.90	30.00	33.20	39.47
						b	-0.62	-0.65	-0.67	-0.68	-0.68	-0.69	-0.69	-0.69
01BJ012	8100885	Charlo auto	47.98	-66.33	11.6	a	15.70	21.30	25.00	28.30	29.60	33.10	36.50	43.37
						b	-0.61	-0.61	-0.61	-0.61	-0.61	-0.61	-0.61	-0.61
01BL002	8100467	Bas Caraquet	47.82	-64.85	24.0	a	19.30	25.70	29.90	33.77	35.30	39.30	43.20	51.11
						b	-0.65	-0.65	-0.66	-0.66	-0.66	-0.66	-0.66	-0.66
01BP002	8100989	Miramichi RCS	47.02	-65.47	57.6	a	18.50	25.30	29.80	33.85	35.50	39.70	43.80	52.21
						b	-0.63	-0.64	-0.65	-0.66	-0.66	-0.66	-0.66	-0.66
01BS001	8100593	Bouctouche CDA CS	46.43	-64.77	22.8	a	18.60	25.90	30.80	35.09	36.80	41.40	45.80	54.82
						b	-0.59	-0.62	-0.63	-0.64	-0.64	-0.64	-0.65	-0.65
01BU003	8103201	Moncton INTL A	46.12	-64.68	22.9	a	18.00	24.70	29.20	33.26	34.90	39.10	43.20	51.56
01BU009					43.9									
01BV006					66.9	b	-0.59	-0.61	-0.61	-0.62	-0.62	-0.62	-0.62	-0.62

Tableau G.3 - Valeur des paramètres a et b (échelle logarithmique) des bassins versants des Groupes E et G pour l'estimation de l'intensité des précipitations pour les périodes de retour 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100 et 350 ans.

Station hydrométrique	Paramètre	Période de retour (années)							
		2	5	10	20	25	50	100	350
Me_01021470	a	-0.64	-0.64	-0.64	-0.64	-0.64	-0.64	-0.64	-0.64
	b	3.23	3.43	3.57	3.69	3.74	3.85	3.96	4.05
Me_01037380	a	-0.64	-0.65	-0.65	-0.65	-0.66	-0.66	-0.66	-0.66
	b	3.25	3.50	3.68	3.81	3.87	4.00	4.12	4.24
Me_01063310	a	-0.65	-0.65	-0.65	-0.65	-0.64	-0.64	-0.64	-0.64
	b	3.27	3.51	3.68	3.81	3.87	3.99	4.10	4.22
Me_01073000	a	-0.70	-0.70	-0.70	-0.70	-0.70	-0.70	-0.70	-0.70
	b	3.18	3.39	3.54	3.65	3.70	3.82	3.92	4.03
Ma_01109070	a	-0.68	-0.69	-0.70	-0.70	-0.70	-0.71	-0.71	-0.72
	b	3.41	3.70	3.90	4.05	4.11	4.25	4.37	4.51
Vt_01135150	a	-0.73	-0.72	-0.71	-0.71	-0.71	-0.71	-0.70	-0.70
	b	3.24	3.44	3.59	3.71	3.76	3.88	3.98	4.08
Vt_01139800	a	-0.70	-0.71	-0.71	-0.71	-0.71	-0.71	-0.71	-0.71
	b	3.23	3.48	3.64	3.77	3.83	3.96	4.07	4.19
Vt_01142500	a	-0.70	-0.70	-0.70	-0.71	-0.71	-0.71	-0.71	-0.70
	b	3.23	3.46	3.62	3.75	3.81	3.93	4.04	4.14
Ma_01162500	a	-0.71	-0.70	-0.70	-0.70	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69
	b	3.34	3.58	3.74	3.86	3.92	4.04	4.15	4.26
Ma_01169900	a	-0.70	-0.68	-0.68	-0.67	-0.67	-0.67	-0.66	-0.65
	b	3.37	3.58	3.72	3.84	3.89	4.01	4.11	4.21
Ma_01174565	a	-0.70	-0.68	-0.67	-0.66	-0.66	-0.66	-0.65	-0.64
	b	3.38	3.59	3.73	3.85	3.90	4.02	4.12	4.23
Ma_01175670	a	-0.70	-0.68	-0.67	-0.67	-0.67	-0.66	-0.66	-0.65
	b	3.39	3.61	3.75	3.87	3.93	4.04	4.15	4.26
NY_01349700	a	-0.68	-0.67	-0.67	-0.67	-0.67	-0.67	-0.66	-0.66
	b	3.34	3.59	3.75	3.88	3.94	4.06	4.18	4.30
NY_01349711	a	-0.62	-0.61	-0.61	-0.61	-0.61	-0.61	-0.60	-0.60
	b	3.47	3.72	3.89	4.02	4.08	4.20	4.32	4.44
NY_01349810	a	-0.68	-0.67	-0.67	-0.67	-0.67	-0.67	-0.66	-0.66
	b	3.32	3.57	3.73	3.86	3.92	4.04	4.16	4.29
NY_01350035	a	-0.68	-0.68	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69
	b	3.24	3.50	3.68	3.82	3.88	4.01	4.13	4.28
NY_01350080	a	-0.68	-0.68	-0.68	-0.68	-0.68	-0.68	-0.68	-0.69
	b	3.26	3.53	3.70	3.84	3.90	4.03	4.15	4.30
NY_01350120	a	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69
	b	3.23	3.50	3.67	3.81	3.88	4.00	4.13	4.28
NY_01350140	a	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69
	b	3.23	3.49	3.67	3.81	3.87	3.99	4.11	4.26
NY_01360640	a	-0.72	-0.71	-0.71	-0.71	-0.71	-0.71	-0.71	-0.71
	b	3.34	3.58	3.75	3.88	3.94	4.06	4.18	4.29
NY_01362497	a	-0.65	-0.64	-0.64	-0.64	-0.64	-0.64	-0.64	-0.64

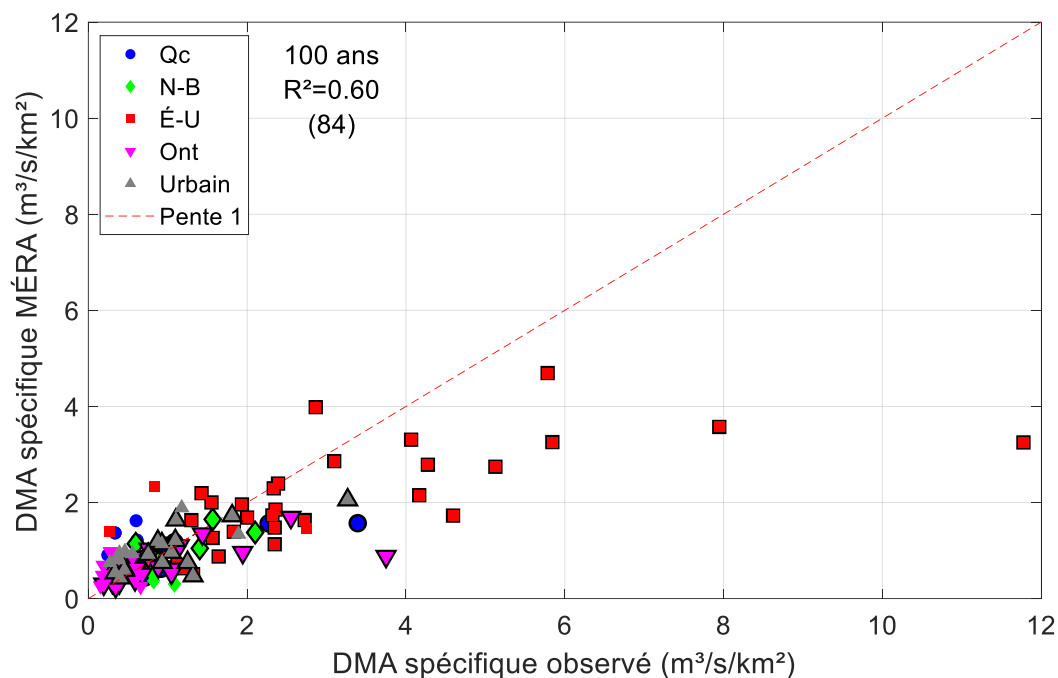
Station hydrométrique	Paramètre	Période de retour (années)							
		2	5	10	20	25	50	100	350
	b	3.46	3.72	3.89	4.03	4.09	4.21	4.34	4.47
NY_01363382	a	-0.64	-0.63	-0.62	-0.62	-0.62	-0.62	-0.62	-0.61
	b	3.46	3.71	3.88	4.01	4.07	4.20	4.31	4.44
NY_01365000	a	-0.67	-0.68	-0.68	-0.68	-0.68	-0.69	-0.69	-0.69
	b	3.41	3.67	3.85	3.99	4.06	4.18	4.30	4.43
NY_01365500	a	-0.68	-0.69	-0.69	-0.70	-0.70	-0.70	-0.70	-0.70
	b	3.39	3.67	3.85	3.99	4.05	4.18	4.30	4.44
NY_01374559	a	-0.69	-0.67	-0.66	-0.65	-0.65	-0.64	-0.64	-0.63
	b	3.51	3.71	3.85	3.96	4.02	4.12	4.22	4.32
NY_01374598	a	-0.69	-0.67	-0.66	-0.65	-0.65	-0.64	-0.64	-0.63
	b	3.51	3.71	3.84	3.95	4.00	4.11	4.21	4.31
NY_01374890	a	-0.70	-0.69	-0.68	-0.67	-0.67	-0.66	-0.66	-0.65
	b	3.52	3.73	3.86	3.98	4.03	4.14	4.24	4.34
NY_01413088	a	-0.68	-0.68	-0.68	-0.68	-0.68	-0.69	-0.69	-0.69
	b	3.28	3.55	3.74	3.88	3.95	4.08	4.20	4.34
NY_01414000	a	-0.69	-0.70	-0.71	-0.71	-0.71	-0.71	-0.72	-0.72
	b	3.25	3.53	3.72	3.86	3.92	4.06	4.18	4.32
NY_01414500	a	-0.69	-0.70	-0.71	-0.71	-0.71	-0.71	-0.72	-0.72
	b	3.26	3.55	3.73	3.88	3.94	4.07	4.20	4.33
NY_01415000	a	-0.69	-0.70	-0.70	-0.71	-0.71	-0.71	-0.71	-0.71
	b	3.28	3.57	3.75	3.90	3.97	4.10	4.22	4.36
NY_01421610	a	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69
	b	3.25	3.50	3.67	3.81	3.87	3.99	4.11	4.24
NY_01421618	a	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69	-0.69
	b	3.26	3.51	3.69	3.82	3.88	4.00	4.12	4.26
NY_01434017	a	-0.66	-0.67	-0.67	-0.67	-0.67	-0.67	-0.67	-0.67
	b	3.43	3.70	3.88	4.02	4.08	4.20	4.32	4.45
NY_01434025	a	-0.64	-0.65	-0.65	-0.65	-0.65	-0.65	-0.65	-0.65
	b	3.40	3.67	3.85	3.99	4.05	4.18	4.30	4.43
NY_01434498	a	-0.67	-0.67	-0.68	-0.68	-0.68	-0.68	-0.68	-0.68
	b	3.44	3.70	3.88	4.01	4.07	4.20	4.32	4.45
NY_01521500	a	-0.74	-0.74	-0.74	-0.74	-0.74	-0.74	-0.74	-0.73
	b	3.25	3.49	3.65	3.78	3.84	3.96	4.07	4.18
NY_04233286	a	-0.73	-0.73	-0.72	-0.72	-0.72	-0.72	-0.72	-0.71
	b	3.29	3.52	3.68	3.81	3.87	3.98	4.10	4.22
NY_04237962	a	-0.73	-0.74	-0.74	-0.74	-0.74	-0.75	-0.75	-0.75
	b	3.24	3.49	3.65	3.78	3.84	3.96	4.08	4.20
Vt_04288225	a	-0.70	-0.69	-0.68	-0.68	-0.68	-0.68	-0.67	-0.66
	b	3.32	3.53	3.67	3.79	3.85	3.96	4.06	4.16
Vt_04288230	a	-0.70	-0.69	-0.68	-0.67	-0.67	-0.67	-0.66	-0.65
	b	3.32	3.53	3.68	3.79	3.85	3.96	4.07	4.16
Vt_04294300	a	-0.73	-0.74	-0.74	-0.74	-0.74	-0.74	-0.74	-0.74
	b	3.24	3.45	3.60	3.72	3.77	3.89	3.99	4.09

Tableau G.4 - Valeur des paramètres a des bassins versants des Groupes F et G pour l'estimation de l'intensité des précipitations pour les périodes de retour 2, 5, 10, 20, 25, 50, 100 et 350 ans. La valeur du paramètre b est de -0.699.

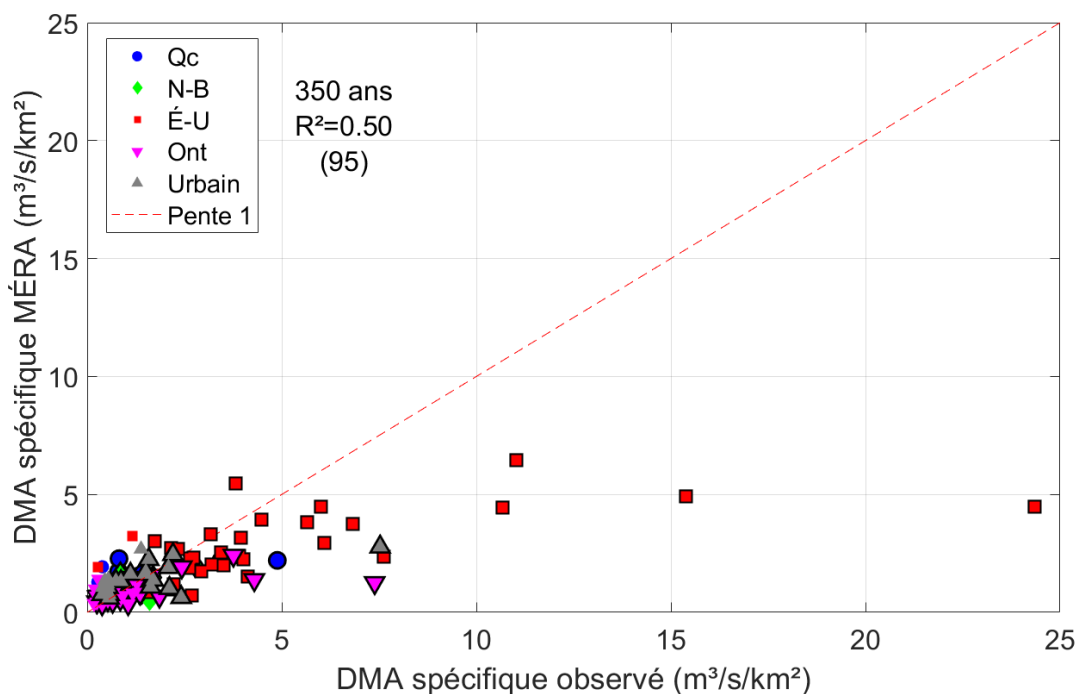
Station hydrométrique	Période de retour (années)							
	2	5	10	20	25	50	100	350
02AB019	20.5	27.5	32.1	36.2	37.9	42.2	46.4	55.0
02AB020	21.0	28.2	32.9	36.9	38.9	43.3	47.7	56.5
02BF004	21.3	28.5	33.2	37.1	39.1	43.5	47.9	56.6
02BF005	21.0	28.2	32.8	36.7	38.7	43.0	47.4	55.9
02BF007	21.3	28.5	33.3	37.2	39.2	43.7	48.0	57.0
02BF008	21.4	28.6	33.3	37.3	39.3	43.7	48.1	55.9
02BF009	21.4	28.6	33.4	37.4	39.4	43.9	48.3	57.1
02BF012	21.4	28.6	33.4	37.4	39.4	43.8	48.2	57.0
02BF013	21.3	28.5	33.2	37.2	39.2	43.6	47.9	56.7
02DB007	20.7	27.7	32.3	36.2	38.1	42.4	46.6	55.2
02DD013	20.9	27.8	32.4	36.3	38.2	42.5	46.7	55.2
02DD014	20.9	27.9	32.5	36.6	38.2	42.5	46.7	55.2
02EC009	21.9	29.1	33.8	38.0	39.7	44.1	48.4	57.2
02EC010	21.8	28.8	33.4	37.1	39.0	43.6	47.8	56.3
02ED017	21.2	28.2	32.9	36.8	38.7	43.1	47.4	56.0
02ED100	21.8	28.8	33.4	37.33	39.3	43.6	47.9	56.5
02FC017	23.3	30.9	35.9	40.1	42.2	46.9	51.5	60.8
02FD002	22.8	30.3	35.3	39.4	41.5	46.1	50.7	59.9
02FE014	23.1	30.7	35.6	39.8	41.9	46.5	51.1	60.3
02GA030	23.3	30.7	35.6	39.7	41.8	46.3	50.9	59.9
02GA031	23.1	30.4	35.3	39.4	41.5	46.0	50.5	59.5
02GA041	23.1	30.6	35.5	39.7	41.8	46.4	50.9	60.8
02GA044	23.4	30.9	35.8	39.9	42.0	46.6	51.1	60.2
02GA045	23.4	30.9	35.8	39.9	42.0	46.6	51.1	60.2
02GA046	23.4	30.9	35.8	39.9	42.0	46.6	51.1	60.2
02GE005	23.6	31.1	36.1	40.6	42.4	47.0	51.6	60.9
02GD019	23.5	31.0	36.0	40.2	42.3	46.9	51.5	60.7
02GD026	23.5	31.0	35.9	40.1	42.2	46.8	51.4	60.6
02GH011	24.0	31.7	36.7	41.3	43.1	47.8	52.5	61.9
02HA014	21.7	28.7	33.3	37.4	39.1	43.4	47.7	56.3
02HB012	21.6	28.4	32.9	36.6	38.5	42.7	46.8	55.1
02HB020	22.9	30.2	35.0	39.7	41.1	45.6	50.0	58.9
02HB021	22.7	29.9	34.7	39.0	40.7	45.2	49.6	58.5
02HC009	22.0	28.9	33.5	37.7	39.3	43.7	47.9	56.5
02HC013	21.5	28.3	32.8	36.8	38.5	42.7	46.8	55.2
02HC018	21.6	28.4	33.0	37.0	38.7	42.9	47.1	55.5
02HC019	21.4	28.2	32.7	36.43	38.3	42.5	46.6	54.9
02HC023	22.1	29.1	33.7	37.63	39.6	43.9	48.2	56.8
02HC028	22.0	29.0	33.7	37.6	39.5	43.8	48.1	56.7
02HC030	23.5	31.0	35.9	40.3	42.1	46.7	51.3	60.5

Station hydrométrique	Période de retour (années)							
	2	5	10	20	25	50	100	350
02HC031	21.7	28.6	33.1	37.2	38.9	43.1	47.3	55.8
02HC033	21.7	28.5	33.0	37.1	38.8	43.0	47.2	55.6
02HC038	22.0	29.0	33.7	37.6	39.5	43.8	48.1	56.7
02HD003	21.5	28.3	32.9	36.7	38.6	42.8	47.0	55.4
02HD004	21.5	28.4	32.9	36.7	38.6	42.8	47.0	55.4
02HD010	21.4	28.2	32.7	36.5	38.4	42.6	46.7	55.5
02HD018	21.1	27.9	32.4	36.1	38.0	42.2	46.3	54.6
02HH003	22.1	29.4	34.1	38.2	40.2	44.6	49.1	57.9
02HJ005	21.3	28.2	32.7	36.5	38.4	42.6	46.8	55.2
02HK008	21.2	28.2	32.7	36.6	38.5	42.7	46.9	55.4
02HK009	21.0	27.8	32.2	36.0	37.9	42.1	46.2	54.5
02HK011	20.8	27.5	32.0	35.7	37.5	41.7	45.8	54.0
02HM009	20.8	27.6	32.1	36.1	37.8	42.0	46.1	54.5
02KF015	19.9	26.5	30.8	34.6	36.2	40.2	44.2	52.2
02MB010	20.4	27.1	31.5	35.5	37.1	41.2	45.3	53.5
02MC028	19.9	26.5	30.8	34.5	36.3	40.3	44.3	52.3

ANNEXE H. FIGURES DU CHAPITRE 7 POUR LES PÉRIODES DE RETOUR 5, 10, 25 ET 50 ANS

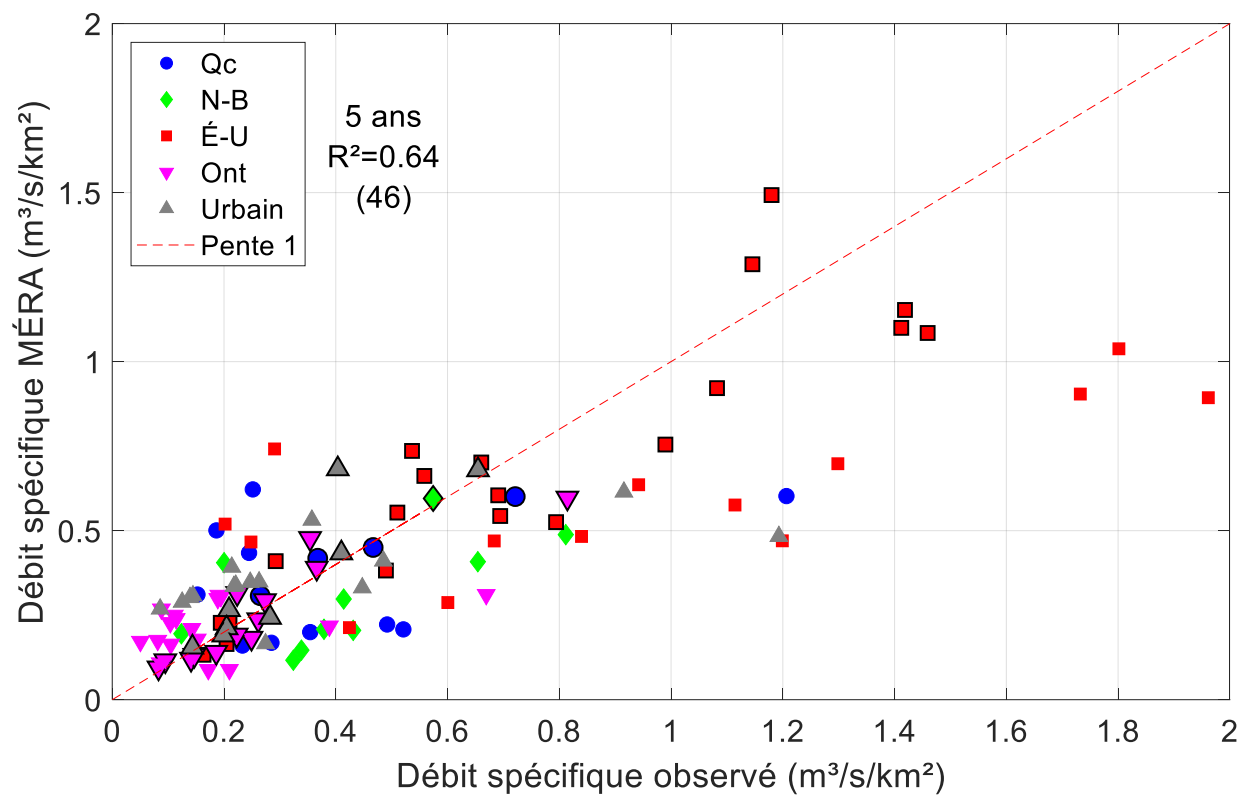


(a)

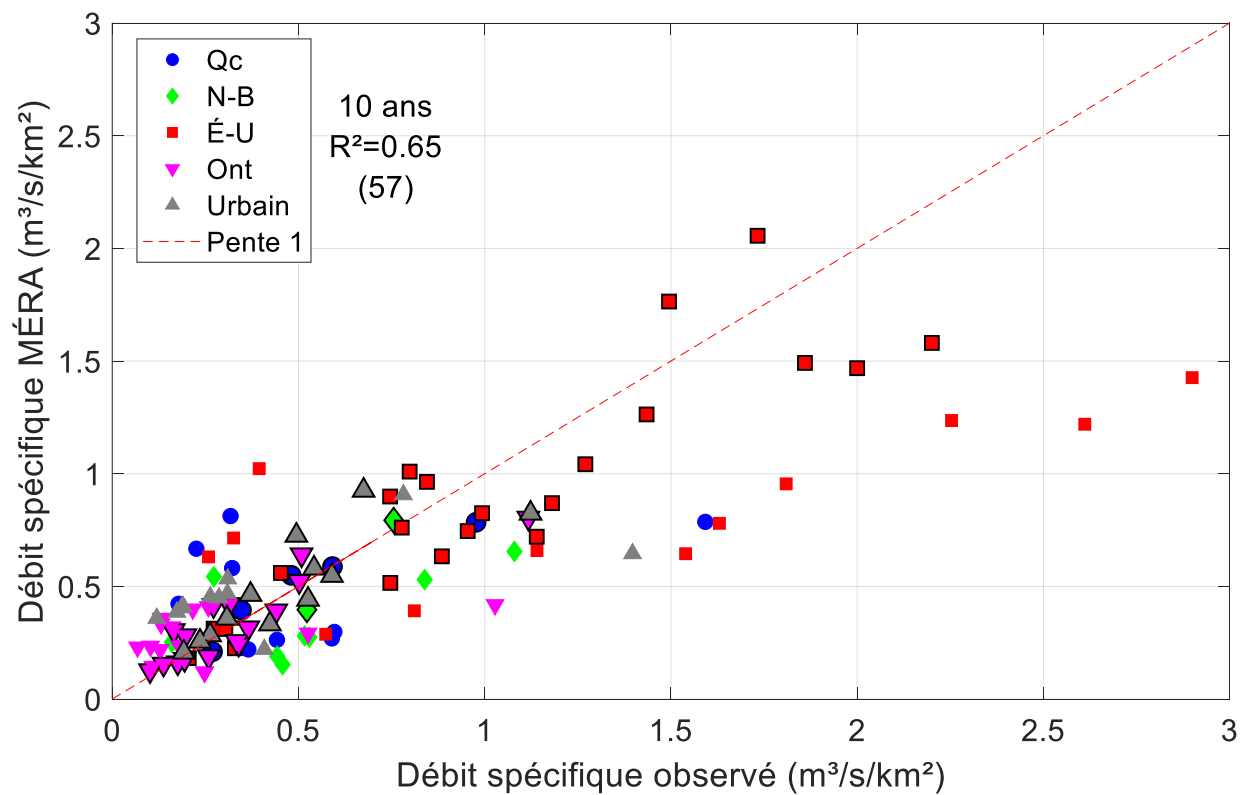


(b)

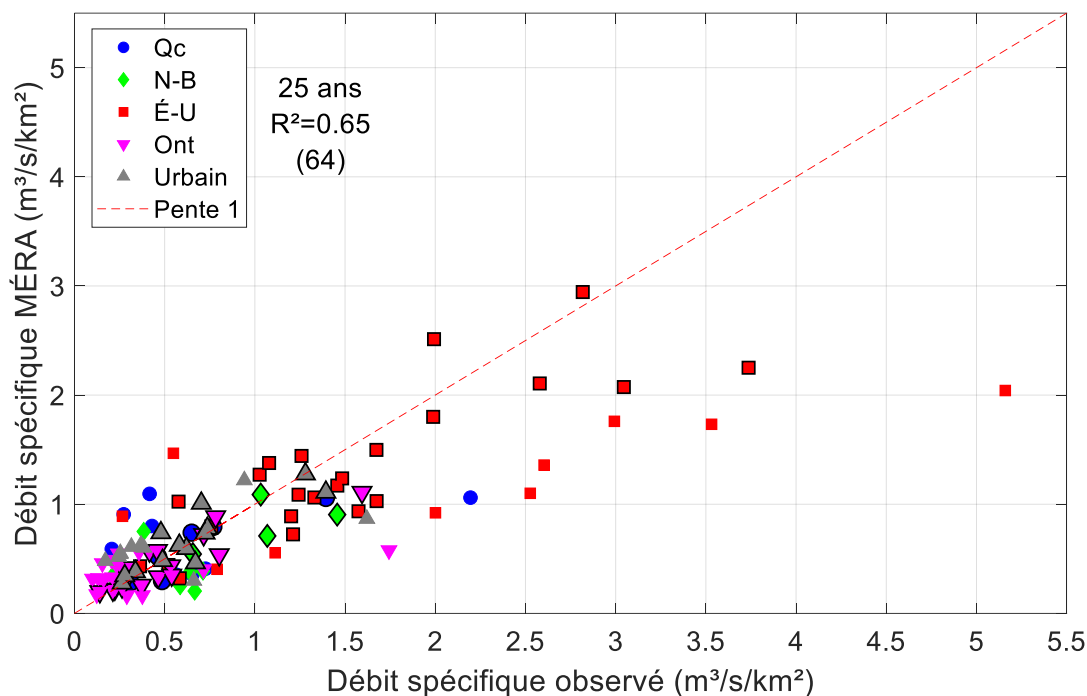
Figure H.1 - Comparaison des DMA spécifiques observés et estimés avec la MERA après application des facteurs de corrections (Tableau 7.1) pour les BV du Québec (Qc, Groupes A et B), du Nouveau-Brunswick (N-B, Groupe D), des États-Unis (É-U, Groupe E), de l'Ontario (Ont, Groupe F) et les BV urbains (Groupe G) pour les PdR : a) 100 ans, b) 350 ans. Les marqueurs entourés d'un trait noir indiquent que le débit MERA est à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95 % du quantile de débit observé



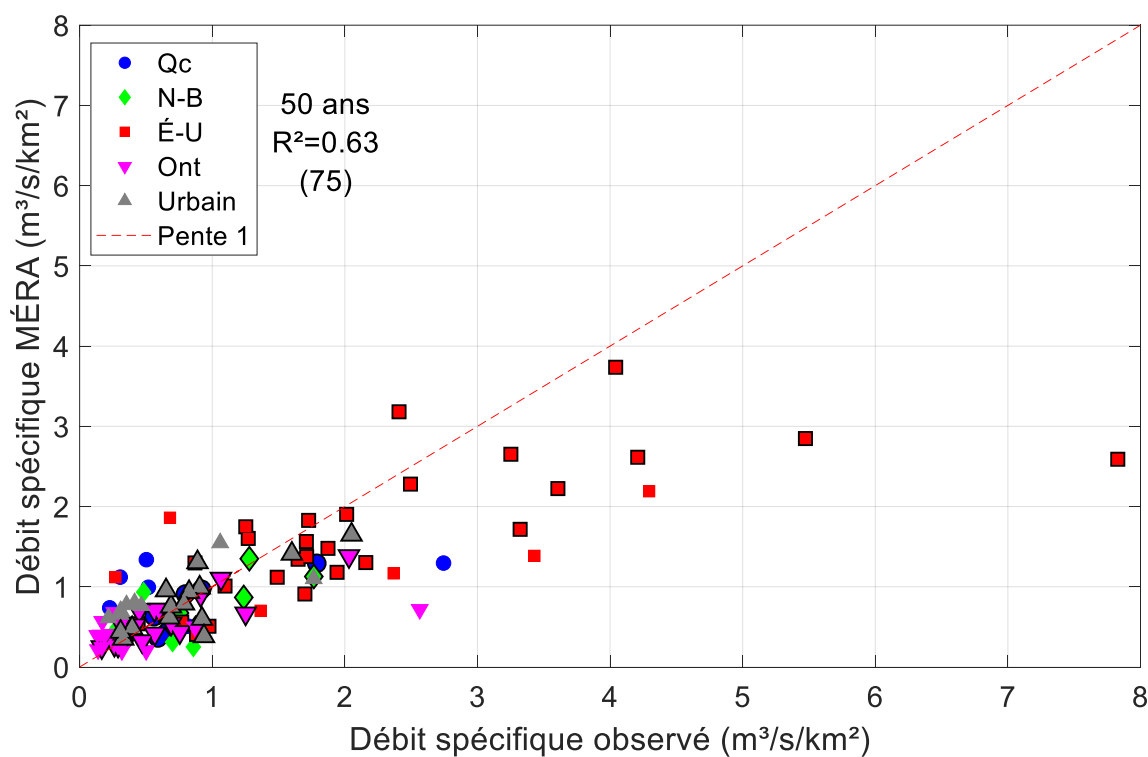
(a)



(b)

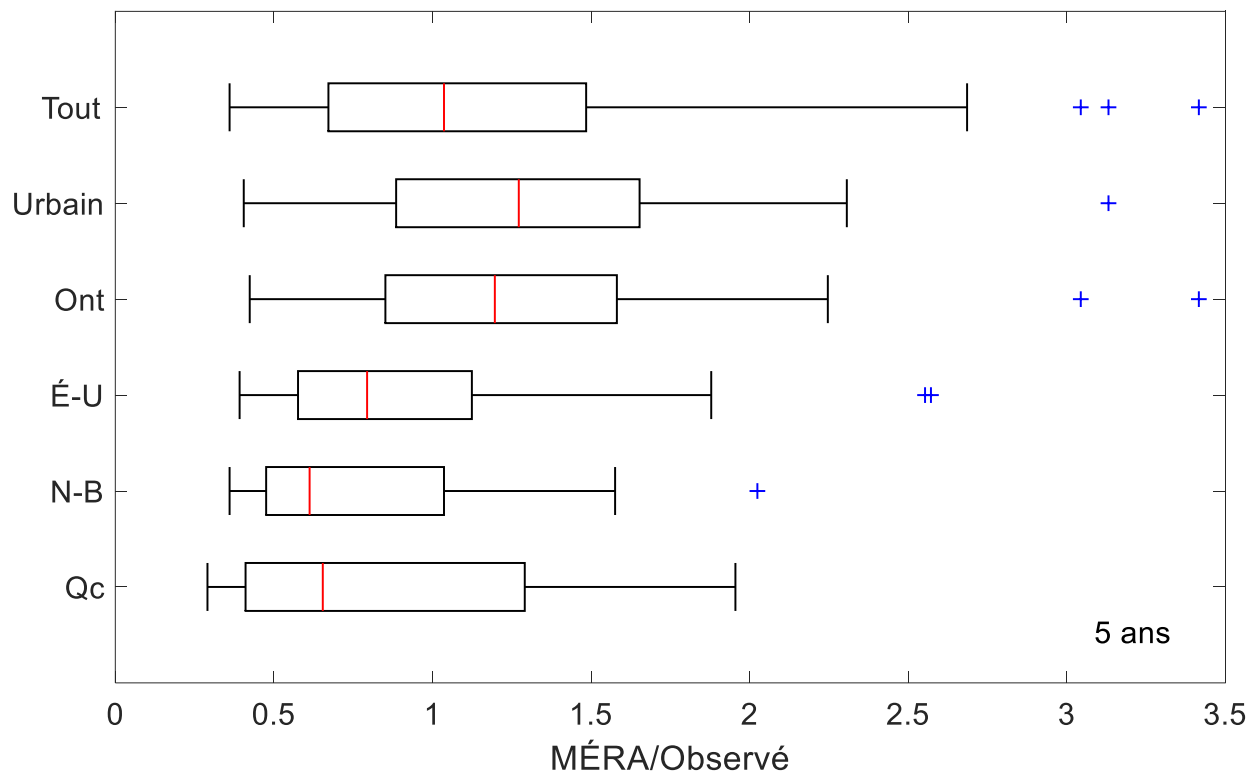


(c)

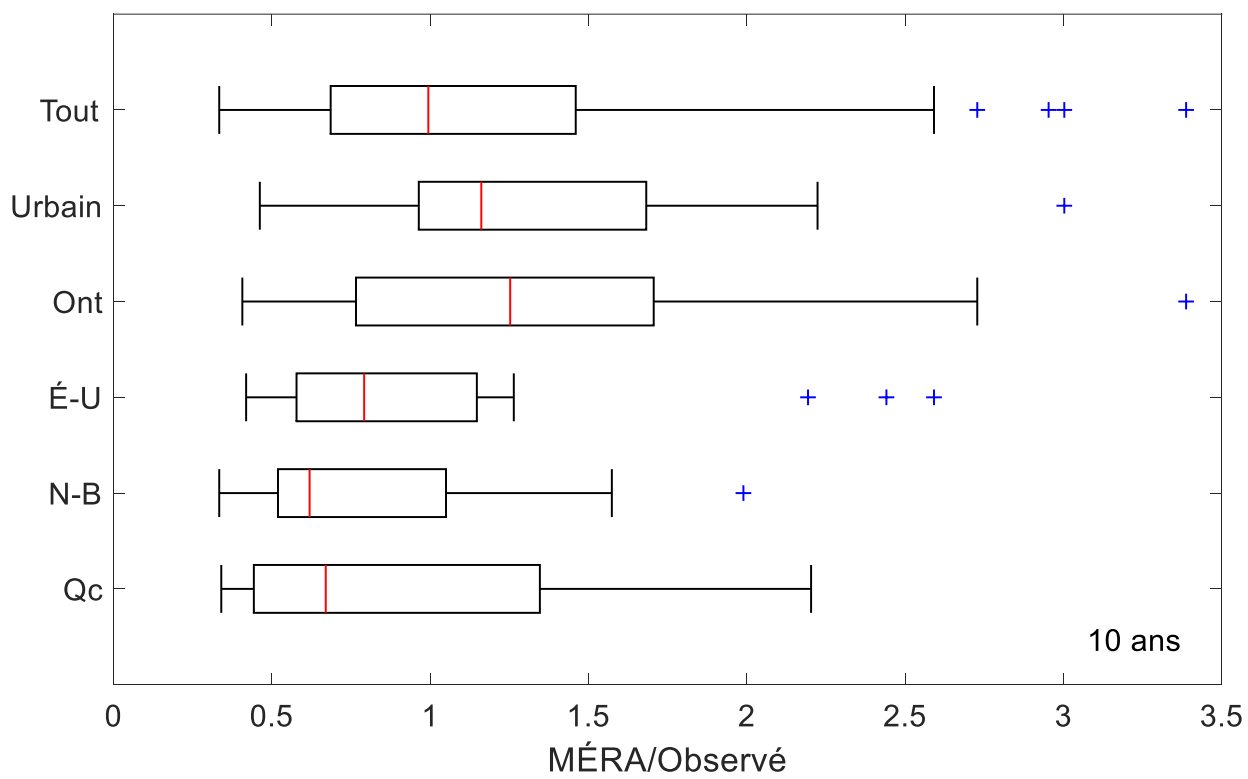


(d)

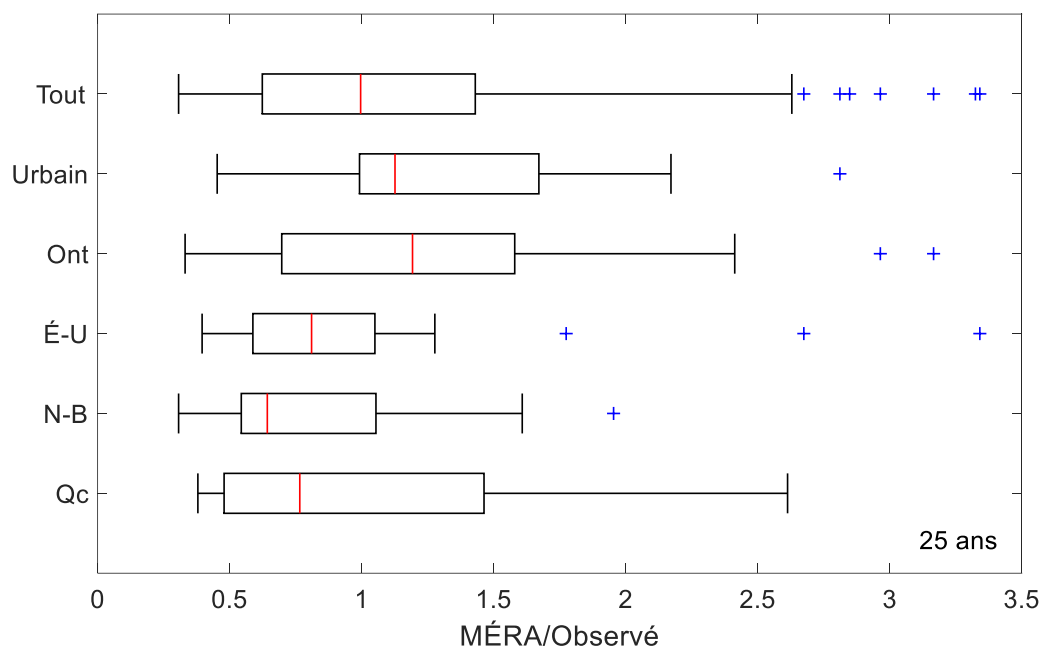
Figure H.2 - Comparaison des DMA spécifiques observés et estimés avec la MÉRA après application des facteurs de corrections (Tableau 7.1) pour les BV du Québec (Qc, Groupes A et B), du Nouveau-Brunswick (N-B, Groupe D), des États-Unis (É-U, Groupe E), de l'Ontario (Ont, Groupe F) et les BV urbains (Groupe G) pour les PdR : a) 5 ans, b) 10 ans, c) 25 ans, d) 50 ans. Les marqueurs entourés d'un trait noir indiquent que le débit MÉRA est à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95 % du quantile de débit observé.



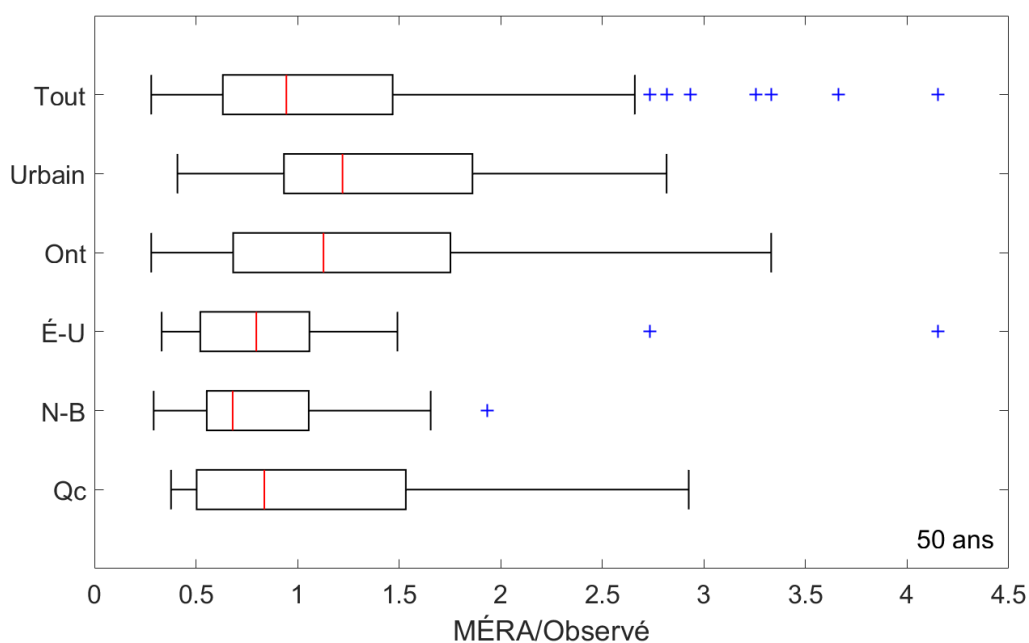
(a)



(b)

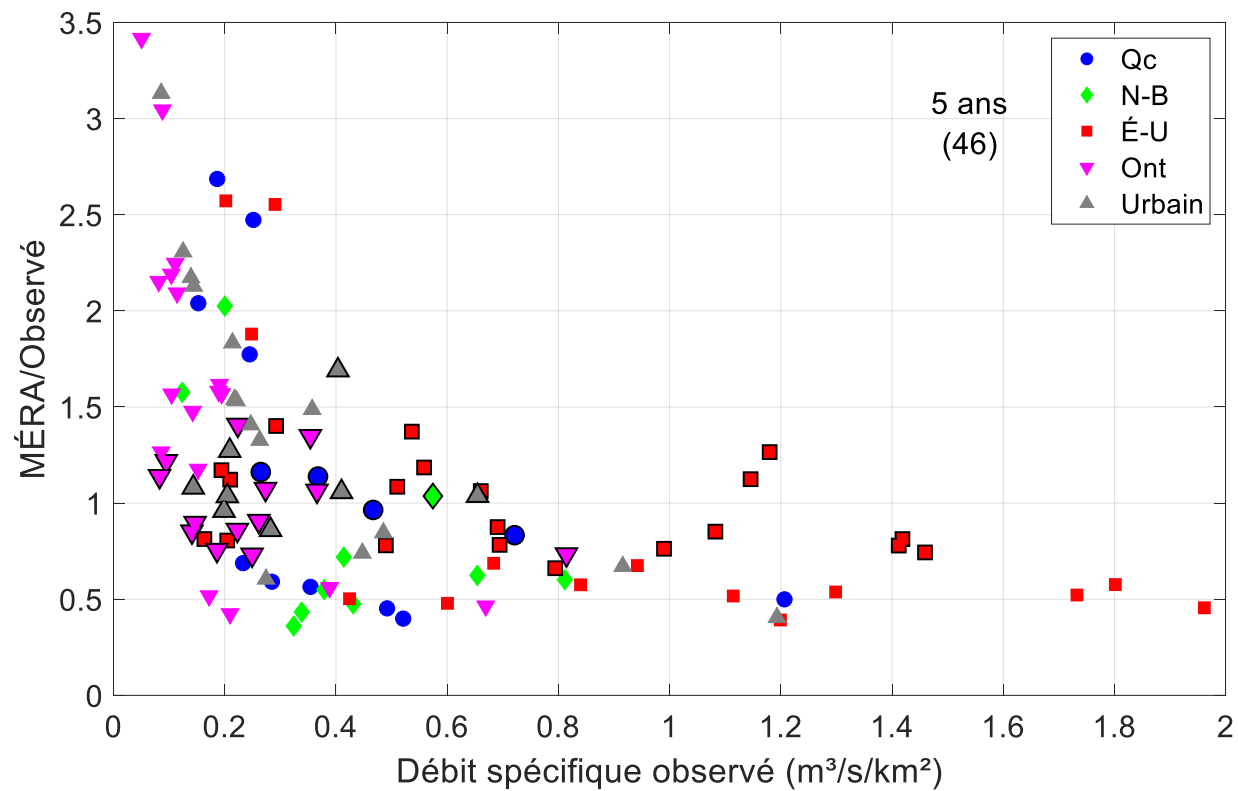


(c)

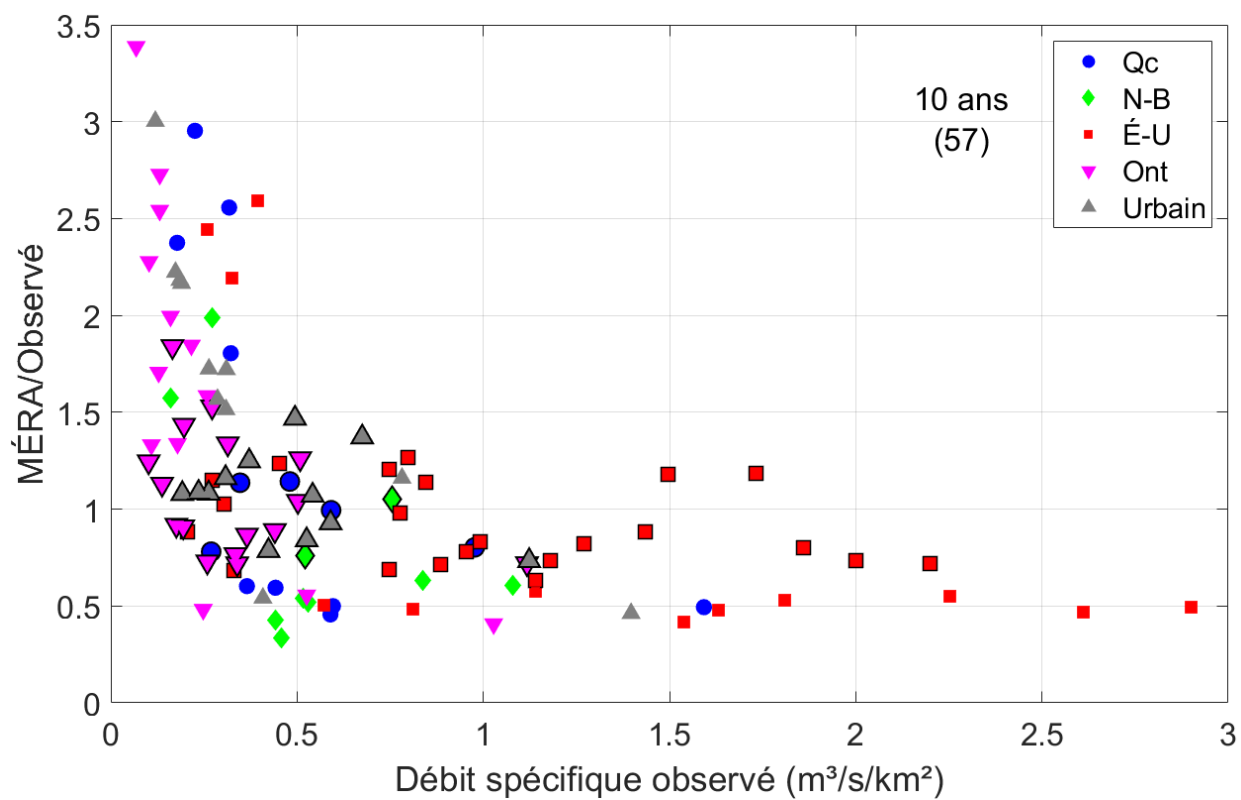


(d)

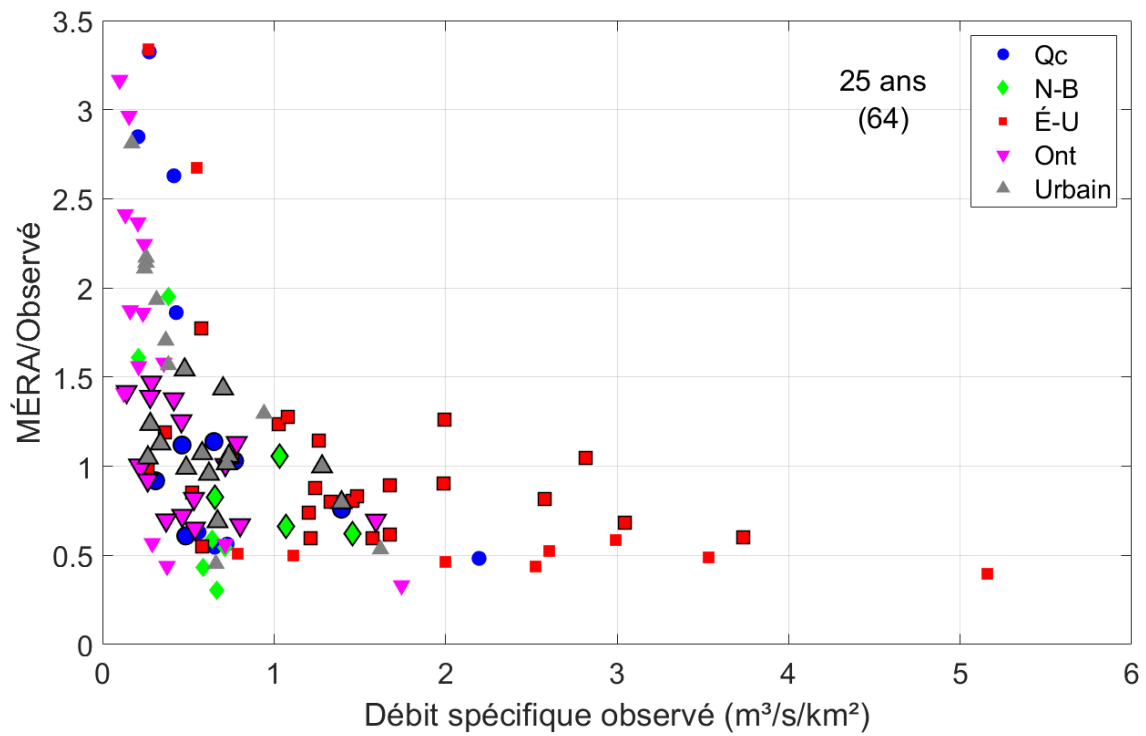
Figure H.3 - Distribution des rapports entre quantiles DMA estimés à partir de la MÉRA et des quantiles correspondant estimés à partir des séries observées $F_T^{(MÉRA)}$ (MÉRA/observé) pour l'ensemble des BV (Tout) et les BV du Québec (Qc), du Nouveau-Brunswick (N-B), des États-Unis (É-U), de l'Ontario (Ont) et les BV urbains (Urbain) pour les PdR : a) 5 ans, b) 10 ans, (c), 25 ans, (d) 50 ans. Les chiffres sur l'axe des ordonnées à droite correspondent aux nombres de BV pour lesquels les DMA de la MÉRA se trouve à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95 % des quantiles observés (numérateur) et au nombre total de BV considéré (dénominateur). La ligne bleue pointillée verticale correspond à la valeur MÉRA/observé = 1. Le trait rouge à l'intérieur des boxplots représente la médiane (2^e quartile), les limites des boîtes représentent les 1^{er} et 3^e quartiles, la moustache supérieure correspond à $[3^e \text{ quartile} + 1.5 (3^e \text{ quartile} - 1^e \text{ quartile})]$ et la moustache inférieure au $3^e \text{ quartile} - 1.5 (3^e \text{ quartile} - 1^e \text{ quartile})$, les croix bleues présentent les valeurs supérieures à $[3^e \text{ quartile} + 1.5 (3^e \text{ quartile} - 1^e \text{ quartile})]$.



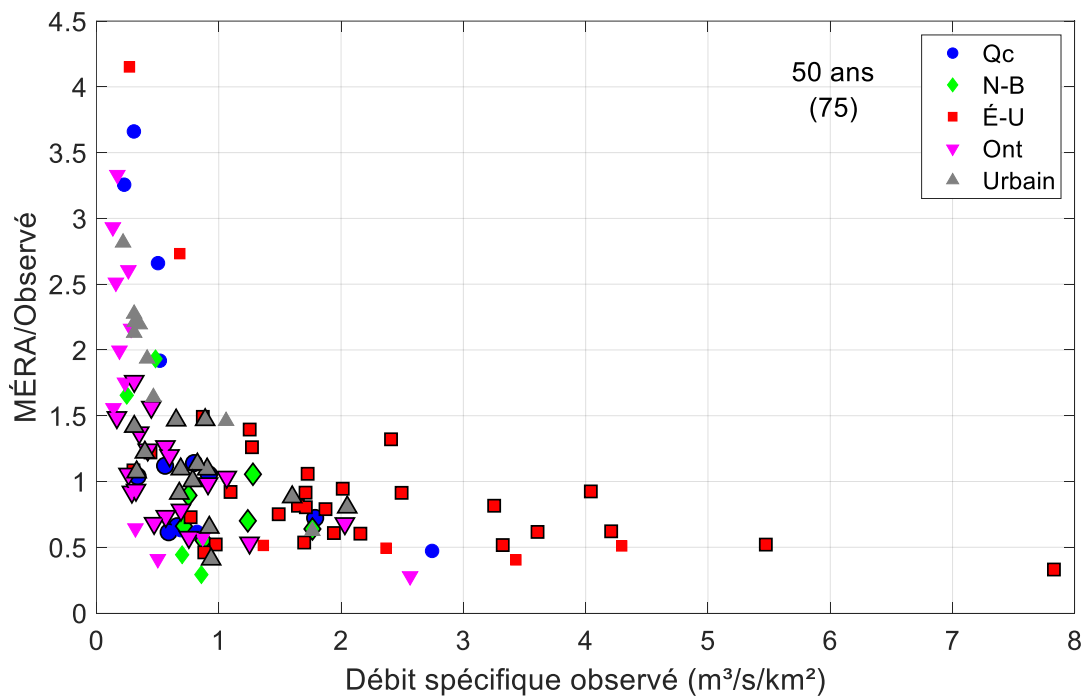
(a)



(b)

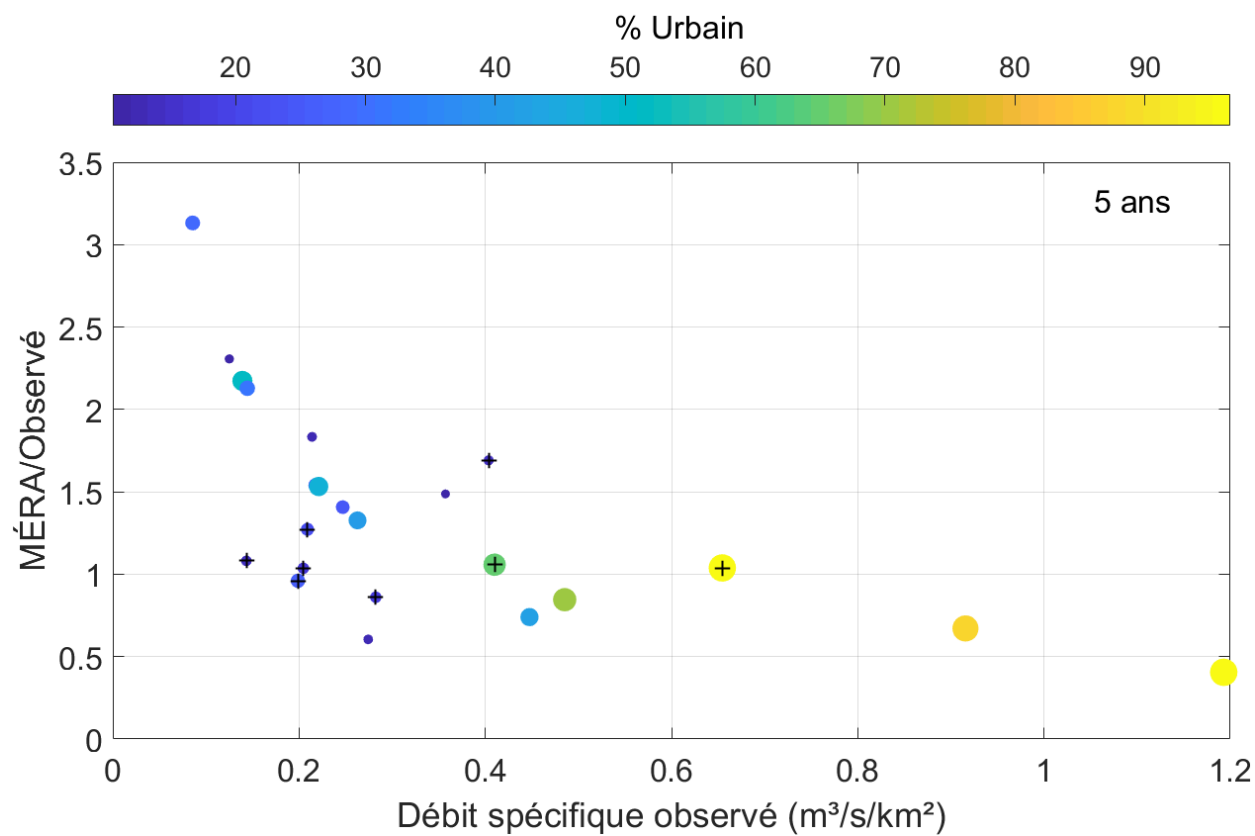


(c)

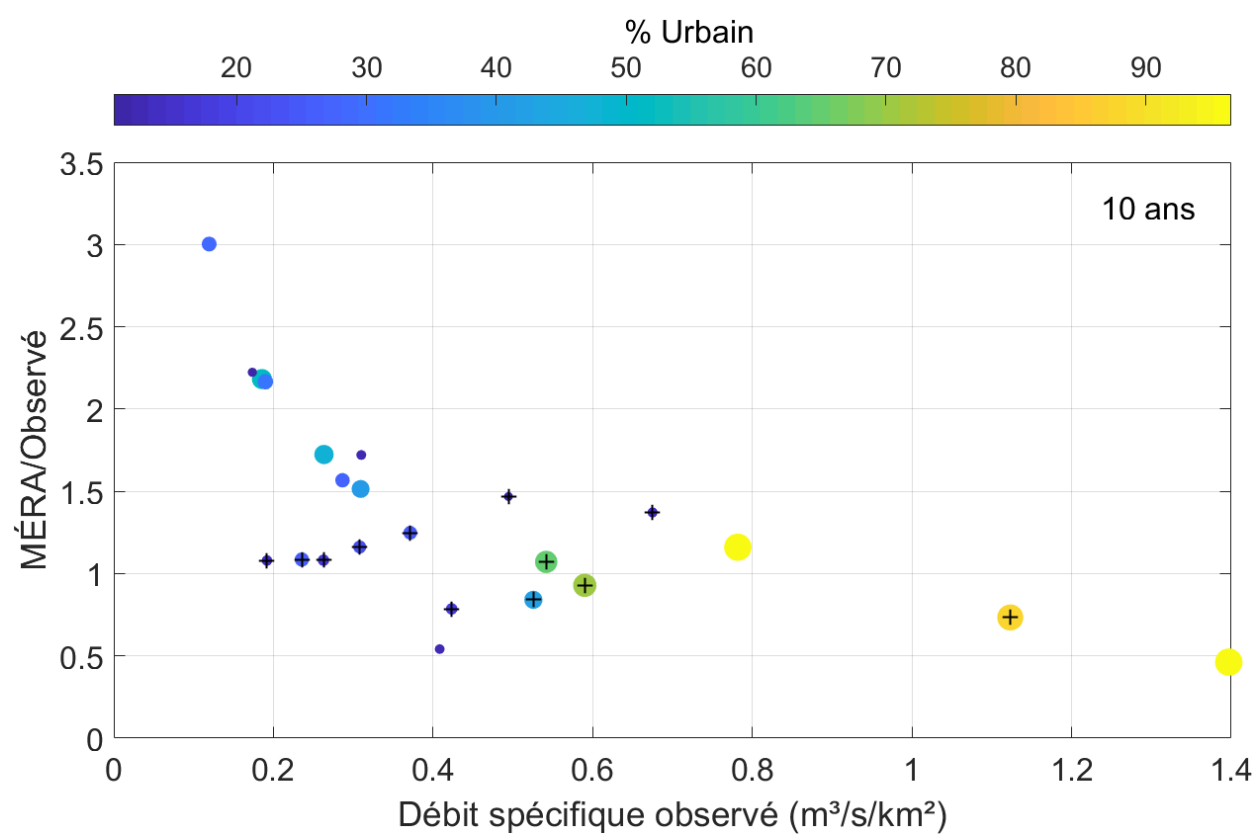


(d)

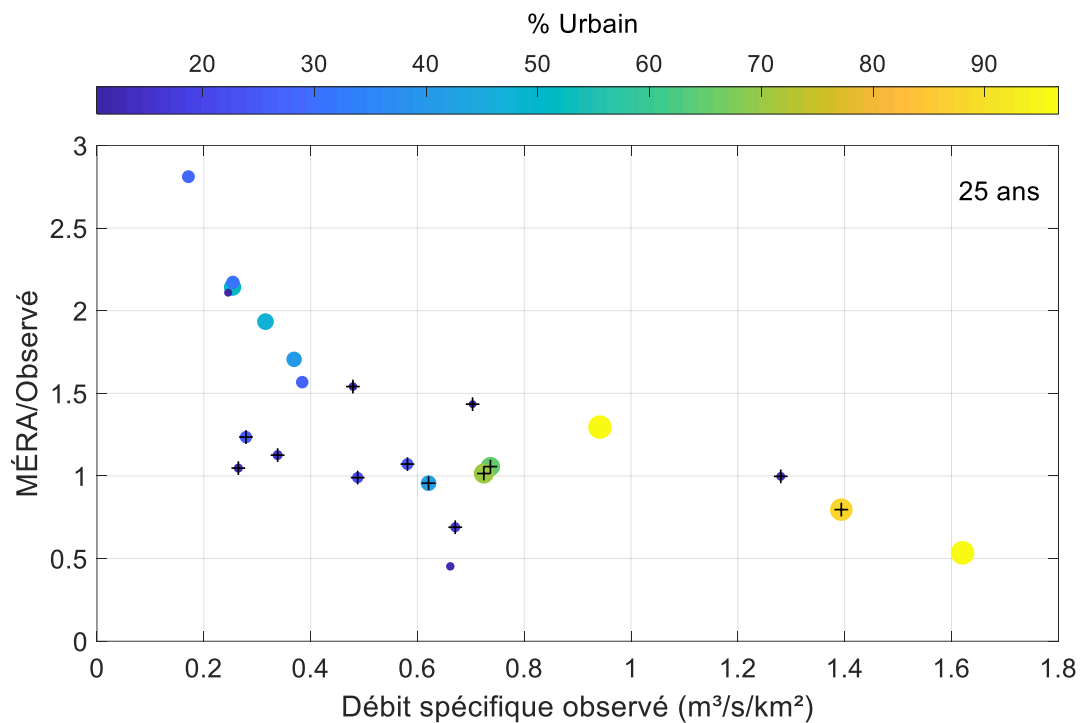
Figure H.4 - Rapports des DMA estimés à partir de la MÉRA et des quantiles correspondant estimés à partir des données observées (MÉRA/observé) en fonction du débit spécifique observé pour les BV du Québec (Qc), du Nouveau-Brunswick (N-B), des États-Unis (É-U), de l'Ontario (Ont) et BV urbains (urbain) pour les PdR : a) 5 ans, b) 10 ans, c) 25 ans, d) 50 ans. Les marqueurs entourés d'un trait noir indiquent que le débit MÉRA est à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95 % du quantile de débit observé. Le nombre de BV pour lesquels cette situation survient est indiqué entre parenthèses dans le haut des graphiques.



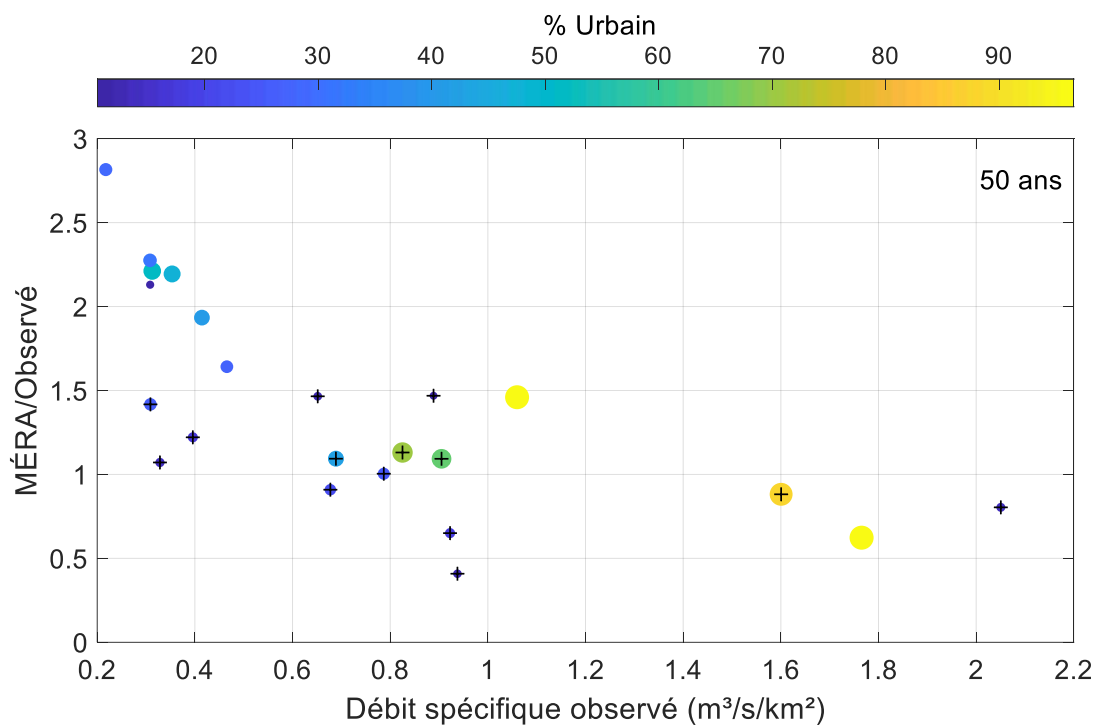
(a)



(b)

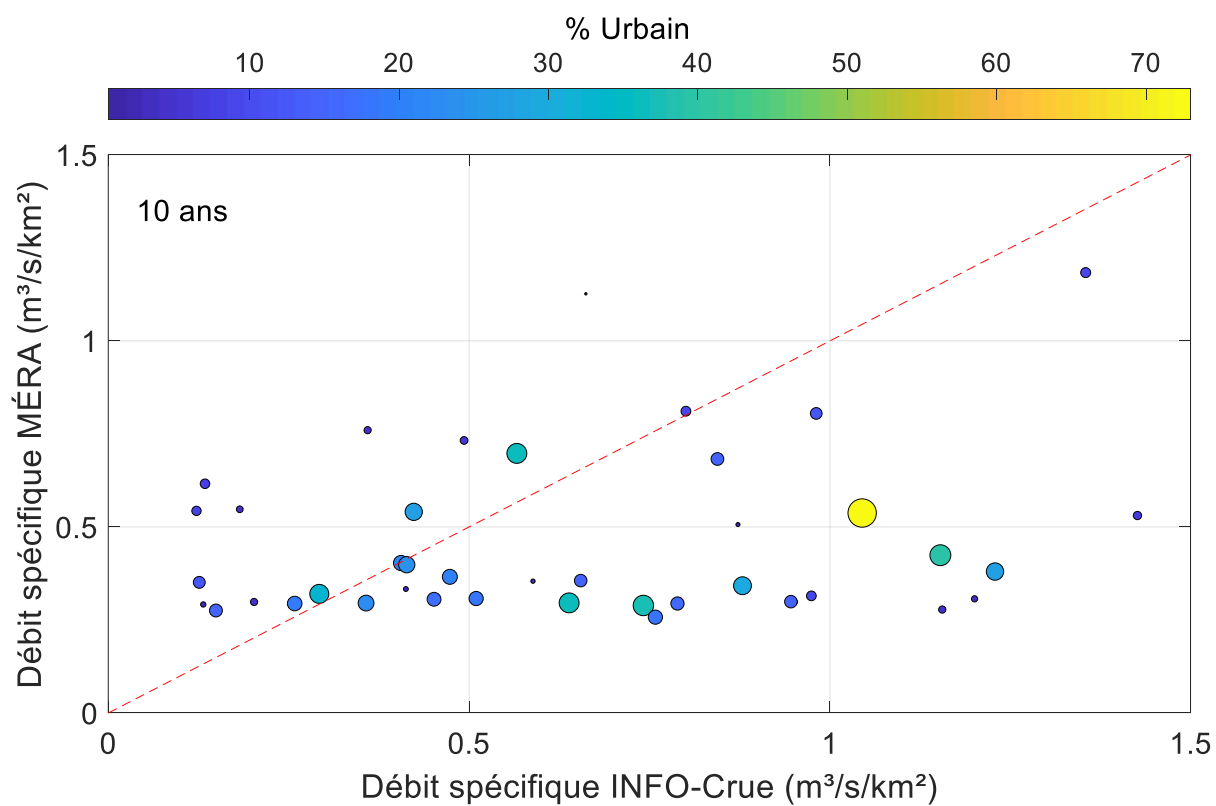
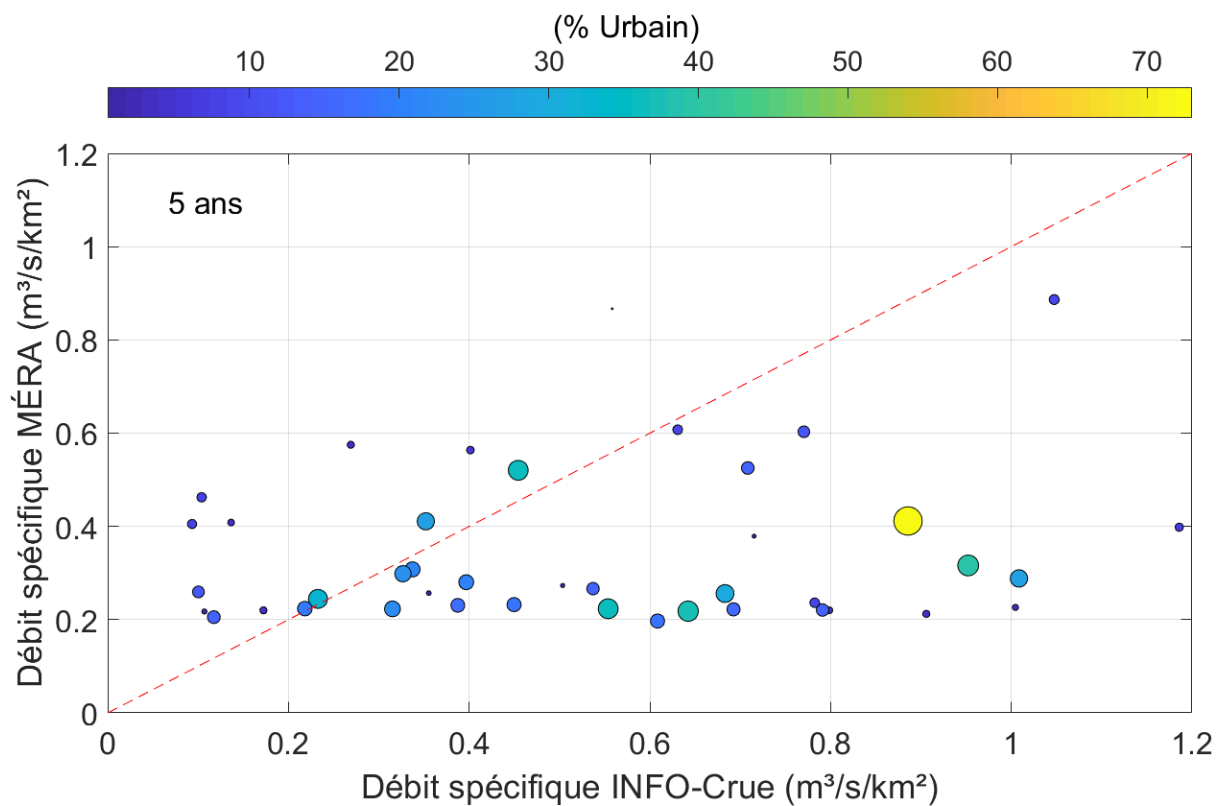


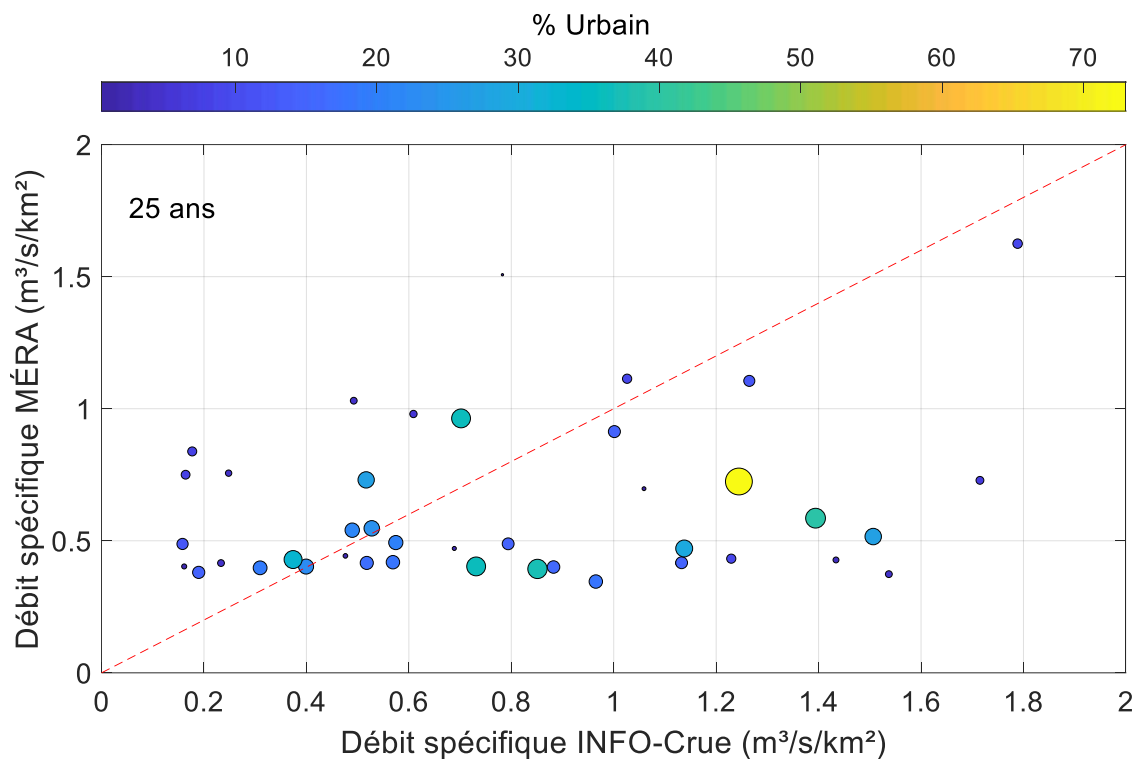
(c)



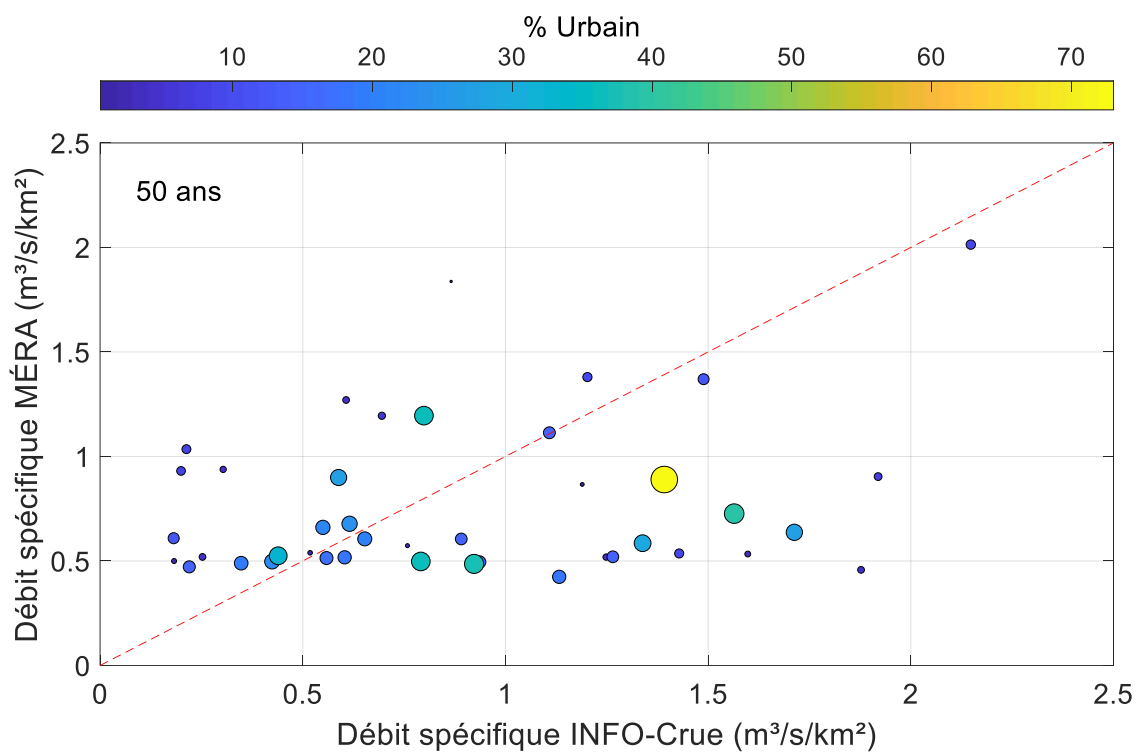
(d)

Figure H.5 - Rapport entre quantiles DMA estimés à partir de la MÉRA et quantiles DMA estimés à partir des séries observées (MÉRA/Obs.) pour les BV dont l'occupation urbaine est supérieure à 10 % (Groupe G) pour les PdR : a) 5 ans, b) 10 ans, c) 25 ans, d) 50 ans. Le code de couleur indique le % d'occupation urbaine et les croix signifie que le quantile MERA est à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95 % du quantile observé



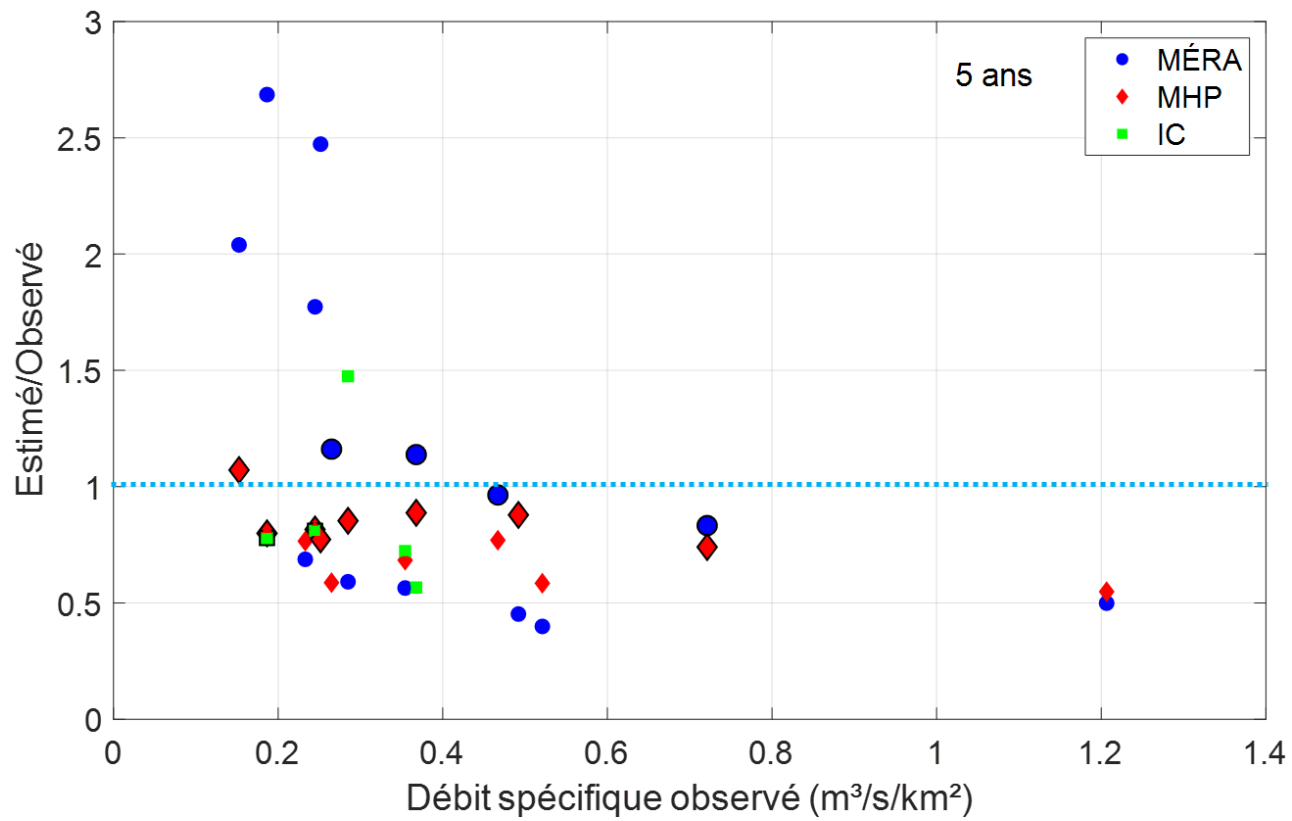


(c)

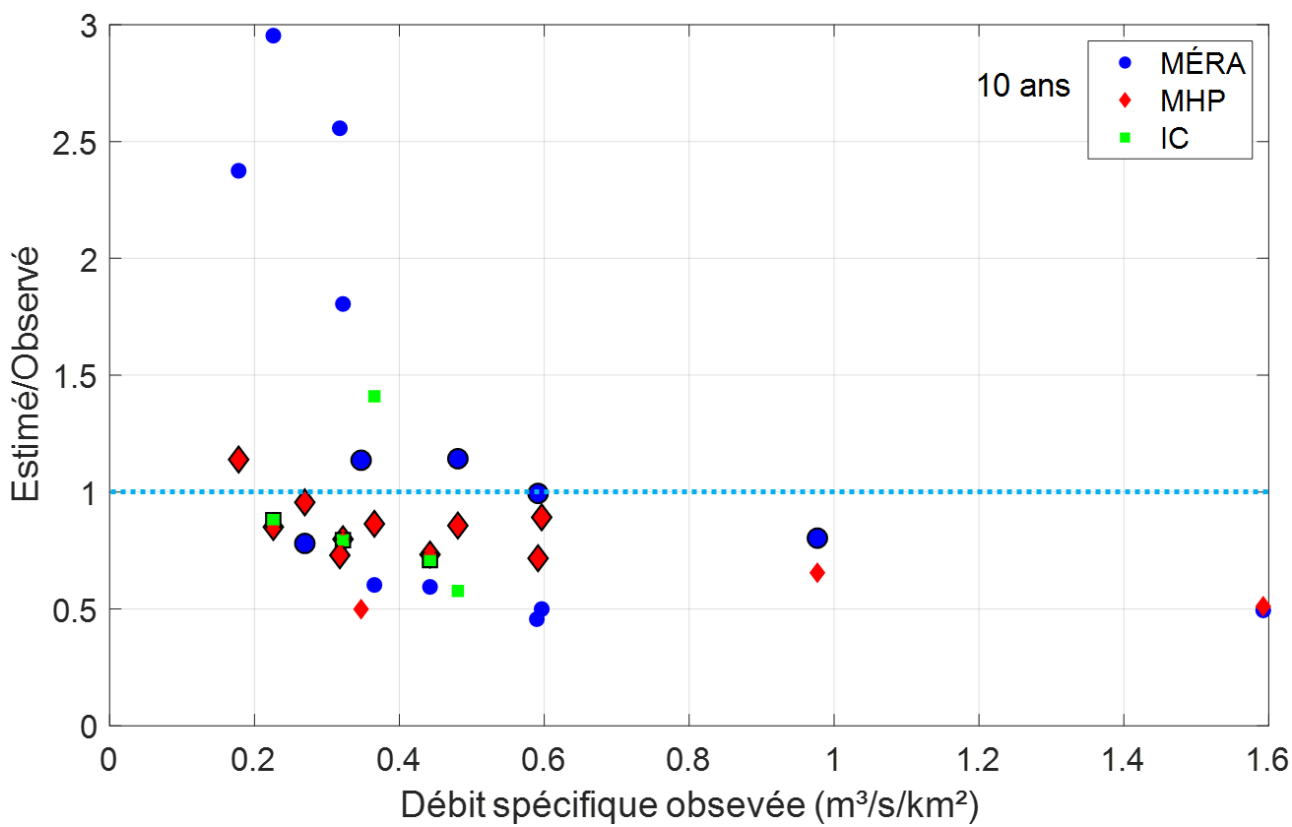


(d)

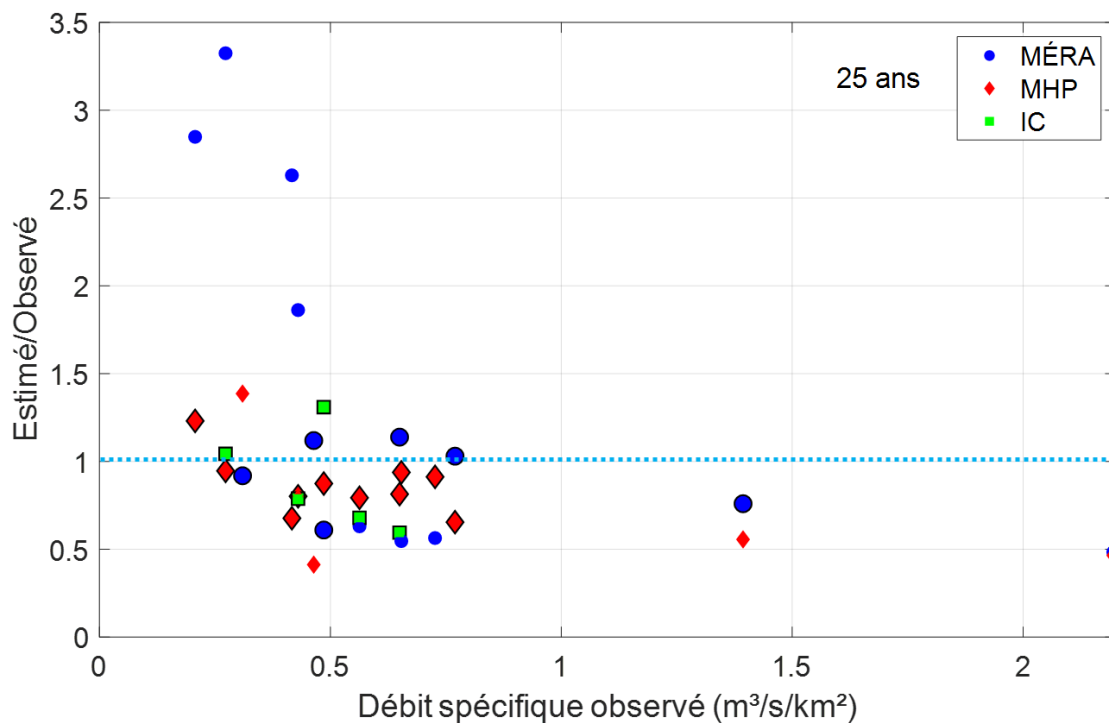
Figure H.6 - Comparaison des quantiles de débits spécifiques estimés par la MÉRA en fonction des quantiles correspondants estimés à partir des débits simulés INFO-Crue pour les 42 BV prioritaires (Groupe C) pour les PdR a) 5 ans, b) 10 ans, c) 25 ans, d) 50 ans. Le code de couleur indique le % d'occupation urbaine.



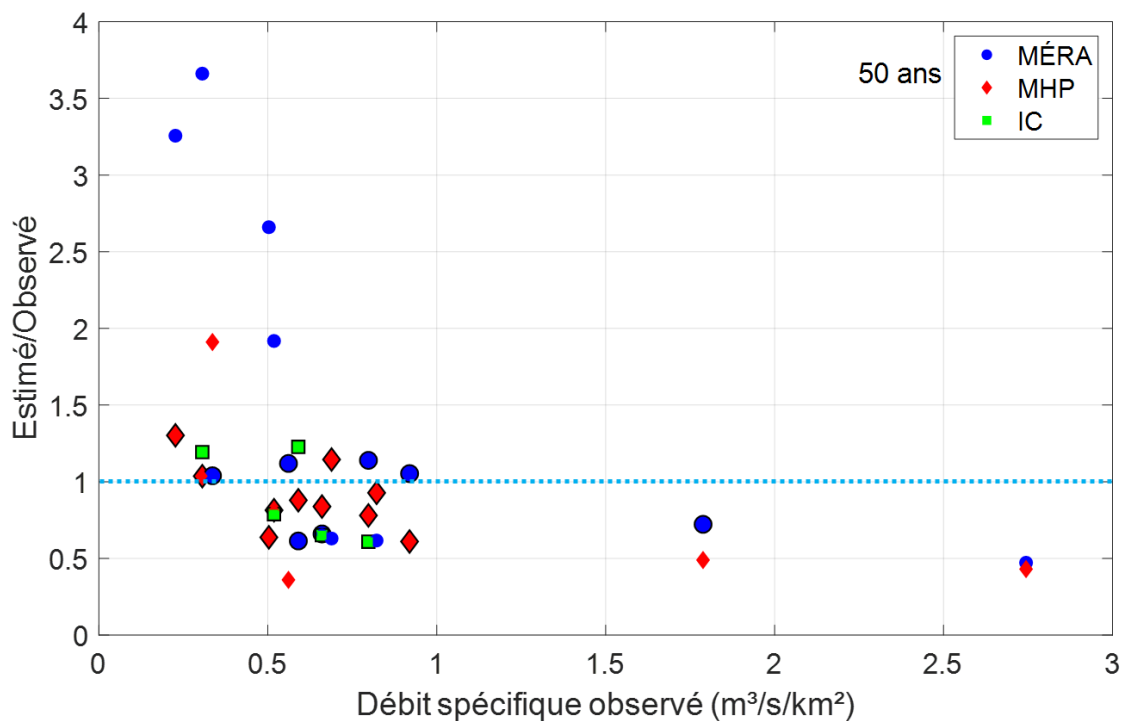
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure H.7 - Rapport des quantiles estimés selon les différentes approches aux quantiles estimés à partir des données observées pour les BV du Québec (Qc, Groupes A et B) et pour les périodes de retour : a) 5 ans, b) 10 ans, c) 25 ans, d) 50 ans. Les symboles entourés d'un trait noir indiquent que les débits estimés sont à l'intérieur de l'intervalle de confiance 95 % du quantile de débit observé. MÉRA : méthode rationnelle, MHP : modèle hydrologique parcimonieux, IC : INFO-Crue.

